

فشرده‌سازی تصاویر اثر انگشت در نرخ‌بیت‌های پایین با رویکرد حفظ یا بهبود کارایی بازشناسی

هادی گرایلو^۱

چکیده

در روش فشرده‌سازی پیشنهادی در این مقاله، با بهره‌گیری از ویژگی دوحالتی بودن تصاویر اثر انگشت، از تکنیک پیشنهادی تغییر مقیاس جهت افزایش کارایی فشرده‌سازی کدگذار SPIHT و از برخی تکنیک‌های پیشنهادی جهت حذف اثر نشتی حاصل از فشرده‌سازی در نرخ بیت‌های پایین و افزایش کارایی بازشناسی روش فشرده‌سازی پیشنهادی استفاده شده است. همچنین، اثرات فشرده‌سازی روی بازشناسی بررسی شده و در این بررسی، یک معیار برحسب نقطه‌ی شکست و شیب اُفت منحنی دقت بازشناسی جهت ارزیابی روش‌های بازشناسی تصاویر اثر انگشت پیشنهاد شده است. نتایج نشان می‌دهد که تکنیک پیشنهادی کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر موجب کاهش نقطه‌ی شکست به اندازه‌ی 0.05bpp و تکنیک‌های بهسازی موجب افزایش دقت بازشناسی (تا ۵ درصد در نقاط بالاتر از نقطه‌ی شکست) و کاهش شیب اُفت دقت بازشناسی (در نقاط پایین‌تر از نقطه‌ی شکست) شده‌اند. همچنین، کارایی متوسط PSNR در روش پیشنهادی در مقایسه با روش‌های JPEG2000 و WSQ به طور متوسط تا 0.8 dB افزایش یافته است.

کلید واژه‌ها

تبدیل موجک، کدگذار SPIHT، فشرده‌سازی، تصاویر اثر انگشت، بهسازی، کارایی بازشناسی

۱ مقدمه

در بین تمام مشخصه‌های حیاتی مانند چهره، اثر انگشت، هندسه دست، عنبیه، شبکیه، امضا، اثر صدا، مویرگ‌های دست، گوش، و حالت رفتاری، شناسایی مبتنی بر اثر انگشت یکی از جاف‌تاده‌ترین و مطمئن‌ترین فنون موجود است [۱]. یکتایی اثر انگشت مربوط به الگوی فرورفتگی‌ها و برجستگی‌های موجود روی سطح پوست انگشت دست می‌باشد.

یکی از ویژگی‌های مهم تصاویر اثر انگشت که تاکنون توجهی به آن نشده است، دوحالتی بودن آن‌ها است؛ یعنی دارای دو سطح روشنایی غالب و مهم می‌باشند. این ویژگی، جزو وجوه تمایز تصاویر اثر انگشت با دیگر انواع تصاویر بوده و موجب لزوم ویژه

شدن روش‌های پردازش تصاویر اثر انگشت شده است. در کار این مقاله از این ویژگی، برای اولین بار، در تکنیک پیشنهادی کاهش محدوده‌ی دینامیکی تغییرات تصویر استفاده شده است.

همه روزه حجم زیادی از تصاویر اثر انگشت در قالب کاربردهای بسیاری مانند محاکم قضایی و سیستم‌های کنترل دسترسی، جمع‌آوری و ذخیره می‌شود. نمونه‌ای از این مطلب، پایگاه داده بزرگ FBI است که شامل بیش از ۷۰ میلیون تصویر اثر انگشت است [۲]. با توجه به حجم محدود حافظه‌های فیزیکی موجود و نیز هزینه‌ی بالای آن‌ها، فشرده‌سازی این حجم عظیم از تصاویر، امری اجتناب ناپذیر است؛ در سیستم‌های بازشناسی، گرچه میتوان به جای ذخیره تصاویر اولیه اثر انگشت، تنها ویژگی‌های مورد استفاده در امر بازشناسی و شناسایی را ذخیره نمود تا حجم حافظه کمتری مورد نیاز باشد، اما اگر روش جدیدتر و با مجموعه ویژگی‌های جدیدتری بخواهیم استفاده کنیم، می‌بایست از تمامی افراد خواسته شود که دوباره برای ثبت اثر انگشت مراجعه کنند که این امر در برخی مواقع (مانند پایگاه اثر انگشت پلیس فدرال

این مقاله در مردادماه ۱۳۹۴ دریافت، در مهرماه بازنگری و در آبانماه همان سال پذیرفته شد.

۱ گروه مهندسی الکترونیک، دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه شاهرود
رایانامه: grailu@shahroodut.ac.ir

اثرانگشت معمولاً کارایی فشرده‌سازی روش خود را با این کدگذار مقایسه می‌کنند [۳، ۹، ۱۰]. طبق دانسته‌ی مولف، روش‌های موجود در زمینه‌ی ترکیب این کدگذار با تکنیک‌هایی که موجب بهبود کارایی فشرده‌سازی و بازشناسی آن شود، کاری انجام نداده‌اند. هدف این مقاله، بهبود کارایی فشرده‌سازی و بازشناسی این کدگذار به کمک تکنیک‌های کاهش محدوده‌ی دینامیکی تصویر و بهسازی تصویر می‌باشد. وجوه اصلی تمایز کار مقاله‌ی حاضر با روش‌های فشرده‌سازی موجود عبارتند از: (۱) استفاده از ویژگی دوحالته بودن تصاویر اثرانگشت، برای اولین بار، در تکنیک پیشنهادی تغییر مقیاس جهت افزایش کارایی فشرده‌سازی روش پیشنهادی، (۲) استفاده از بهسازی در حین مراحل فشرده‌سازی-بازسازی به منظور بهبود کارایی بازشناسی روش پیشنهادی، و (۳) تحلیل دقیق‌تر و عمیق‌تر اثرات اجزای روش پیشنهادی روی کارایی فشرده‌سازی و بازشناسی برطبق معیارهای منحنی متوسط نسبت بیشینه‌ی سیگنال به نویز ($PSNR^4$) و دقت بازشناسی و مقایسه با دو روش JPEG2000 و روش کوانتیزاسیون اسکالر موجک (WSQ^5).

با استفاده از تکنیک کاهش محدوده‌ی تغییرات (یا تغییر مقیاس) تصویر، محدوده‌ی تغییرات تصویر قبل از اعمال تبدیل موجک کاهش یافته و بنابراین از یک طرف به دلیل دوحالته بودن تصاویر اثرانگشت، کیفیت تصویر قبل و بعد از تغییر مقیاس تغییر چندانی نکرده و از طرف دیگر، به دو صورت موجب افزایش کارایی کدگذاری SPIHT می‌شود: یکی این که به دلیل کاهش تعداد سطوح بیتی ضرایب تبدیل موجک، تعداد کل بیت‌های لازم جهت ارسال/کدگذاری در الگوریتم SPIHT کاهش می‌یابد؛ دیگر این که، کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر موجب کاهش آنتروپی تصویر و در نتیجه، افزایش کارایی کدگذاری حسابی مورد استفاده در کدگذار SPIHT می‌شود.

با توجه به این که کارایی الگوریتم‌های استخراج ریزنقش‌ها و در حالت کلی، کارایی روش‌های بازشناسی اثرانگشت تا حد بسیار زیادی به کیفیت تصویر اثر انگشت بستگی دارد [۱۱] و از طرفی فشرده‌سازی تصویر در نرخ‌بیت‌های پایین (که مورد توجه این مقاله است) موجب افت قابل ملاحظه‌ی کیفیت تصویر می‌شود (شکل ۱)، استفاده از بهسازی تصویر، ضروری به نظر می‌رسد.

شکل ۱ یک تصویر اثرانگشت را قبل و بعد از فشرده‌سازی به کمک تبدیل موجک و کدگذاری SPIHT در دو نرخ بیت 0.1 bps و 0.05 bps نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که فشرده‌سازی موجب محو جزئی یا کلی شیارها شده است. در این مقاله، چند محل ممکن برای استفاده از بهسازی تصویر بررسی می‌شود. روش پیشنهادی جهت بهسازی تصویر و کانتراست آن مبتنی بر تنظیم تصویر از طریق تبدیل پروفایل شدت روشنایی تصویر

آمریکا، FBI) غیرممکن است [۳]. بنابراین، ذخیره تصاویر اولیه اثرانگشت در برخی مواقع مفید و حتی ضروری است. حجم لازم برای ذخیره‌سازی این تصاویر گاهاً بسیار زیاد بوده و نیاز به استفاده از روش‌های موثری برای کاهش حجم ذخیره‌سازی می‌باشد.

روش‌های فشرده‌سازی به دو دسته بااتلاف و بدون اتلاف تقسیم می‌شوند. روش‌های بااتلاف دارای میزان فشرده‌سازی بسیار بیشتری نسبت به دسته دیگر می‌باشند؛ لذا، انتخاب مناسبی برای کاربردهای مورد نظر این مقاله، یعنی دسترسی همزمان به میزان فشرده‌سازی بالا و حفظ یا بهبود کارایی بازشناسی تصاویر فشرده‌شده، هستند. از طرفی این روش‌ها همواره با از بین بردن مقداری از اطلاعات اولیه، موجب تولید اعوجاج می‌شوند. این مقدار اعوجاج در نرخ بیت‌های پایین‌تر، بیشتر می‌شود. با توجه به این که مهمترین کاربرد تصاویر اثرانگشت در بازشناسی افراد است، مقدار اعوجاج مذکور ممکن است آن قدر زیاد شود که کارایی بازشناسی را کاهش دهد؛ بنابراین، در نظر گرفتن اثر روش‌های فشرده‌سازی روی کارایی بازشناسی یک روش بازشناسی، مهم است. طبق دانسته‌ی مولف، تاکنون، بررسی و مطالعه‌ی بسیار کمی روی این رابطه انجام شده است.

روش‌های فشرده‌سازی مبتنی بر تبدیل موجک جزو روش‌های جدید، امروزی، و موثر محسوب می‌شوند [۴]. امروزه مشخص شده است که ترکیب تبدیل موجک و کدگذارهای بخش‌بندی مجموعه (SPC^1) [۵، ۶] در حالت کلی در بیشتر کاربردها، کارایی بیشتری نسبت به دیگر انواع تبدیل‌ها (مانند تبدیل کسینوسی گسسته (DCT^2)) و کدگذارها (مانند هافمن و حسابی وفقی) دارد [۴، ۵، ۶]. کدگذارهای SPC عموماً از ویژگی وجود شباهت در زیرباندهای هم‌راستا در تجزیه‌ی هرمی موجک بهره می‌برند. عملکرد این روش‌ها عمدتاً مبتنی بر روشی قانون‌مند برای جستجوی مهمترین ضرایب موجک و تصمیم‌گیری در مورد کدگذاری مناسب آنها است طوری که واحد کدگشا، با در دست داشتن نتایج این جستجو و تصمیم‌گیری، قادر به بازسازی ماتریس ضرایب موجک و سپس، اعمال عکس تبدیل موجک باشد [۷]. معمولاً نتایج این جستجو به کمک کدگذارهای آنتروپی مانند کدگذار حسابی، کدگذاری شده و دنباله‌ی بیتی خروجی را تشکیل می‌دهند.

از جمله مهمترین روش‌های کدگذاری SPC، روش بخش‌بندی مجموعه در درخت‌های سلسله مراتبی ($SPIHT^3$) است [۸]. این روش تاکنون برای تصاویر مختلفی مانند تصاویر هوایی، تصاویر پزشکی، و تصاویر عمومی و نیز برای سیگنال‌هایی مانند سیگنال‌های قلبی و مغزی به کار برده شده است [۷]. اهمیت این کدگذار به حدی است که روش‌های امروزی فشرده‌سازی تصاویر

¹ Set Partitioning Coder

² Discrete Cosine Transform

³ Set Partitioning in Hierarchical Trees

⁴ Peak Signal-to-Noise Ratio

⁵ Wavelet Scalar Quantization

عامل‌های تعیین کننده کیفیت آن تصویر بوده و نقش مهمی در دقت بازشناسی دارد [۱۱].

[۱۲-۱۳] و سپس، تیزسازی تصویر مبتنی بر ماسک تیزسازی [۱۲، ۱۴] می‌باشد. کانتراست یک تصویر اثرانگشت، یکی از



شکل ۱: (الف) یک نمونه تصویر اولیه اثرانگشت [۴۱]، (ب) حاصل فشرده‌سازی تصویر (الف) به کمک تبدیل موجک و کدگذاری SPIHT در نرخ بیت 0.1. (ج) حاصل فشرده‌سازی تصویر (الف) به کمک تبدیل موجک و کدگذاری SPIHT در نرخ بیت 0.05؛ ملاحظه می‌شود برخی ریزنقش‌ها حذف شده و کیفیت برخی دیگر نیز تا حد نسبتاً زیادی آفت کرده است.

طبق ادعای مولفان، در سیستم‌های شامل تعداد کمی از داده‌های اثرانگشت خوب جواب می‌دهد.

در روش مبتنی بر شبکه‌ی عصبی، به منظور بالا بردن کارایی بازشناسی، از برخی فرایندها مانند بهسازی لبه و دودویی‌سازی استفاده شده است. برای دودویی‌سازی ابتدا از لبه‌یاب لاپلاسیان و سپس آستانه‌گیری استفاده می‌شود. سپس به کمک نازک‌سازی مورفولوژی، شیارها به ساختار اسکلتی تبدیل می‌شوند. به دلیل وجود برخی بی‌نظمی‌ها در تصویر دودویی شده، از فرآیند هموارسازی شامل مواردی مانند پرکردن حفره‌ها، حذف نقاط نویزی، و پرکردن نقاط مفقود یا حذف شده استفاده شده است. از یک شبکه عصبی پرسپترون چندلایه متشکل از سه لایه برای آشکارسازی ریزنقش‌ها و استخراج ویژگی استفاده شده است. لایه‌ی اول شامل ۹ گره، لایه‌ی دوم (لایه‌ی مخفی) شامل ۵ گره، و لایه‌ی خروجی نیز یک گره دارد که شامل شماره‌ی کلاس (یا دسته) است. برای انجام طبقه‌بندی از یک شبکه عصبی پرسپترون چندلایه، MLP^6 استفاده شده است. در آموزش این شبکه عصبی، حدود یک سوم داده‌ها استفاده شدند.

روش مبتنی بر فیلتر بانک گابور

روش پیشنهادی در [۱۶، ۱۷] از بانکی از فیلترهای گابور برای استخراج جزئیات محلی و سرتاسری اثر انگشت استفاده می‌کند. مجموعه‌ی این جزئیات محلی و سرتاسری دارای طول ثابت بوده و کد انگشت نامیده شده است.

مراحل اصلی روش پیشنهادی عبارتند از:

الف) تعیین نقطه‌ی مرجع و ناحیه‌ی مطلوب برای تصویر اثرانگشت،

ادامه‌ی این مقاله به این ترتیب است که در بخش ۲، مهمترین روش‌های فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت معرفی شده‌اند. همچنین، در این بخش، اساس عملکرد سه روش بازشناسی مورد استفاده در کار این مقاله توضیح داده شده است. در بخش ۳، روش پیشنهادی و اجزای آن معرفی می‌شوند. بخش ۴ به تشریح نتایج شبیه‌سازی پرداخته و در بخش ۵ نیز نتیجه‌گیری مقاله آمده است.

۲- مروری بر روش‌های موجود

در این بخش، ابتدا سه روش بازشناسی مورد استفاده در کار این مقاله و سپس مهمترین روش‌های فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت بررسی می‌شوند.

۱-۲ روش‌های بازشناسی مورد استفاده در کار این مقاله

در این مقاله، برای بازشناسی تصاویر فشرده شده اثرانگشت از سه روش مختلف مربوط به سه دسته‌ی مهم روش‌های بازشناسی تصاویر اثرانگشت [۱] استفاده شده است. این سه روش شامل روش‌های مبتنی بر استخراج ریزنقش [۱۱]، مبتنی بر شبکه‌ی عصبی [۱۵]، و مبتنی بر فیلتربانک گابور [۱۶، ۱۷] می‌باشند.

روش مبتنی بر شبکه‌ی عصبی

در روش مبتنی بر شبکه‌ی عصبی [۱۵]، ویژگی‌ها به نحوی انتخاب و استفاده شده‌اند که نسبت به جابجایی، چرخش، و تغییر مقیاس تغییرناپذیر باشند. روش پیشنهاد شده در [۱۵]،

⁶ Multilayer Perceptron

فشرده می‌شوند. برای مثال در [۲۱]، از اسپلاین‌ها و در [۲۲] از منحنی‌های بزییر برای نمایش و فشرده‌سازی تصویر اثر انگشت استفاده شده است. در [۲۲]، ابتدا شیاریا استخراج و سپس تعدادی نقاط کنترل برای استفاده از منحنی‌های بزییر تعیین می‌شود. این نقاط کنترلی ذخیره شده و در هنگام بازسازی تصویر اثر انگشت، از نقاط کنترلی برای بازسازی به کمک منحنی‌های بزییر استفاده می‌شود. در این کار، به منظور استخراج شیاریا و فرورفتگی‌ها از پیش پردازشی شامل تعدیل هیستوگرام و دودویی‌کردن استفاده شده است.

در حالت کلی، گرچه میزان فشرده‌سازی این دسته از روش‌ها نسبتاً زیاد است، اما همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد، محدودیت زیادی در روش‌های بازشناسی مجاز و قابل استفاده دارند. از دیگر معایب این دسته از روش‌ها این است که تصویر بازسازی شده یک تصویر تقریباً مصنوعی خواهد بود که برخی اطلاعات مهم تصویر اولیه را نخواهد داشت. همچنین، این روش‌ها مستلزم بهره‌گیری از روشی برای استخراج شیاریا هستند تا بتوانند نقاط مهم مانند نقاط کنترلی را تعیین کنند. بنابراین، اگر در این کار موفق نشده و برخی شیاریا از دست بروند یا این که شیاریای غیرواقعی، به اشتباه به عنوان شیاریا تشخیص داده شوند، نقاط کنترلی به طور صحیح و واقعی تعیین نشده و کل سیستم دچار خطا خواهد شد.

در دسته‌ی دوم از روش‌های فشرده‌سازی تصاویر اثر انگشت، از تبدیلاتی مانند تبدیل موجک استفاده می‌شود. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، روش‌های فشرده‌سازی مبتنی بر تبدیل موجک، جزو روش‌های جدید، امروزی، و موثر محسوب می‌شوند [۴].

در [۲۳]، هدف، انتخاب بهترین موجک و سطح تجزیه از بین مهم‌ترین موجک‌های دو تعامدی شامل دابیشز، سیملت، و کویفلت در کاربرد فشرده‌سازی تصاویر اثر انگشت می‌باشد. برای کدگذاری از کدگذاری هافمن استفاده شده است. نتیجه این شده است که موجک دو تعامدی bior4.4 بهترین انتخاب در این زمینه است. معیارهای مورد استفاده جهت تعیین بهترین موجک، شامل میزان فشرده‌سازی و PSNR است. موجک‌های دو تعامدی، برخلاف بقیه انواع موجک‌ها، این ویژگی را دارند که به طور همزمان قابلیت‌های تقارن و بازسازی کامل را دارند.

در [۲۴]، موجک‌هایی از خانواده‌ی کویفلت در قالب فشرده‌سازی تصاویر اثر انگشت به کمک تبدیل موجک و تبدیل بسته‌ی موجک بررسی شده‌اند تا بهترین موجک انتخاب شود. برای انتخاب بهترین موجک، از دو معیار تعداد صفرها (NZ) و انرژی باقی‌مانده (RE) استفاده شده است. تعداد سطوح تجزیه ثابت و برابر ۳ در نظر گرفته شده است. در [۲۵] نیز، هدف، انتخاب بهترین موجک و سطح تجزیه از بین مهم‌ترین موجک‌های دو تعامدی شامل دابیشز، سیملت، و کویفلت در کاربرد فشرده‌سازی تصاویر اثر انگشت می‌باشد. نتیجه این شده است که کویفلت مرتبه‌ی ۴ (coif4) با پنج سطح تجزیه بهترین انتخاب در این زمینه است. معیارهای مورد استفاده در این کار، همان

(ب) قطاع‌بندی ناحیه‌ی مطلوب نسبت به نقطه‌ی مرجع، (ج) فیلترکردن ناحیه‌ی مطلوب در هشت جهت مختلف (از هشت جهت برای تعیین ویژگی‌های محلی شیاریا و از چهار جهت برای محاسبه‌ی ویژگی‌های سرتاسری استفاده می‌شود)، (د) برای هر قطاع در تصاویر فیلتر شده به کمک معیار متوسط قدرمطلق انحراف معیار، بردار کد انگشت محاسبه می‌شود.

روش مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها

در روش مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها [۱۱] از هر تصویر اثر انگشت تعدادی ویژگی مبتنی بر ریزنقش‌ها محاسبه و استخراج می‌شود. حال برای هر دو تصویر اثر انگشت ورودی، میزان شباهت بین بردارهای ویژگی آن‌ها محاسبه و پس از مقایسه با یک آستانه، شباهت یا عدم شباهت دو تصویر اثر انگشت اعلام می‌شود. مقدار این آستانه برای پایگاه تصاویر مورد بررسی در کار مقاله‌ی حاضر، به صورت تجربی و به گونه‌ای به دست آمده است که منجر به حداکثر تعداد اعلام شباهت‌ها بین تصاویر اثر انگشت مربوط به یک شخص و حداکثر تعداد اعلام عدم شباهت‌ها بین تصاویر مربوط به دو شخص مختلف شود.

روش بررسی شده در [۱۱]، شامل دو بلوک استخراج ریزنقش‌ها و انطباق مبتنی بر ریزنقش است.

۷ برای استخراج ریزنقش‌ها سه مرحله اعمال می‌شود: پیش پردازش، استخراج ریزنقش‌ها، و پس‌پردازش. (۱) مرحله اول شامل بهبود تصویر، دودویی‌سازی، و قطعه‌بندی تصویر است. برای بهبود تصویر از دو روش تعدیل هیستوگرام و تبدیل فوریه استفاده می‌شود. برای دودویی‌سازی از روش آستانه‌ی محلی وفقی [۱۸] استفاده شده است. برای قطعه‌بندی تصویر از یک روش سه مرحله‌ای شامل مراحل (الف) تخمین جهت بلوک، (ب) قطعه‌بندی مبتنی بر شدت جهت [۱۹]، و (ج) استخراج نواحی مطلوب مبتنی بر عملیات مورفولوژی استفاده شده است.

(۲) مرحله دوم شامل نازک‌سازی و علامت زدن ریزنقش‌ها است. (۳) مرحله‌ی سوم شامل حذف ریزنقش‌های اشتباه مبتنی بر مراجع [۲۰، ۱۸] است.

۷ برای انجام انطباق مبتنی بر ریزنقش‌ها، ابتدا هر دو ریزنقش دلخواه به عنوان یک جفت-ریزنقش مرجع در نظر گرفته شده و انطباق آن‌ها مبتنی بر همبستگی شیاریایشان محاسبه می‌شود. اگر این شیاریا به خوبی تطبیق یابند [۲۰]، دو تصویر نسبت به آن‌ها هم‌تراز شده و عمل انطباق برای مابقی ریزنقش‌ها ادامه می‌یابد.

۲-۳ روش‌های فشرده‌سازی تصاویر اثر انگشت

روش‌های فشرده‌سازی تصاویر اثر انگشت به دو دسته تقسیم می‌شوند: در دسته‌ی اول، از تصویر اثر انگشت، تنها اطلاعات مهم و مورد استفاده در بازشناسی، مانند شیاریا استخراج و سپس

فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت استفاده شده است. برای تبدیل موجک از موجکهای دوتعامدی با پاسخ فاز خطی استفاده شده است. این نوع موجکها عملکرد بهتری نسبت به دیگر موجکها در کاربرد فشرده‌سازی دارند. در [۳۷] برای فشرده‌سازی از لبه‌یابی استفاده شده است. در [۳۸] مولفان برای فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت به کمک تبدیل بسته‌ی موجک، فیلترهای مختلفی را بررسی و مقایسه کرده و به این نتیجه رسیده‌اند که فیلتر بانک **Coif5** بهترین عملکرد را در تولید تعداد ضرایب صفر داشته است.

هیچکدام از روش‌هایی که تاکنون برای فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت بررسی شدند، از تکنیک‌های پردازشی به منظور افزایش کارایی فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت مبتنی بر **SPIHT** استفاده نکرده‌اند. روش‌هایی که در ادامه بررسی می‌شوند، روش‌هایی هستند که تاحدی اثر فشرده‌سازی را روی بازشناسی بررسی کرده‌اند. این روش‌ها به استثنای [۹] هیچکدام از ویژگیهای منحصر به تصاویر اثرانگشت در جهت افزایش کارایی فشرده‌سازی یا بازشناسی استفاده‌ای نکرده‌اند. آنها همچنین از بهسازی تصویر استفاده‌ای نکرده‌اند.

در [۳۹] که یک روش خاص و بسیار محدود برای فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت است، از تبدیل موجک و کدگذاری مولفه اساسی برای فشرده‌سازی استفاده کرده و در آن، بخشهایی از تصویر ثانویه که شامل ریزنقش‌ها باشند، نگه داشته می‌شوند. در [۳۹] و [۴۰] تنها از معیار دقت بازشناسی برای ارزیابی کارایی بازشناسی استفاده شده است. در [۴۰] کارایی فشرده‌سازی و بازشناسی روشهای **WSQ**، **JPEG2000** و **CAWDR** با یکدیگر مقایسه شده است. در [۳] اثر سه روش فشرده‌سازی **JPEG**، **JPEG2000** و **SPIHT** روی کارایی بازشناسی تصاویر فشرده‌شده‌ی اثرانگشت بررسی شده است. در این کار، روشهای بازشناسی اثرانگشت که استفاده شده‌اند، شامل موارد زیر است:

(الف) **VeriFinger**: یک محصول تجاری است که مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها بدون در نظر گرفتن نقاط دلتا و هسته می‌باشد.

(ب) **eFinger**: یک پروژه دانشجویی است که مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها می‌باشد. در این کار، از مراحل متداول بهسازی و استخراج شیارها، دودویی‌سازی، نازک‌سازی، استخراج ریزنقش‌ها، و انطباق استفاده می‌شود.

(ج) **FiRS**: یک محصول تجاری در محیط **MATLAB** است که از فیلترهای گابور استفاده کرده و تصاویر اثرانگشت را به صورت فشرده‌ای به نام کد انگشت نمایش می‌دهد.

یکی از نتایج گرفته شده در [۳] این است که **JPEG** در مقادیر کم میزان فشرده‌سازی خوب عمل می‌کند اما عملکرد آن، در مقایسه با **JPEG2000**، در مقادیر زیاد میزان فشرده‌سازی به سرعت اُفت می‌کند. یکی دیگر از نتایج این است که معیار **PSNR** در حالت کلی نمی‌تواند معیاری از وضعیت امتیاز انطباق

تعداد صفرها و انرژی باقی‌مانده است. در [۲] مقایسه‌ای بین **JPEG** و کدگذاری **SPIHT** مبتنی بر تبدیل موجک انجام شده است. نتایج مقایسه نشان می‌دهد که برطبق معیارهای **PSNR** و متوسط مجذور خطا (MSE^7)، کدگذار **SPIHT** نتایج بهتری دارد.

در [۲۶] از تبدیل بسته‌ی موجک برای فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت استفاده کرده است. برای ارزیابی کارایی فشرده‌سازی از معیارهای انرژی باقی‌مانده و تعداد ضرایب صفر در خروجی تبدیل استفاده شده است. در [۲۷] از تبدیل کانتورلت استفاده شده است که مبتنی بر تبدیل موجک و فیلتربانک‌های جهتی بوده و برای مدل کردن رفتارهای نوسانی مناسب است. در [۲۸] از تبدیل کانتورلت و چندی‌سازی برداری چندمرحله‌ای استفاده شده و ادعا شده است که عملکرد تبدیل کانتورلت در فشرده‌سازی و بازسازی تصاویر اثرانگشت، بهتر از تبدیل موجک است.

در [۲۹] از بسته‌ی موجک و چندی‌سازی برداری حصیری برای فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت استفاده شده است. در این کار، توزیع ضرایب موجک به کمک توزیع گوسی تعمیم یافته مدل شده است. در [۳۰] کارایی **WSQ** و **JPEG** در فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت بررسی و مقایسه شده است. در این مقایسه، از دو معیار **PSNR** و میزان فشرده‌سازی استفاده شده است. در روش **WSQ** که توسط **FBI** استاندارد شده است، از تبدیل موجک و کدگذاری هافمن وقفی استفاده می‌شود. در روش **JPEG** شبیه‌سازی شده در این مقاله، ابتدا جدول کوانتیزاسیون به کمک الگوریتم گرییدی اصلاح شده برای تصاویر اثرانگشت طراحی و تنظیم شده است. در نتایج شبیه‌سازی، برتری روش مبتنی بر موجک نسبت به **JPEG** اصلاح شده مشخص شده است.

یکی از جدیدترین استانداردها برای فشرده‌سازی داده‌های مربوط به مشخصه‌های حیاتی، **ISO/IEC 19794** بخشهای ۴ و ۵ آن است. در این بخشها از استاندارد مزبور که مربوط به تصاویر اثرانگشت و صورت می‌شوند، قالبهای **WSQ**، **JPEG**، [۳۱]، و **JPEG2000** مورد تایید قرار گرفته و تاکید بیشتر روی **JPEG2000** است. این سه قالب از تبدیلهای به ترتیب **DCT**، بسته‌ی موجک، و موجک استفاده می‌کنند. در بخش ۱ از استاندارد **JPEG2000** نیز فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت در نظر گرفته شده است [۳۲]. روش **WSQ** نسبت به **JPEG** عملکرد بسیار بهتری از نظر معیارهای روان‌بصری و **PSNR** دارد [۳۳].

روشهای بسیار زیادی مبتنی بر تبدیل موجک برای فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت ارائه شده‌اند که یکی از مواد مهم مورد نظر آنها، انتخاب بهترین فیلتر موجک است. از روشهایی مانند گداختن شبیه‌سازی شده [۳۴] و الگوریتم ژنتیک [۳۵] برای انجام این انتخاب استفاده شده است. در [۳۶] از تبدیل موجک و کدگذار درخت صفرهای جاسازی شده‌ی موجک (EZW^8) برای

⁷ Mean Square Error

⁸ Embedded Zerotrees of Wavelet

حاضر، برخلاف روش مبتنی بر تبدیل اتم موج‌گونه [۹]، از معیار «منحنی متوسط PSNR» استفاده شده است.

(۲) در ارزیابی‌های انجام شده در این مقاله نیز اذعان شده که روش SPIHT کارایی بیشتری نسبت به JPEG2000 و WSQ دارد؛ نتیجه‌ای که در کار مقاله‌ی حاضر نیز تأیید شده است.

(۳) گرچه روش مبتنی بر اتم موج‌گونه کارایی فشرده‌سازی بیشتری نسبت به SPIHT پایه (یعنی استفاده‌ی تنها از تبدیل موجک و کدگذاری SPIHT) دارد اما کارایی بازشناسی روش مبتنی بر اتم موج‌گونه در نرخ بیت‌های کمتر از نقطه‌ی شکست معادل با روش SPIHT پایه است. تنها مزیت روش مبتنی بر اتم موج‌گونه نسبت به SPIHT پایه داشتن نقطه‌ی شکست پایین‌تر است. روش پیشنهادی در این مقاله، به کمک استفاده از تکنیک کاهش محدوده‌ی دینامیکی تصویر، توانسته است نقطه‌ی شکست روش SPIHT پایه را کاهش داده و به کارایی بیشتری حتی نسبت به روش اتم موج‌گونه برسد.

(۴) روش پیشنهادی در این مقاله به کمک تکنیک کاهش محدوده‌ی دینامیکی تصویر توانسته کارایی فشرده‌سازی کدگذاری SPIHT را، بدون افت کارایی بازشناسی، افزایش دهد.

روش پیشنهادی در [۱۰] مبتنی بر توصیف یا نمایش تصویر اثر انگشت به صورت یک ترکیب خطی $\sum_{i=1}^n c_i \mathbf{t}_i$ از نمونه‌های متعلق به یک کتابخانه‌ی فراکامل^{۱۳} شامل الگوهای مختلف موجود در بخشهای مختلف یک نمونه تصویر اثر انگشت، و سپس کوانتیزاسیون و کدگذاری این نمایش می‌باشد. نکات قابل طرح در این روش عبارتند از:

(۱) این روش، کارایی خود را با روش‌های JPEG، JPEG2000 و WSQ مقایسه کرده است. ارزیابی‌ها در نرخ بیت‌های پایین انجام نشده است بلکه نرخ بیت‌های متوسط به بالا بررسی شده‌اند.

(۲) این روش، روش SPIHT را در ارزیابی کارایی فشرده‌سازی و بازشناسی بررسی نکرده است.

(۳) کارایی فشرده‌سازی نسبت به روش JPEG2000 و بر طبق معیار «منحنی متوسط PSNR» در بهترین حالت، 1 dB افزایش داشته است.

(۴) نتیجه‌ی غیرقابل انتظاری که از کار این مقاله اعلام شده این است که کارایی بازشناسی روش JPEG در نرخ بیت‌های متوسط، تا حد قابل توجهی بالاتر از کارایی بازشناسی روش‌های فشرده‌سازی JPEG2000 و WSQ و حتی روش پیشنهادی این مقاله گزارش شده است. این امر برخلاف نتایج به دست آمده در کار دیگران [۲، ۳۰، ۳۱، ۳۳] است.

باشد؛ یعنی لزوماً با زیاد/کم شدن PSNR، امتیاز انطباق بیشتر/کمتر نمی‌شود.

برخی نقاط ضعف این کار به شرح زیر است:

(۱) این روش در کار ارزیابی خود، تنها از شش تصویر اثر انگشت استفاده کرده است که تعداد بسیار کمی است.

(۲) برخی روش‌های بازشناسی مورد استفاده در این کار، چندان معتبر نبوده و یا از منابع معتبر پیاده‌سازی نشده‌اند.

(۳) در این روش، تنها تصویر ثانویه فشرده‌سازی شده و تصاویر اولیه بدون فشرده‌سازی، در سیستم ذخیره می‌شوند. تصویر ثانویه با نرخ بیت‌های مختلف فشرده شده و تأثیر هر بار فشرده‌سازی روی عملکرد بازشناسی بررسی می‌شود.

(۴) روش درست‌تر تحلیل این است که تعدادی فرد در نظر گرفته شده و برای هر فرد تعدادی تصویر در نظر گرفته شود. حال بین تصاویر متعلق به هر فرد و نیز بین تصاویر مختلف متعلق به دو فرد متفاوت عمل انطباق انجام و نتایج بررسی شود.

(۵) در استفاده از ابزارهای بازشناسی، به طور یکسان عمل نشده است؛ برای مثال، برای ارزیابی فشرده‌سازی JPEG از VeriFinger و برای ارزیابی فشرده‌سازی JPEG2000 از eFinger استفاده شده است.

(۷) هیچ تحلیل خاصی روی توصیف نتایج و ویژگی‌های منحنی بازشناسی برحسب نرخ بیت انجام نشده است.

(۸) اثر فشرده‌سازی روی معیارهای کمی بازشناسی مانند منحنی بده-بستان خطای آشکارسازی (DET) بررسی نشده است.

در [۹] روشی مبتنی بر تبدیل اتم موج‌گونه^۹ برای فشرده‌سازی تصاویر اثر انگشت پیشنهاد شده است. این روش، طبق دانسته‌ی مولف تنها روشی است که از ویژگی موج‌گونه‌ی تصاویر اثر انگشت استفاده کرده است. برای کدگذاری ضرایب تبدیل از کوانتیزاسیون وفقی اسکالر یکنواخت^{۱۱} در ترکیب با کدگذاری دوره تداوم^{۱۱} و هافمن استفاده شده است. عمل کدگذاری برای هر زیرباند جداگانه انجام می‌شود. منظور از کوانتیزاسیون وفقی اسکالر یکنواخت این است که اندازه‌ی گام‌های کوانتیزاسیون در هر زیرباند متناسب معکوس با لگاریتم واریانس اندازه‌های ضرایب در آن زیرباند می‌باشد. کارایی فشرده‌سازی و بازشناسی این روش با سه روش JPEG2000 پایه (بخش ۱)، WSQ، و SPIHT مقایسه شده است. برای ارزیابی کارایی فشرده‌سازی از معیار PSNR و برای ارزیابی کارایی بازشناسی از منحنی دقت بازشناسی برحسب میزان فشرده‌سازی استفاده شده است.

نکات قابل توجه در این روش عبارتند از:

(۱) استفاده از معیار «منحنی متوسط PSNR» اعتبار بیشتری نسبت به «PSNR» دارد زیرا اولی روی تصاویر بیشتری اجرا شده و نتایج معتبرتری در پی خواهد داشت. در کار مقاله‌ی

⁹ Wave Atom Transform¹⁰ Adaptive uniform scalar quantization¹¹ Run Length Encoding (RLE)¹² Sparse Linear Combination¹³ Overcomplete

۳- روش پیشنهادی

دیاگرام بلوکی روش پیشنهادی برای فشرده‌سازی و بازسازی تصاویر اثرانگشت به ترتیب در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب نشان داده شده است. در مسیر فشرده‌سازی، مطابق با دیاگرام بلوکی شکل ۲-الف، ابتدا محدوده‌ی تغییرات شدت روشنایی تصویر ورودی به اندازه‌ی 2^N برابر کاهش و سپس از تبدیل موجک (به کمک موجک دو تعامدی (bior4.4) به منظور تجزیه‌ی تصویر استفاده می‌شود. حال از کدگذار SPIHT برای تولید دنباله‌ی بی‌تی خروجی استفاده می‌شود.



شکل ۲: دیاگرام بلوکی روش پیشنهادی برای (الف) فشرده‌سازی و (ب) بازسازی تصاویر اثر انگشت.

در مسیر بازسازی تصویر فشرده شده، مطابق با دیاگرام بلوکی شکل ۲-ب، ابتدا از کدگشای SPIHT و تبدیل موجک به منظور بازسازی تصویر اولیه استفاده می‌شود. حال برای تولید تصویر نهایی، از تکنیک پیشنهادی بهسازی تصویر استفاده می‌شود. مهمترین بلوک‌های موجود در دیاگرام بلوکی شکل ۲، که مهمترین نوآوری‌های مقاله‌ی حاضر نیز محسوب می‌شوند، شامل کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر و بهسازی تصویر می‌باشد که در ادامه، هر یک از این بلوک‌ها در یک بخش جداگانه توضیح داده می‌شوند. تکنیک کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر موجب افزایش کارایی فشرده‌سازی و کاهش نقطه‌ی شکست منحنی بازشناسی شده و تکنیک بهسازی نیز موجب بهبود کارایی بازشناسی (از طریق افزایش دقت بازشناسی در نقاط بالاتر از نقطه‌ی شکست منحنی بازشناسی و نیز کاهش اُفت منحنی بازشناسی در نقاط پایین‌تر از نقطه‌ی شکست) می‌شود.

۳-۱ تکنیک پیشنهادی کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر

برای تغییر محدوده تغییرات تصویر، مقادیر پیکسلها را بر ضریب مقیاس، 2^N تقسیم می‌کنیم؛ این کار معادل با شیفت مقادیر پیکسلهای تصویر به اندازه‌ی N بیت به راست می‌باشد.

یکی از ویژگی‌های کدگذار SPIHT این است که این کدگذار کار خود را صفحه-بیت به صفحه-بیت انجام می‌دهد. در هر صفحه بیت، الگوریتم SPIHT سه مرحله به نامهای مرتب‌سازی، اصلاح، و به‌روزرسانی را تکرار کرده و دنباله‌ای از نمادها مربوط به فرآیند تصمیم‌گیری را تولید می‌کند. این دنباله‌ی نمادها در انتهای کار به کمک کدگذار حسابی به دنباله‌ی بی‌تی خروجی تبدیل می‌شود. ملاحظه می‌شود که اگر بتوانیم تعداد صفحه بیت‌ها را کاهش دهیم، تعداد کل بیت‌های تولید شده و در نتیجه طول دنباله‌ی بی‌تی خروجی کم شده و بنابراین، کارایی فشرده‌سازی افزایش می‌یابد. از طرفی، تعداد صفحه بیت‌ها برابر با تعداد بیت‌های باارزش بزرگترین ضریب تبدیل موجک است؛ بنابراین، با کاهش تعداد بیت‌های موجود در بزرگترین ضریب تبدیل موجک می‌توان تعداد صفحه بیت‌ها را کاهش داد. حال با توجه به این که تکنیک پیشنهادی کاهش محدوده‌ی دینامیکی تصویر، موجب کاهش اندازه‌ی ضرایب تبدیل موجک نیز می‌شود، نقش موثر این تکنیک در کاهش تعداد صفحه بیت‌ها و در نتیجه افزایش کارایی فشرده‌سازی روش پیشنهادی مشخص می‌شود.

برای توضیح دومین مزیت تکنیک کاهش محدوده‌ی دینامیکی تصویر، به این مطلب توجه می‌کنیم که کدگذار SPIHT در پایان فرآیند جستجو و تصمیم‌گیری، دنباله‌ای از نمادها مربوط به فرآیند تصمیم‌گیری تولید کرده و سپس این دنباله را به کمک کدگذار حسابی به دنباله‌ای از بیت‌ها تبدیل می‌کند. کدگذار حسابی یک کدگذار آنتروپی بوده و متوسط تعداد بیت‌هایی که برای هر نماد تولید می‌کند (\bar{L})، به آنتروپی مجموعه‌ی نمادها (H) بستگی دارد:

$$\bar{L} > H \quad (1)$$

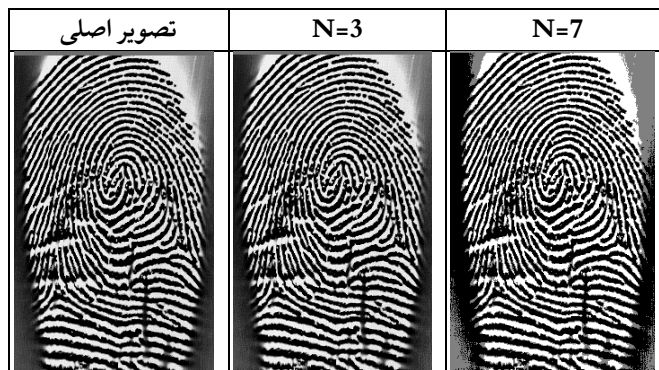
تکنیک کاهش محدوده‌ی دینامیکی تصویر موجب کاهش آنتروپی تصویر و البته، آنتروپی ضرایب تبدیل موجک شده و بنابراین، با توجه به رابطه‌ی (۱)، موجب افزایش کارایی کدگذار حسابی و در نتیجه، افزایش کارایی کدگذاری SPIHT خواهد شد.

سومین مزیت تکنیک پیشنهادی کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر، حفظ نسبی کیفیت تصویر می‌باشد. در کار مقاله‌ی حاضر، بررسی کیفیت تصویر از این جهت مهم است که کارایی بازشناسی تصاویر اثرانگشت تا حد بسیار زیادی به کیفیت این تصاویر وابسته است. در شکل ۳ یک نمونه تصویر اثرانگشت به همراه دو خروجی مختلف متناظر با اعمال تکنیک کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر متناظر با دو مقدار $N=3$ و $N=7$ نمایش داده شده است. ملاحظه می‌شود که اگر ضریب مقیاس، 2^N ، چندان بزرگ انتخاب نشود، تاثیر چندانی روی کیفیت کلی تصویر ندارد.

تصویر اثر انگشت دارد. در ردیف بالایی شکل ۴، نتیجه‌ی فشرده‌سازی نمونه تصویر اصلی نشان داده شده در شکل ۳ به کمک تبدیل موجک و کدگذار SPIHT در دو نرخ بیت پایین نمایش داده شده است. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که اثر نشتی تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی کیفیت شیاریهای تصویر اثر انگشت دارد.

با توجه به اهمیت کیفیت تصویر اثر انگشت در کاربردهای بازشناسی، در روش فشرده‌سازی پیشنهادی این مقاله، از یک روش ساده‌ی بهسازی تصویر به منظور افزایش کیفیت تصویر باسازی شده استفاده می‌شود. این روش مبتنی بر تنظیم تصویر از طریق تبدیل پروفایل شدت روشنایی تصویر [۱۳-۱۲] و سپس، تیزسازی تصویر مبتنی بر **unsharp mask** [۱۴، ۱۲] می‌باشد.

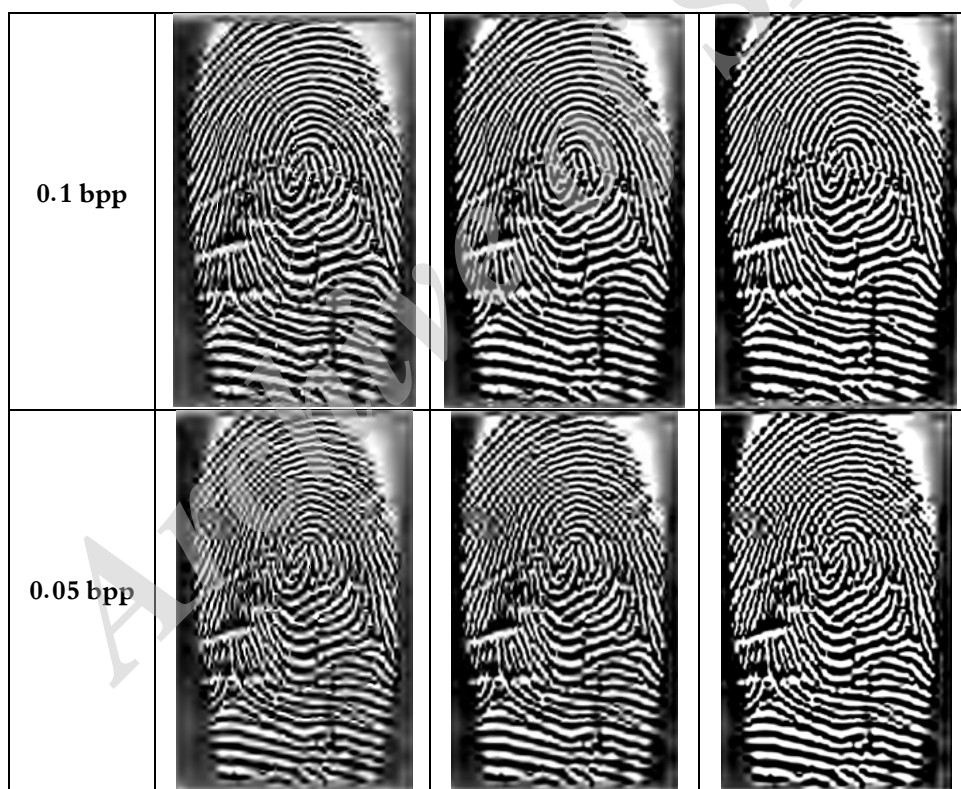
حاصل تنظیم و تیزسازی هریک از تصاویر نشان داده شده در ردیف بالا از شکل ۴ به ترتیب در ردیفهای وسط و پایین این شکل نشان داده شده است. این شکل‌ها بیانگر تاثیر قابل توجه انجام بهسازی در افزایش کیفیت تصاویر فشرده شده می‌باشند.



شکل ۳: اعمال تکنیک پیشنهادی کاهش محدوده‌ی تغییرات روی یک نمونه تصویر اثر انگشت [۴۱] با چند مقدار مختلف N (برای شیفیت مقادیر شدت روشنایی تصویر به راست).

۳-۲ تکنیک پیشنهادی بهسازی تصویر

در روش‌های فشرده‌سازی مبتنی بر تبدیل موجک، در نرخ بیت‌های پایین، معمولاً اثر نشتی مشاهده می‌شود. اثر نشتی عمدتاً در اطراف لبه‌ها رخ داده و موجب نشت انرژی لبه‌ها به نواحی اطراف می‌شود. اثر نشتی تاثیر قابل توجهی روی کیفیت



شکل ۴: (ستون اول از چپ) نتیجه‌ی فشرده‌سازی نمونه تصویر اصلی شکل ۳ در دو نرخ بیت نسبتاً پایین به کمک تبدیل موجک و کدگذاری SPIHT، (ستون وسط) نتیجه‌ی تنظیم شدت روشنایی تصاویر ردیف بالا، (ستون اول از راست) نتیجه‌ی تیزسازی تصاویر ردیف وسط.

حالت مختلف بررسی خواهیم کرد. این بررسی جزو نوآوریهای مقاله‌ی حاضر محسوب می‌شود. این حالتها عبارتند از:
حالت اول: تصاویر اصلی اثر انگشت به الگوریتم بازشناسی داده می‌شوند. این حالت، در حقیقت یک حالت پایه‌ای و مرجع بوده و جهت مقایسه و ارزیابی حالت‌های دیگر استفاده می‌شود.

۳-۳ محلهای بررسی شده برای بلوک بهسازی

گرچه جایگاه بهسازی تصویر در دیاگرام بلوکی روش پیشنهادی، شکل ۲، مشخص شده است اما به منظور تعیین نقش و بهترین جایگاه استفاده از بهسازی تصویر و همچنین تایید طرح پیشنهاد شده در شکل ۲، کارایی بازشناسی را در بخش ۴، در چندین

۴- نتایج شبیه سازی

۴-۱ معرفی پایگاه داده

پایگاه تصاویر مورد استفاده شامل تصاویر اثر انگشت مربوط به ۳۰ شخص مختلف است که از هر شخص، ۱۰ تصویر اثر انگشت در پایگاه تصاویر به منظور آزمایش و ۳ تصویر به منظور آموزش موجود است. تصاویری که در کار این مقاله تهیه و استفاده کرده‌ایم، دارای کیفیت مناسب و درجه‌ی تفکیک 500 dpi می‌باشند.

۴-۲ مقادیر عددی پارامترهای روش پیشنهادی

✓ ضریب مقیاس در تکنیک کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر: این ضریب برابر ۸ انتخاب شده است. به عبارت دیگر، مقادیر شدت روشنایی تصویر اثر انگشت به اندازه‌ی $N=3$ بیت به راست شیفت داده می‌شوند.

✓ پارامترهای تنظیم تصویر: با توجه روش تنظیم تصویر استفاده شده در [۱۳]، محدوده‌ی ورودی برابر با (0.15, 0.85) و محدوده‌ی خروجی برابر با (0, 1) در نظر گرفته شده است.

✓ پارامترهای تیزسازی تصویر: با توجه به روش تیزسازی استفاده شده در [۱۴]، اندازه‌ی شعاع برابر ۲ و میزان تیزسازی نیز برابر با ۲ انتخاب شده است.

✓ تابع موجک مادر: برای محاسبه تبدیل موجک از فیلترهای متناظر با موجک دو تعامدی bior 4.4 استفاده شده است.

۴-۳ نتایج مربوط به حالت‌های شش‌گانه

در حالت استفاده از روش بازشناسی مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها [۱۱]، منحنی مربوط به دقت بازشناسی بر حسب نرخ بی‌بی که فشردگی در آن نرخ انجام شده است، در شکل ۵ نشان داده شده است. در این شکل، شش منحنی نشان داده شده است که مربوط به هر یک از شش حالت مورد بررسی در کار این مقاله می‌باشند. به منظور مقایسه‌ی بهتر، این شش منحنی روی هم نمایش داده شده‌اند؛ حتی دو حالت اول (حالت سطح خاکستری) و دوم (سطح خاکستری بهسازی شده) نیز که در آن‌ها از فشردگی استفاده‌ای نشده است و طبیعتاً برای آنها نیازی به نمایش بر حسب نرخ بیت نمی‌باشد، در کنار بقیه‌ی حالت‌ها نمایش داده شده‌اند تا عمل مقایسه بهتر انجام شود. یادآوری می‌شود که برای فشردگی از روش پیشنهادی که دیاگرام بلوکی آن در شکل ۲ نمایش داده شده، بدون در نظر گرفتن بلوک مربوط به تکنیک کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر، استفاده کرده‌ایم.

در حالت استفاده از روش بازشناسی مبتنی بر شبکه‌ی عصبی [۱۵]، منحنی مربوط به دقت بازشناسی بر حسب نرخ بی‌بی که فشردگی در آن نرخ انجام شده است، در شکل ۶ نشان داده شده است. در حالت استفاده از روش بازشناسی مبتنی بر بانک

حالت دوم: ابتدا تصاویر اصلی را به کمک روش پیشنهادی در بخش ۲-۳، بهسازی نموده و نتایج را به الگوریتم بازشناسی اثر انگشت می‌دهیم. این حالت جهت بررسی اثر بهسازی تصویر روی کارایی بازشناسی تصاویر اثر انگشت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در حالت‌های اول و دوم از فشردگی تصویر استفاده نمی‌شود. در بقیه‌ی حالت‌ها، برای انجام فشردگی، از تبدیل موجک و سپس، کدگذاری SPIHT در چند نرخ بیت مختلف استفاده می‌شود. ملاحظه می‌شود که در این آزمایش‌ها برای فشردگی از کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر استفاده نکرده‌ایم. اثر این تکنیک را جداگانه در بخش ۴ بررسی خواهیم کرد.

حالت سوم: در این حالت تصاویر سطح خاکستری اصلی را مستقیماً در نرخ بیت‌های مختلف فشردگی نموده و پس از باسازی، نتایج را به الگوریتم بازشناسی اثر انگشت می‌دهیم. در این حالت، تاثیر فشردگی روی عملکرد بازشناسی، به طور مستقیم و تنها (بدون اعمال بهسازی) بررسی می‌شود.

حالت چهارم: در این حالت، تصاویر را پس از فشردگی با نرخ بیت‌های مختلف و سپس باسازی، به کمک روش پیشنهادی در بخش ۲-۳ بهسازی نموده و نتیجه را به الگوریتم بازشناسی اثر انگشت می‌دهیم.

حالت پنجم: ابتدا تصاویر اصلی به کمک روش پیشنهادی در بخش ۲-۳ بهسازی شده و سپس در نرخ بیت‌های مختلف فشردگی می‌شوند. نتیجه پس از باسازی (در واحد کدگشا)، به الگوریتم بازشناسی اثر انگشت داده می‌شود.

حالت ششم: در این حالت، ابتدا قبل و بعد از فشردگی، به کمک روش پیشنهادی در بخش ۲-۳، از بهسازی تصویر استفاده می‌شود. سپس، نتیجه به الگوریتم بازشناسی اثر انگشت داده می‌شود.

هریک از حالت‌های شش‌گانه‌ی فوق را با استفاده از سه روش بازشناسی بررسی و نتایج را مقایسه می‌کنیم: (۱) مبتنی بر استخراج ریزنقش [۱۱]، (۲) مبتنی بر شبکه عصبی [۱۵]، و (۳) مبتنی بر فیلتر بانک گابور [۱۶، ۱۷].

همان طور که در بخش بعد ملاحظه خواهد شد، برای هر روش بازشناسی و هر حالت از حالت‌های شش‌گانه، یک منحنی دقت بازشناسی بر حسب نرخ بی‌بی که در آن فشردگی انجام شده است، محاسبه می‌شود؛ از روی این منحنی، دو پارامتر، یکی نقطه‌ی شکست (بر حسب بیت بر پیکسل) و دیگری شیب اُفت کارایی دقت بازشناسی در نقاط کمتر از نقطه‌ی شکست (بر حسب درصد کاهش دقت بازشناسی به ازای کاهش ۱ بیت بر پیکسل) محاسبه خواهد شد. در این مقاله، این پارامترها به عنوان معیارهایی جهت ارزیابی روش‌های مختلف بازشناسی اثر انگشت (با فرض معلوم بودن روش فشردگی)، پیشنهاد می‌شوند.

مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها تاثیر قابل توجهی در کاهش شیب اُفت دقت بازشناسی داشته است؛ ثانیاً دو روش مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها (در حالت استفاده از بهسازی) و روش مبتنی بر فیلتربانک گابور، به ترتیب، مقاوم‌ترین روش‌ها نسبت به کاهش نرخ بیت (در نقاط کمتر از نقطه‌ی شکست) بوده و در نتیجه از این نظر، بهترین وضعیت را داشته‌اند.

طبیعتاً از بین دو روش بازشناسی مفروض، آن روشی که ویژگی‌های زیر را نسبت به این دو پارامتر داشته باشد، بهتر قلمداد می‌شود:

(الف) دقت بازشناسی بیشتری در نقاط بالاتر از

نقطه‌ی شکست داشته باشد،

(ب) نقطه‌ی شکست پایین‌تری داشته باشد،

(ج) شیب اُفت دقت بازشناسی در نقاط کمتر از نقطه‌ی

شکست، کمتر باشد.

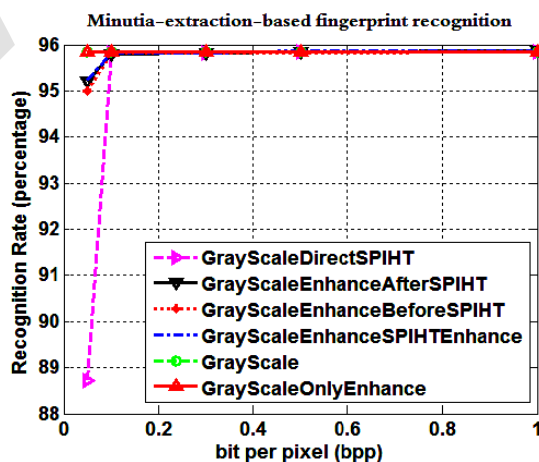
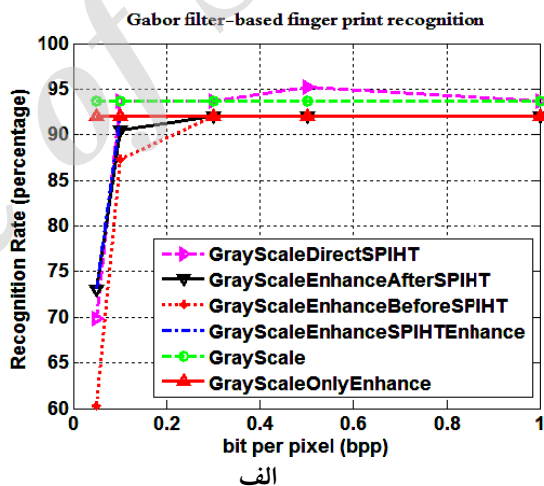
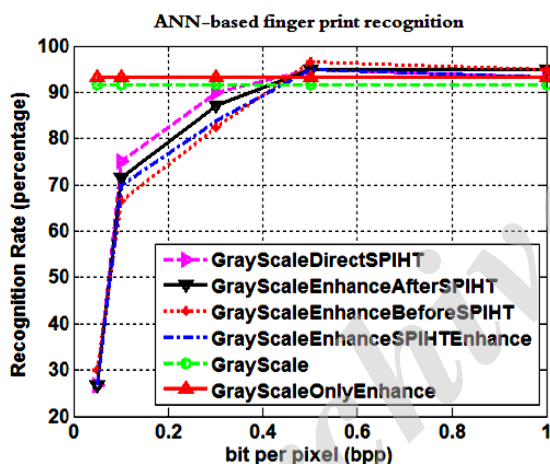
با توجه به نتایجی که در این بند بیان شد، از نقطه نظر معیارهای نقطه‌ی شکست و شیب اُفت دقت بازشناسی، روش مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها (در حالت استفاده از بهسازی) بهترین عملکرد را نسبت به دو روش دیگر از خود نشان داده است.

فیلتر گابور [۱۶، ۱۷]، منحنی مربوط به دقت بازشناسی بر حسب نرخ بیتی که فشرده‌سازی در آن نرخ انجام شده است، در شکل ۷ نشان داده شده است.

با توجه به منحنی‌های نمایش داده شده در شکل‌های ۵ تا ۷ می‌توان به نتایج زیر رسید:

(۱) هر روش بازشناسی یک نقطه‌ی شکست و شیب اُفت دقت مخصوص به خود دارد. این نقاط شکست، با توجه به منحنی‌های فوق، **0.1 bpp** برای روش مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها، **0.5 bpp** برای روش مبتنی بر شبکه‌ی عصبی، و **0.3 bpp** برای روش مبتنی بر فیلتربانک گابور می‌باشند. بنابراین، از نقطه نظر معیار نقطه‌ی شکست، روش مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها وضعیت بهتری نسبت به دو روش دیگر دارد.

همچنین از نظر شیب اُفت، تندترین شیب اُفت دقت (به طور تقریبی) برای روش مبتنی بر شبکه‌ی عصبی در حدود ۵۷٪، برای روش فیلتربانک گابور در حدود ۲۵٪، و برای روش مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها در حدود ۱۴۰٪ (در حالت بدون استفاده از بهسازی) و ۲۰٪ (در حالت استفاده از بهسازی) می‌باشد. ملاحظه می‌شود که اولاً انجام بهسازی در مورد روش



شکل ۵: منحنی‌های دقت بازشناسی بر حسب نرخ بیتی که در آن فشرده‌سازی انجام شده است، برای هر یک از شش حالتی که در کار این مقاله بررسی می‌شوند و در حالت استفاده از (الف) روش بازشناسی مبتنی بر فیلتربانک گابور [۱۶، ۱۷]، (ب) روش بازشناسی مبتنی بر شبکه‌ی عصبی [۱۵]، (ج) روش بازشناسی مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها [۱۱].

(تصاویر سطح خاکستری) وجود داشته باشند که نتیجه‌ی بازشناسی آنها منفی باشد (یعنی جزو دسته‌ی خود شناسایی نشوند)، اما همین تصاویر پس از فشرده‌سازی، نتیجه‌ای مثبت برای بازشناسی از خود نشان دهند؛ بنابراین، می‌توان گفت که فشرده‌سازی، برخی عناصر متعلق به یک گروه (یا کلاس) را به هم نزدیک‌تر و برخی عناصر متعلق به گروه‌ها (یا کلاسها)ی مختلف را از هم دورتر کرده و به این ترتیب کارایی بازشناسی این عناصر را بهبود داده است.

(۷) یکی دیگر از نتایج این است که در یک دسته‌ی خاص، لزوماً دقت بازشناسی با افزایش نرخ بیت، بهتر نمی‌شود یا در مقدار قبلی خود باقی نمی‌ماند. برای مثال، در روش بازشناسی مبتنی بر فیلتر بانک گابور، دقت بازشناسی از 0.5 bpp به 1 bpp افت پیدا می‌کند!

۴-۴ اثر تکنیک کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر

برای بررسی اثر تکنیک پیشنهادی در این مقاله مبتنی بر کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر، می‌توانیم در هر یک از حالت‌هایی که در بخش ۴-۳ بررسی شدند، برای انجام فشرده‌سازی از دیاگرام بلوکی شکل ۲ به طور کامل (یعنی در نظر گرفتن تکنیک کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر) استفاده کرده و منحنی‌های متناظر با قبل را در این حالت جدید به دست آوریم. با انجام این کار معلوم گردید که منحنی‌های جدید تقریباً همان شکل منحنی‌های متناظر خود در قبل را داشته اما یک جابجایی افقی به چپ نیز داشته‌اند. مقدار این جابجایی حدود 0.05 بیت بر پیکسل و تقریباً مستقل از روش بازشناسی مورد استفاده بود. منحنی مربوط به روش بازشناسی مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها که بهترین کارایی را در بین سه روش بازشناسی مورد بررسی داشته است، در شکل ۹ نمایش داده شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که تکنیک کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر موجب حفظ نسبی کیفیت تصویر (نسبت به حالت عدم استفاده از این تکنیک) و همزمان موجب افزایش کارایی فشرده‌سازی روش پیشنهادی به اندازه‌ی 0.05 بیت بر پیکسل شده است.

۴-۵ ارزیابی کارایی فشرده‌سازی روش پیشنهادی

در این بخش کارایی فشرده‌سازی روش پیشنهادی بر طبق معیار «منحنی متوسط PSNR » برحسب نرخ بیت معرفی و با کارایی دو روش فشرده‌سازی JPEG2000 (بخش ۱) و WSQ مقایسه می‌شود. استاندارد JPEG2000 یکی از متداولترین روش‌های عام فشرده‌سازی تصاویر و روش WSQ نیز روش شناخته شده و خاص فشرده‌سازی تصاویر اثرانگشت می‌باشد.

معیار PSNR معرف میزان شباهت عددی تصویر فشرده شده به تصویر اصلی است. همچنین، این معیار به طور معکوس بیانگر

(۲) روش بازشناسی مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها کمترین حساسیت و پراکندگی دقت بازشناسی را نسبت به حالت‌های شش‌گانه، (در نقاط بالاتر از نقطه‌ی شکست) از خود نشان می‌دهد. همچنین این روش، بیشترین حساسیت و پراکندگی شیب اُفت دقت بازشناسی را (در نقاط پایین‌تر از نقطه‌ی شکست) نسبت به حالت‌های شش‌گانه، از خود نشان داده است.

(۳) تنها انجام فشرده‌سازی، در نقاط بالاتر از نقطه‌ی شکست، همواره موجب حفظ و حتی بهبود دقت بازشناسی شده است. این ویژگی، بسیار مطلوب قلمداد می‌شود؛ زیرا هم حجم تصویر اثرانگشت (با انجام فشرده‌سازی) تا حد زیادی کاهش یافته و هم این که دقت بازشناسی در حد همان کیفیت اولیه (قبل از فشرده‌سازی) و حتی بهتر از آن باقی مانده است. یکی از دلایل این ویژگی مفید را می‌توان مربوط به قدرت تحلیل محلی موجک‌ها و ویژگی متراکم‌سازی انرژی دانست که موجب می‌شود تنها با استفاده از تعداد کمی از ضرایب موجک در بازسازی، جزئیات تا حد زیادی حفظ شوند. بنابراین، در فشرده‌سازی با نرخ بیت پایین نیز، جزئیات مربوط به شیارها تا حد خوبی حفظ شده و در نتیجه، دقت روش‌های بازشناسی که وابسته به دقت تعیین این جزئیات است، تا حد خوبی حفظ می‌شود.

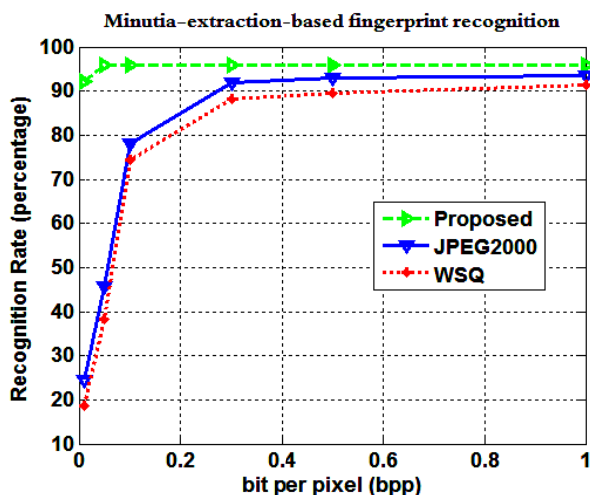
(۴) به استثنای روش بازشناسی مبتنی بر فیلتربانک گابور، تنها انجام بهسازی (چه در حالت انجام فشرده‌سازی و چه در حالت عدم انجام فشرده‌سازی) همواره موجب حفظ و حتی بهبود دقت بازشناسی در نقاط بالاتر از نقطه‌ی شکست شده است. این مطلب، موید مفید بودن استفاده از بهسازی، در حالت کلی، می‌باشد.

(۵) در حالت کلی نمی‌توان از قبل تعیین کرد که بهترین محل برای استفاده از بهسازی تصویر، چه جایی است. در مورد روش بازشناسی مبتنی بر فیلتربانک گابور، بهترین محل انجام بهسازی، به ترتیب (۱) هم قبل و هم بعد از فشرده‌سازی، (۲) بعد از فشرده‌سازی، و (۳) قبل از فشرده‌سازی می‌باشد. در مورد روش بازشناسی مبتنی بر شبکه‌ی عصبی، بهترین محل، به ترتیب (۱) بعد از فشرده‌سازی، (۲) هم قبل و هم بعد از فشرده‌سازی، و (۳) قبل از فشرده‌سازی می‌باشد. در مورد روش بازشناسی مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها، هر سه محل از اولویت یکسانی برخوردار هستند. البته، آن چه که در مورد این سه روش بازشناسی به طور مشترک می‌توان بیان نمود این است که انجام تنها یک بار بهسازی، بعد از فشرده‌سازی، همواره بهتر از انجام این بهسازی، قبل از فشرده‌سازی است. به این دلیل است که در دیاگرام بلوکی روش پیشنهاد شده در شکل ۲، بهسازی تصویر را بعد از انجام فشرده‌سازی مورد استفاده قرار داده‌ایم. نتیجه‌ی مطرح شده در این بند، تاییدی بر طرح پیشنهادی این مقاله (شکل ۲) می‌باشد.

(۶) یکی از نتایج جالب توجه (با توجه به نتایج عددی محاسبه شده) این است که ممکن است تصاویری در دسته‌ی حالت اول

۴-۶ ارزیابی کارایی بازشناسی روش پیشنهادی

کارایی بازشناسی تصاویر فشرده شده به کمک هریک از روش‌های پیشنهادی، JPEG2000، و WSQ در شکل ۹ نمایش داده شده است. مطابق با منحنی‌های نمایش داده شده در این شکل، تاثیر قابل توجه روش پیشنهادی (شکل ۲) روی سه پارامتر نقطه‌ی شکست، شیب افت دقت بازشناسی، و مقادیر دقت بازشناسی در نقاط بالاتر از نقطه‌ی شکست معلوم است. در حقیقت روش پیشنهادی توانسته است نقطه‌ی شکست را به سمت نقاط پایین‌تر منتقل کرده و در نقاط بالاتر از نقطه‌ی شکست، دقت بازشناسی بیشتری از خود نشان دهد.



شکل ۹: منحنی‌های دقت بازشناسی بر حسب نرخ بیتی که در آن فشرده‌سازی انجام شده است، برای سه روش WSQ، JPEG2000، و روش پیشنهادی.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش فشرده‌سازی تصاویر اثر انگشت مبتنی بر کاهش محدوده‌ی تغییرات تصویر، تبدیل موجک، کدگذار SPIHT، و بهسازی تصویر پیشنهاد و اثر آن روی دقت بازشناسی سه روش مختلف بازشناسی تصاویر اثر انگشت بررسی گردید. همچنین دو معیار نقطه‌ی شکست و شیب افت دقت بازشناسی جهت ارزیابی روش‌های بازشناسی معرفی گردیدند. روش‌های بازشناسی استفاده شده شامل استخراج ریزنقش‌ها، استفاده از شبکه‌ی عصبی، و استفاده از فیلتربانک گابور بودند. به منظور تعیین بهترین محل برای استفاده از بهسازی تصویر، شش حالت مختلف بررسی و نتایج هر روش بازشناسی، جداگانه، تحلیل گردید. برطبق یکی از این نتایج، معلوم گردید که در حالت کلی، انجام بهسازی پس از فشرده‌سازی بهتر از انجام آن قبل از فشرده‌سازی است. یکی دیگر از نتایج این بود که برای هر روش بازشناسی یک نقطه‌ی شکست و یک شیب افت دقت بازشناسی وجود دارد که می‌توان از این پارامترها در ارزیابی روش‌های مختلف بازشناسی تصاویر اثر انگشت استفاده نمود. نتیجه‌ی جالب توجه دیگر این بود که انجام تنها فشرده‌سازی همواره موجب حفظ و حتی بهبود دقت بازشناسی در نرخ‌های بالاتر از

میزان اعوجاج تولید شده در اثر انجام فشرده‌سازی بااتلاف است.

این معیار از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{MSE} \quad (2)$$

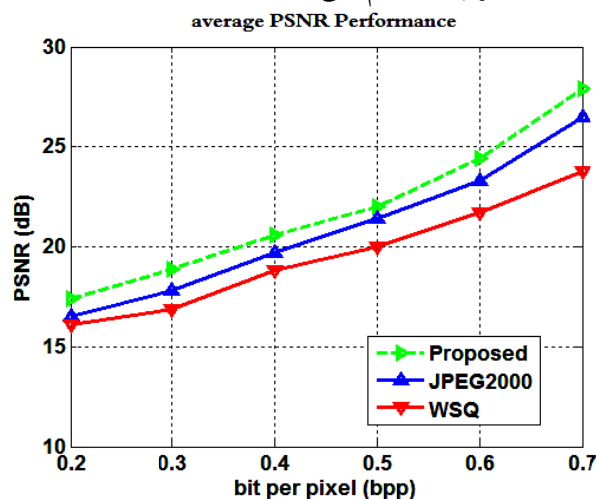
که در آن:

$$MSE = \frac{1}{Size^2} \sum_{(i,j)} (I_{orig}(i,j) - I_{rec}(i,j))^2 \quad (3)$$

بوده و $Size$ ابعاد تصویر مربعی، I_{orig} تصویر مربعی و I_{rec} تصویر بازسازی شده است.

برای محاسبه‌ی متوسط $PSNR$ ، مقادیر $PSNR$ حاصل از فشرده‌سازی تصاویر متعلق به پایگاه داده در یک نرخ بیت مشخص محاسبه و سپس میانگین‌گیری می‌شوند. این محاسبات برای چند نرخ بیت مختلف تکرار و سپس «منحنی متوسط $PSNR$ » برحسب نرخ بیت رسم می‌شود.

نمودار کارایی فشرده‌سازی روش پیشنهادی در مقایسه با دو روش WSQ و JPEG2000 در شکل ۸ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است مقدار $PSNR$ مربوط به تصاویر فشرده شده با روش پیشنهادی، از روی تصاویر فشرده شده نسبت به تصاویر اصلی اما بهسازی شده به کمک روش معرفی شده در بخش ۳-۲ محاسبه شده است زیرا با توجه به استفاده از بهسازی تصویر در روش پیشنهادی و بنابراین تغییر قابل ملاحظه‌ی پروفایل شدت روشنایی تصاویر اثر انگشت، اختلاف زیادی بین هر تصویر اصلی و تصویر فشرده شده‌ی متناظر آن به کمک روش پیشنهادی به وجود می‌آید. البته این نکته لازم به یادآوری است که هدف اصلی این مقاله رسیدن همزمان به میزان فشرده‌سازی بالا و حفظ یا بهبود کارایی بازشناسی تصاویر فشرده شده بوده و بنابراین، میزان شباهت عددی (یا ظاهری) بین تصویر اصلی و تصویر فشرده‌شده، که توسط معیار $PSNR$ اندازه‌گیری می‌شود، در کار مقاله‌ی حاضر چندان مهم نمی‌باشد.



شکل ۸: منحنی‌های متوسط $PSNR$ بر حسب نرخ بیتی که در آن فشرده‌سازی انجام شده است، برای سه روش WSQ، JPEG2000، و روش پیشنهادی.

- [10] G. Shao, Y. Wu, Y. A. X. Liu, and T. Guo, "Fingerprint compression based on sparse representation," *IEEE transactions on image processing*, Vol. 23, No. 2, pp. 489-501, 2014.
- [11] D. Maltoni, D. Mao, A. K. Jain, and S. Prabhakar, *Handbook of Fingerprint Recognition*, 2nd Edition, Springer-Verlag, London, 2009.
- [12] R. C. Gonzales and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd Edition, Prentice Hall, 2007.
- [13] <http://www.mathworks.com>, Image Processing Toolbox, see documentation for the "imadjust" function.
- [14] <http://www.mathworks.com>, Image Processing Toolbox, see documentation for the "imsharpen" function.
- [15] W. F. Leung, S. H. Leung, W. H. Lao, and A. Luk, "Fingerprint recognition using neural network," *IEEE Proceedings*, pp. 226-235, 1996.
- [16] A. K. Jain, S. Prabhakar, L. Hong, and Sh. Pankanti, "Filterbank-based fingerprint matching," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 9, No. 5, pp. 846-859, 2000.
- [17] S. Prabhakar, *Fingerprint Classification and Matching Using a Filterbank*, PhD thesis, Michigan State University, 2001.
- [18] L.C. Jain, U. Halici, I. Hayashi, S. B. Lee and S. Tsutsui, *Intelligent Biometric Techniques in Fingerprint and Face Recognition*, CRC Press, 1999.
- [19] N. Ratha, S. Chen and A. K. Jain, "Adaptive Flow Orientation Based Feature Extraction in Fingerprint Images", *Pattern Recognition*, Vol. 28, pp. 1657-1672, 1995.
- [20] L. Hong, *Automatic Personal Identification Using Fingerprints*, Ph.D. Thesis, 1998.
- [21] M. M. S. Chong, R. K. L. Gay, H. N. Tan, and J. Liu, "Automatic Representation of Fingerprints for Data Compression by B-Spline Functions," *Pattern Recognition*, Vol. 25, No. 10, pp. 1199-1210, 1992.
- [22] V. Perumal and D. Ramaswamy, "An Innovative Scheme For Effectual Fingerprint Data Compression Using Bezier Curve Representations," *International Journal of Computer Science and Information Security*, Vol. 6, No. 1, pp. 149-157, 2009.
- [23] K. Selvakumarasamy, R. Radhikadevi, and Sagunthala, "Performance Analysis of Bi-Orthogonal Wavelets for Fingerprint Image Compression," *ITSI Transactions on Electrical and Electronics Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 64-70, 2013.
- [24] M. R. Islam, F. Bulbul, and S. S. Shanta, "Performance Analysis of Coiflet-Type Wavelets for a Finger Image Compression by Using Wavelet and Wavelet Packet Transform," *International Journal of Computer Science and Engineering Survey*, Vol. 3, No. 2, pp. 79-87, 2012.
- [25] S. S. Gornale, R. R. Manza, V. Humbe, and K. V. Kale, "Performance Analysis of Biorthogonal Wavelet Filters for Lossy Fingerprint Image Compression," *International*
- نقطه‌ی شکست می‌شود؛ این ویژگی جالب امکان بهره‌بردن همزمان از دو مزیت کاهش حجم ذخیره‌سازی تصاویر اثرانگشت و حفظ یا بهبود دقت بازشناسی را می‌دهد. و بالاخره، نتیجه‌ی دیگر این که روش بازشناسی مبتنی بر استخراج ریزنقش‌ها کمترین حساسیت و پراکندگی دقت بازشناسی را نسبت به حالت‌های شش‌گانه، (در نقاط بالاتر از نقطه‌ی شکست) از خود نشان می‌دهد. همچنین این روش، از نظر دو معیار پیشنهادی نقطه‌ی شکست و شیب اُفت دقت بازشناسی، بهترین وضعیت را نسبت به دو روش دیگر داشت. انجام بهسازی در مورد این روش، تاثیر قابل ملاحظه‌ای روی کاهش شیب اُفت دقت بازشناسی داشته است. بنابراین از این روش بازشناسی در مرحله‌ی بعدی ارزیابی به منظور مقایسه‌ی کارایی فشرده‌سازی و بازشناسی روش پیشنهادی با روش‌های JPEG2000 و WSQ استفاده گردید.

مراجع

- [1] A. K. Jain and A. A. Ross, Nandakumar K., *Introduction to Biometrics*, Springer Science+ Business Media, LLC 2011.
- [2] M. M. Kambli and M. S. Bhatia, "Comparison of Different Fingerprint Compression Techniques", *Signal and Image Processing: An International Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 27-39, 2010.
- [3] M. Kampfer, A. Stogner, and H. Uhl, "Comparison of Compression Algorithms' impact on Fingerprint and Face Recognition Accuracy", *Proceedings of the SPIE*, San Jose, CA, Vol. 6508, pp. 650810.1-650810.12, 2007.
- [4] S. Dhawan, "A Review of Image Compression and Comparison of its Algorithms," *International Journal of Electronics and Communication Technology*, Vol. 2, No. 1, pp. 22-26, 2011.
- [5] W. A. Pearlman and A. Said, "Set Partitioning Coding: Part I of Set Partition Coding and Image Wavelet Coding Systems," *Foundations and Trends in Signal Processing*, Vol. 2, No. 2, pp. 95-180, 2008.
- [6] W. A. Pearlman and A. Said, "Image Wavelet Coding Systems: Part II of Set Partition Coding and Image Wavelet Coding Systems," *Foundations and Trends in Signal Processing*, Vol. 2, No. 3, pp. 181-246, 2008.
- [7] W. A. Pearlman and A. Said, *Digital Signal Compression: Principles and Practice*, Cambridge University Press, New York, 2011.
- [8] A. Said and W. A. Pearlman, "A New, Fast, and Efficient Image Codec Based on Set Partitioning in Hierarchical Trees," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 6, No. 3, pp. 243-250, 1996.
- [9] Z. Haddad, A. Beghdadi, A. Serir, and A. Mokraoui, "Wave atoms based compression method for fingerprint images," *Pattern Recognition*, Vol. 46, pp. 2450-2464, 2013.

- [38] G. A. Khuwaja and A. S. Tolba, "Fingerprint image compression," *Neural Networks for Signal Processing X, Proceedings of the 2000 IEEE Signal Processing Society Workshop (Volume: 2)*, pp. 517–526, 2000.
- [39] C. Beleznai, H. Ramoser, B. Wachmann, J. Birchbauer, H. Bischof, and W. Kropatsch, "Memory-Efficient Fingerprint Verification," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'01)*, Vol. 2, pp. 463–466, (Thessaloniki, Greece), Oct. 2001.
- [40] N. Anurakphanawan and P. Lamsrichan, "Fingerprint Recognition Performance with WSQ, CAWDR, and JPEG2000 Compression," *6th International Conference of Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES)*, pp. 1–6, 2015.
- [41] D. Maio, D. Maltoni, R. Cappelli, J. L. Wayman, and A. K. Jain, "FVC2004: Third Fingerprint Verification Competition" Springer-Verlag Berlin Heidelberg, D. Zhang and A.K. Jain (Eds.): ICBA 2004, LNCS 3072, pp. 1–7, 2004.
- [26] S. S. Gornale, V. T. Humbe, R. R. Manza and K. V. Kale, "Fingerprint Image Compression using Retain Energy (RE) and Number of Zeros (NZ) through Wavelet Packet (WP)," *International Journal of Computer Science and Security*, Vol. 1, No. 2, pp. 35–42, 2008.
- [27] S. Zhao, X.-F. Wang, "Fingerprint Image Compression Based on Directional Filter Banks and TCQ," *Second International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining*, pp.660–663, 2009.
- [28] S. Esakkirajan, T. Veerakumar, V. S. Murugan, and R. Sudhakar, "Fingerprint Compression Using Contourlet Transform and Multistage Vector Quantization," *International Journal of Biological and Medical Sciences*, Vol. 1, No. 2, pp. 140–147, 2006.
- [29] S. Kasaei, M. Deriche, and D. Boashash, "A Novel Fingerprint Image Compression Technique Using Wavelet Packets and Pyramid Lattice Vector Quantization," *IEEE Transactions on Image Processing*, Vol. 12, No. 11, pp. 1365–1378, 2002.
- [30] A. R. Gonzalo, "Fingerprint Image Compression Using Wavelets: A Comparison with JPEG," *Proceedings of the IASTED International Conference, Signal and Image Processing*, October 18–21, 1999.
- [31] J. N. Bradley, C. M. Brislawn, and T. Hopper, "The FBI Wavelet/Scalar Quantization Standard for Gray-Scale Fingerprint Image Compression," in *SPIE Proceedings, Visual Information Processing II*, pp. 293–304, (Orlando, FL, USA), Apr. 1993.
- [32] M. A. Lepley, Profile for 1000 ppi fingerprint compression, Tech. Rep. MTR 04B0000022, The MITRE Corporation, 2004.
- [33] R. Kidd, "Comparison of Wavelet Scalar Quantization and JPEG for Fingerprint Image Compression," *Journal of Electronic Imaging*, Vol. 4, No. 1, pp. 31–39, 1995.
- [34] B. G. Sherlock and D. M. Monro, "Optimized Wavelets for Fingerprint Compression," *Proceedings of the 1996 International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP'96)*, 1996.
- [35] U. Grasemann and R. Miikkulainen, "Effective Image Compression Using Evolved Wavelets," in *GECCO '05: Proceedings of the 2005 conference on Genetic and evolutionary computation*, pp. 1961–1968, ACM Press, (New York, NY, USA), 2005.
- [36] B. G. Sherlock and D. M. Monro, "Balanced Uncertainty Wavelets for Fingerprint Compression," in *IEE Colloquium on Image Processing for Security Applications*, pp. 5–8, (London, GB), Mar. 1997.
- [37] A. K. Al-Asmari, "Progressive Fingerprint Images Compression Using Edge Detection Technique," *International Journal of Imaging Systems Technology*, Vol. 12, No. 5, pp. 211–216, 2002.



هادی گرایلو تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در سال ۱۳۸۲ در دانشگاه صنعتی شریف به پایان برد. وی همچنین، تحصیلات خود در مقاطع کارشناسی ارشد و دکتری را در دانشگاه تربیت مدرس تهران در سالهای به ترتیب ۱۳۸۴ و ۱۳۸۸ به پایان رساند. زمینه‌های تحقیقاتی ایشان در مقاطع

تحصیلات تکمیلی شامل پردازش تصاویر متنی بوده است. وی هم‌اکنون عضو هیات علمی دانشگاه شاهرود بوده و حوزه‌های تحقیقاتی مورد علاقه‌ی ایشان شامل پردازش تصاویر متنی، پردازش سیگنالهای حیاتی، و پیاده‌سازی سخت‌افزاری الگوریتم‌های پردازش سیگنال در بستر سخت‌افزاری به ویژه پردازشگرهای سیگنال می‌باشد.