

ارزیابی کیفیت تصاویر رنگی با استفاده از ویژگی‌های ساختاری

گونا رحمانیانی^۱ و آزاده منصوری^۲

چکیده

هدف از ارزیابی کیفیت تصویر، ارائه مدلی برای اندازه‌گیری کیفیت تصویر است به گونه‌ای که مدل یاد شده بیشترین سازگاری با سیستم بینایی انسان را داشته باشد. در این مقاله روشی برای ارزیابی کیفیت تصاویر رنگی با استفاده از ترکیب سه ویژگی اندازه‌گیری، هم‌فازی و برجستگی‌های دیداری که ساختار تصویر را به شیوه کارایی نمایش می‌دهند، ارائه شده است. این سه ویژگی ارتباط بسیار نزدیکی با سیستم بینایی انسان دارند، هر گونه تخریبی بر روی تصویر موجب ایجاد تغییراتی در این سه ویژگی می‌شود. در روش ارائه شده از اندازه‌گیری تغییرات این ویژگی‌ها برای تخمین کیفیت دریافتی توسط سیستم بینایی انسان کمک گرفته شده است. نتایج آزمایش‌ها بر روی مجموعه داده‌های موجود نشان می‌دهد که الگوریتم مطرح شده همبستگی زیادی با معیار انسانی داشته و در مقایسه با روش‌های موجود نتایج مطلوبی فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها

ارزیابی کیفیت تصاویر رنگی، ارزیابی کیفیت مرجع کامل، سیستم بینایی انسان، هم‌فازی، برجستگی‌های دیداری

بلادرنگ و خودکار به کار برد. از این رورائه معیارهای محاسباتی^۱ ارزیابی کیفیت تصویر به گونه‌ای که با معیارهای انسانی سازگاری داشته باشند ضروری است.

معیارهای ارزیابی کیفیت تصویر را می‌توان به طور کلی و با توجه به دسترسی به تصویر مرجع به سه روش مرجع کامل^۲، بدون مرجع^۳، و مرجع کاهش‌یافته^۴ دسته‌بندی کرد. در این حالت، تصویر مرجع، تصویر اصلی بدون تخریب و یا به عبارت دیگر تصویر ایده‌آل در نظر گرفته می‌شود. در روش مرجع کامل، دسترسی به تصویر مرجع و تصویر تخریب شده به طور کامل وجود دارد. در روش‌های بدون مرجع تنها تصویر تخریب شده در دسترس است و هیچ‌گونه اطلاعاتی در مورد تصویر مرجع در اختیار نیست. در روش‌های مرجع کاهش‌یافته افزون بر تصویر تخریب شده اطلاعات اندکی در مورد تصویر مرجع نیز وجود دارد ولی تصویر مرجع در دسترس نمی‌باشد. در این نوشتار تمرکز بر روی روش‌های مرجع کامل است.

۱ مقدمه

با افزایش کاربرد تصاویر دیجیتال و گسترش فناوری ارتباطات، ارزیابی کیفیت تصویر تبدیل به مسئله بسیار مهمی در بسیاری از زمینه‌های کاربردی مانند انتقال، نهان‌نگاری، فشرده‌سازی، بازسازی و بهبود کیفیت تصویر شده است. دقیق‌ترین معیار برای تعیین کیفیت یک تصویر ارزیابی توسط سیستم بینایی بشر است ولی معیارهای انسانی ارزیابی کیفیت زمان‌بر و پرهزینه هستند و نمی‌توان آنها را به آسانی برای بسیاری از کاربردها مثل سیستم‌های

این مقاله در فروردین ماه ۱۳۹۷ دریافت، در اسفندماه بازنگری و در خردادماه سال ۱۳۹۸ پذیرفته شد.

^۱ کارشناس ارشد مهندسی معماری کامپیوتر.

رایانامه: std_rahmaniani@khu.ac.ir

^۲ گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه خوارزمی.

رایانامه: a_mansouri@khu.ac.ir

¹Mathematical (Objective)

²Full reference

³No reference

⁴Reduced reference

تصویر را در پس تخریب مشاهده کند. ترکیب این دو رویکرد نتایج قابل قبولی را فراهم آورده است.

همان‌گونه که ذکر شد گرادیان حاوی اطلاعات دیداری مهمی برای ادراک تصویر است. با استفاده از آن می‌توان اطلاعاتی همچون تغییرات ساختار و تباین را به صورت کارآمدی به دست آورد. در روش^{۱۲} GSM از تشابه گرادیان برای اندازه‌گیری تغییرات تباین و ساختار استفاده شده است [۷]. در این روش علاوه بر این دو معیار، تغییرات روشنایی نیز برای ارزیابی بهتر در نظر گرفته شده است.

Bovik و همکارانش به منظور ارائه معیار کیفیت تصویری که هم دقت بالایی در پیش‌بینی داشته باشد و هم به لحاظ محاسبات کارآمد باشد، معیار^{۱۳} GMSD را ارائه کردند [۸]. معیار محاسبه شباهت محلی تنها بر اساس استخراج گرادیان است و در نتیجه نسبت به روش‌های پیشین بسیار سریع‌تر بوده و پیچیدگی محاسباتی پایین‌تری دارد. در این روش به جای میانگین حسابی، از انحراف معیار نقشه شباهت محلی جهت تجمیع استفاده شده است.

معیار^{۱۴} VSI در سال ۲۰۱۴ توسط Lin و همکارانش ارائه شده است. این معیار از دو مؤلفه برجستگی‌های دیداری و اندازه گرادیان استفاده کرده است [۹]. چون برجستگی‌های دیداری نسبت به تغییرات تباین حساس نیست، بنابراین از گرادیان به عنوان ویژگی دوم در این معیار استفاده شده است. همچنین به دلیل این که این معیار برای ارزیابی تصاویر رنگی به کار می‌رود، از فضای رنگ معرفی شده در [۱۰] برای جداسازی مؤلفه‌های رنگی از مؤلفه روشنایی استفاده شده است.

در طی چند سال اخیر، برجستگی‌های دیداری به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. اثبات شده است که استفاده از برجستگی‌های دیداری می‌تواند برای ارزیابی کیفیت تصویر سودمند باشد [۱۱]. به تازگی، افزایش آگاهی نسبت به رابطه نزدیک برجستگی‌های دیداری و درک کیفیت، منجر به ایجاد تعدادی رویکرد شده است که تنها با به کارگیری برجستگی‌های دیداری در مرحله تجمیع معیارهای ارزیابی کیفیت، کارایی آنها بهبود یافته است. از جمله پژوهش‌های صورت گرفته در این دسته می‌توان به [۱۲]، [۱۳] و [۱۴] اشاره کرد، که در این روش‌ها هدف ارائه یک معیار ارزیابی کیفیت تصویر جدید نیست، بلکه هدف اصلی بررسی یک روش تجمیع وزن‌دهی شده توسط برجستگی‌های دیداری است که کارایی بسیار بهتری نسبت به رویکرد «میانگین‌گیری» ساده دارد. بنابراین، می‌توان با استفاده از روش‌های موجود، نقشه کیفیت محلی تصویر را محاسبه کرده تنها با به کارگیری روش تجمیع وزن‌دار با استفاده از برجستگی‌های دیداری به کارایی بهتری دست یافت.

در پژوهش‌های بسیاری نشان داده شده است دو معیار ارزیابی MSE و PSNR با سیستم بینایی انسان سازگار نیستند چرا که تنها بر پایه اختلاف انرژی دو سیگنال اصلی و تخریب شده هستند. این در حالی است که سیستم بینایی انسان به ویژگی‌های ساختاری تصویر حساس است [۱]. بر این اساس معیارهای متعددی مطرح شده‌اند که تنوع آنها به حدی است که بررسی همه آنها میسر نمی‌باشد. در بیشتر این روش‌ها میزان تخریب بر اساس یک سری ویژگی محلی محاسبه شده و معیار نهایی بر اساس تجمیع این ویژگی‌ها به دست می‌آید. در ادامه به برخی از مهمترین و تأثیرگذارترین این روش‌ها اشاره می‌شود.

معیار^{۱۵} SSIM یکی از معیارهایی است که بر معیارهای پس از خود تأثیر قابل توجهی داشته است [۱]. این معیار علاوه بر اختلاف روشنایی و تباین دو تصویر، میزان همبستگی آنها را نیز در نظر می‌گیرد. معیار نهایی بر اساس میانگین حسابی میزان شباهت‌های محلی به دست می‌آید. بر مبنای این معیار، معیارهای متعددی نظیر [2] MS-SSIM، [3] 3-SSIM و [4] GSSIM مطرح شده‌اند.

با توجه به این که سیستم بینایی، ساختار تصویر را بر اساس ویژگی‌های سطح پایین اخذ می‌کند، معیار^{۱۶} FSIM از هم‌فازی و اندازه گرادیان بهره می‌گیرد. از آنجایی که هم‌فازی نسبت به تباین حساس نیست، اندازه‌ی گرادیان نیز برای استخراج اطلاعات تباین به کار گرفته شده است [۵]. همچنین برای محاسبه معیار نهایی میانگین وزن‌دار معیارهای محلی محاسبه می‌شود که در وزن‌دهی نیز از پیشینه‌ی مقدار هم‌فازی دو تصویر مرجع و تخریب شده استفاده شده است. در کنار معیار FSIM نسخه ارزیابی برای تصاویر رنگی با نام FSIMc نیز مطرح شده است. برای ارزیابی کیفیت تصاویر رنگی ابتدا مؤلفه‌های رنگی به فضای رنگ YIQ نگاشت می‌شود و پس از آن ارزیابی جهت مؤلفه‌های رنگی نیز صورت می‌پذیرد.

درا^{۱۷} MAD از دو رویکرد برای تعیین کیفیت تصویر استفاده شده است [۶]. برای تصاویری که تخریب قابل توجهی ندارند، محتویات تصویر واضح است و سیستم بینایی بشر به دنبال استخراج تخریب در تصویر است. در مقابل در تصاویری که دارای تخریبی واضح هستند، سیستم بینایی بشر سعی می‌کند محتویات

¹ Mean Squared Error

² Peak Signal to Noise Ratio

³ Feature

⁴ Pooling

⁵ Structural Similarity Index

Contrast

⁷ Multiscale Structural Similarity

⁸ Three-component Weighted Structural Similarity

⁹ Gradient-Based Structural Similarity

¹ Feature Similarity

¹ Phase congruency

¹ Gradient Magnitude

¹ Most Apparent Distortion

5

6

7

دیداری و نقش مؤلفه‌های رنگی، این دو ویژگی نیز انتخاب شده و مورد استفاده قرار گرفتند. از این روش پیشنهادهی چهار نقشه تشابه‌آمتشکل از نقشه‌هم‌فازی، نقشه برجستگی‌های دیداری، نقشه‌گرادیان و در انتها نقشه‌مؤلفه‌های رنگی محاسبه می‌شوند. در نهایت با یک سیستم وزن‌دهی کارآمد که برگرفته از نقشه برجستگی‌های دیداری است معیار نهایی به دست خواهد آمد. معیارهای به کارگرفته شده به نوعی کامل کننده یک دیگر هستند. ادامه مقاله به ترتیب زیر نوشته شده است: در بخش ۲ در مورد استخراج ویژگی‌ها توضیحاتی ارائه می‌شود. در بخش ۳ به بیان روش پیشنهادی و در بخش ۴ به نتایج آزمایش‌ها پرداخته خواهد شد.

۲ استخراج ویژگی‌ها

۲-۱ هم‌فازی

سیستم بینایی انسان عمدتاً به ویژگی‌های سطح پایین مانند لبه‌ها حساسیت بالایی دارد. از این رو یک معیار سنجش کیفیت باید میزان تخریب چنین مؤلفه‌هایی را به شیوه‌ای کارآمد اندازه‌گیری کند. ویژگی‌های به دست آمده بر اساس لبه‌های قوی (مانند اندازه‌گرادیان) نسبت به تغییرات تباین و روشنایی مقاوم نیستند [۱۹]. در چنین مواردی که روش‌های متعارف لبه‌یابی، به خوبی ویژگی‌های سطح پایین را استخراج نمی‌کنند، روش مبتنی بر هم‌فازی می‌تواند به گونه‌ای مؤثر به کار گرفته شود. از سوی دیگر، براساس بررسی‌های فیزیولوژیکی و روان‌شناختی، سیستم بینایی انسان به ویژگی‌هایی که مؤلفه‌های متفاوت فرکانسی آن دارای فاز یکسان باشند، حساسیت بالایی نشان می‌دهد [۲۰، ۲۱].

بخش‌های لبه‌مانند یک تصویر در حوزه فرکانس تشابه زیادی در مؤلفه فاز دارند. اندازه این فاز مشترک می‌تواند مشخص کننده نوع ویژگی به دست آمده باشد [۱۹]. همچنین چنانچه اشاره شد، میزان هم‌فازی اهمیت ویژگی به دست آمده را نشان می‌دهد [۲۱]. این مفهوم برای یک لبه در موج مربعی و یک موج مثلثی در شکل ۱ به تصویر کشیده شده است. در این شکل هارمونیک‌های ابتدایی با خطوط منقطع (آبی رنگ) و مجموع هارمونیک‌ها با خط پیوسته (قرمز رنگ) نمایش داده شده است.

با توجه به تعریف فاز در شکل موج‌های سینوسی (کسری از چرخه‌ی موج که از مبدا سپری شده باشد)، می‌توان در شکل ۱ مشاهده کرد که تمامی موج‌های سینوسی تشکیل دهنده‌ی سیگنال در نقاطی که دارای تغییرات لبه‌مانند هستند، فاز یکسانی دارند (این موقعیت در محور افقی با مقدار ۱ - مشخص شده است).

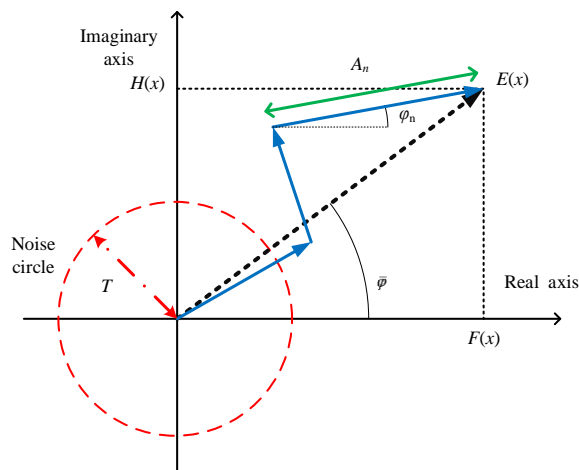
در مقاله [۹] نشان داده شده است که استفاده از برجستگی‌های دیداری نه تنها به عنوان تابع وزن‌دهی در مرحله تجمیع برای به دست آوردن مقدار کیفیت نهایی می‌تواند باعث بهبود معیار ارزیابی کیفیت تصویر شود، بلکه می‌توان از آن به عنوان ویژگی در به دست آوردن نقشه کیفیت محلی تصویر نیز استفاده کرد. این رویکرد سبب افزایش هماهنگی روش با معیار انسانی خواهد شد. در این خصوص در [۱۵] یک بررسی جامع در باره اضافه کردن مؤلفه برجستگی دیداری برای ارزیابی کیفیت ارائه شده است.

در این راستا در روش [16] GDRW نیز از برجستگی دیداری و مؤلفه‌های رنگی برای ارزیابی کیفیت استفاده شده است. این معیار بر اساس ترکیب دو معیار محلی و کلی به دست می‌آید. در این روش برای ارزیابی کیفیت محلی از پنجره‌های تصادفی استفاده شده است. به منظور محاسبه‌ی معیار کلی همانند روش GMSD انحراف معیار نقشه‌گرادیان نیز به کار گرفته شده است.

روش [۱۷] SLW بر پایه استخراج ویژگی‌های سطح پایین به وسیله‌ی نمایش تنک از نواحی تصویر است. تخریب‌های محلی با مقایسه نواحی در نظر گرفته شده از تصویر اصلی و تصویر تخریب شده محاسبه می‌گردند. در مرحله تجمیع از رگرسیون استفاده شده است. باید توجه داشت که این روش از بیست درصد تصاویر به عنوان داده‌ی آموزش استفاده می‌کند.

هر چند ویژگی‌های مورد استفاده در کارایی روش اهمیت بسزایی دارند، اما نحوه ترکیب ویژگی‌ها و تجمیع آنها در نتیجه نهایی بسیار اثرگذار خواهد بود. در [۱۸] یک روش ترکیبی با استفاده از الگوریتم وراثتی ارائه شده است که تعدادی معیار مرجع کامل را انتخاب و توسط وزن‌دهی مناسبی ترکیب می‌نماید. استفاده از الگوریتم وراثتی انتخاب معیار و وزن مناسب آن را برای ترکیب مشخص می‌کند. هر چند نتایج ارائه شده مطلوب هستند، باید توجه داشت روش‌های استفاده شده در ترکیب دارای مؤلفه‌های مشترک هستند. دیگر این که در این روش برای به دست آوردن وزن‌های مناسب، نیاز به آموزش امری اجتناب ناپذیر است. در مرحله آموزش مقادیر ضرایب برای هر مجموعه داده به صورت جداگانه و با استفاده از بیست درصد تصاویر آن مجموعه صورت می‌پذیرد.

در ارزیابی مرجع کامل تصاویر، ویژگی‌های مشابهی در اکثر روش‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. یک دسته از این خصیصه‌ها که به صورت گسترده استفاده می‌شوند، مربوط به مؤلفه‌های فرکانس بالا هستند. هر ویژگی برای مدل کردن تخریب‌های خاصی موفق عمل می‌کند و یک چالش ترکیب ویژگی‌ها به نحوی است که در مجموع پاسخ قابل قبولی ارائه دهند. با توجه به این که هم‌فازی و نقشه‌ی گرادیان برای تحلیل ساختار تصویر نقش مکمل دارند، این دو خصیصه انتخاب شدند. همچنین نظر به اهمیت برجستگی



شکل ۲- نمایش مؤلفه‌های فرکانسی در فضای مختلط- میانگین فاز نیز در شکل نشان داده شده است.

این شیوه در مشخص کردن موقعیت محلی ویژگی‌ها دارای ضعف است از طرفی نسبت به نویز نیز حساس است. در [۲۳] با توجه به حساسیت معیار ارائه شده در رابطه ۲ به نویز، معیاری دیگر برای این محاسبات پیشنهاد شده است:

$$PC(x) = \frac{\sum_n W(x) [A_n (\cos(\varphi(x) - \bar{\varphi}(x)) - |\sin(\varphi(x) - \bar{\varphi}(x))|) - T]}{\sum_n A_n(x) + \varepsilon} \quad (3)$$

در این شیوه برای تخمین دقیق‌تر محل ویژگی از مؤلفه‌های سینوسی هم استفاده شده است. از طرفی تنها زمانی که میزان انرژی محلی مؤلفه‌های فرکانسی از حد آستانه T فراتر رود، در نظر گرفته خواهند شد. در واقع، T میزان اثرگذاری نویز می‌باشد. در شکل ۲ شعاع دایره قرمز رنگ برابر با میزان آستانه T است. W برای وزن‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و ε برای پیشگیری از تقسیم بر صفر در نظر گرفته شده است. نماد \perp به این معنی است که در صورت مثبت بودن مقدار محاسبه شده، همان مقدار و در صورت منفی بودن صفر جایگزین می‌شود.

۲-۱-۲- محاسبه‌ی فرکانس محلی

برای محاسبه‌ی فاز به صورت محلی لازم است، از فیلترهایی استفاده شود که دارای فاز خطی هستند. بدین منظور لازم است از یک پنجره گاوسی جهت محلی‌سازی و برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های فرکانسی از توابعی مانند سینوس و کسینوس استفاده شود. استفاده از پنجره‌ی گاوسی تغییری در فاز مؤلفه‌های فرکانسی ایجاد نمی‌کند. در این حالت می‌توان از فیلترهای گابور زوج و فرد استفاده کرد. با توجه به محدودیت‌های فیلتر گابور معمولاً از فیلتر گابور لگاریتمی استفاده می‌شود [۲۴].

۲-۱-۳- محاسبه‌ی هم‌فازی در سیگنال دوبعدی

تا اینجا شیوه‌ی محاسبه‌ی هم‌فازی تنها برای سیگنال‌های یک بعدی مطرح شد. برای تصاویر (سیگنال‌های دوبعدی) ابتدا، انرژی محلی

۲-۱-۱- هم‌فازی در سیگنال‌های یک بعدی

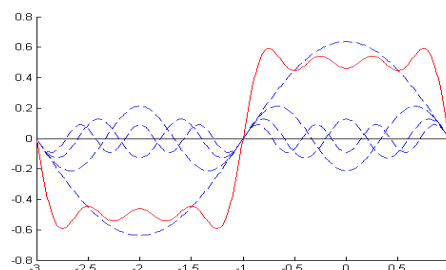
فرض می‌شود مؤلفه‌ی فرکانسی n -ام (هارمونیک n -ام) در نقطه‌ی x ، دارای دامنه‌ی $A_n(x)$ و فاز $\varphi_n(x)$ باشد. در شکل ۲ این مؤلفه‌ها به صورت بردارهایی در فضای مختلط رسم شده‌اند. اگر همه‌ی بردارها با هم جمع شوند، تصویر جمع حاصل بر روی محور اعداد حقیقی برابر با مقدار سیگنال در نقطه‌ی x ($F(x)$) خواهد بود. معیار هم‌فازی به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$PC(x) = \frac{|E(x)|}{\sum_n A_n(x)} \quad (1)$$

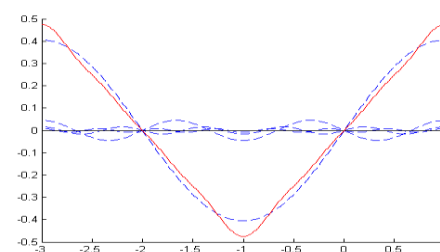
در عبارت (۱)، $|E(x)|$ انرژی محلی است. چنانچه تمام مؤلفه‌ها هم‌فاز باشند، عبارت (۱) برابر با یک خواهد بود. بدین ترتیب بدون نیاز به در نظر گرفتن حد آستانه متغیر می‌توان ویژگی‌های سطح پایین را به گونه‌ای مقاوم نسبت به تغییرات روشنایی و تباین به دست آورد. هم‌فازی را می‌توان به صورت زیر نیز تعریف کرد:

$$PC(x) = \frac{\sum_n A_n (\cos(\varphi(x) - \bar{\varphi}(x)))}{\sum_n A_n(x)} \quad (2)$$

در این رابطه $\bar{\varphi}(x)$ نشانگر میانگین فاز هارمونیک‌های تشکیل دهنده سیگنال است.



الف



ب

شکل ۱- مؤلفه‌های فرکانسی تشکیل دهنده‌ی شکل موج مربعی (الف) و مثلثی (ب)

همانگونه که آورده شد، در خصوص واکنش چشم انسان نسبت به تغییرات رنگی، نشان داده شده است که رنگ‌های گرم، مانند قرمز و زرد، نسبت به رنگ‌های سرد، مثل سبز و آبی، بیشتر مورد توجه سیستم بینایی انسان هستند [۲۸]. اگر $f(x)$ یک تصویر در فضای رنگ RGB باشد، ابتدا به فضای رنگ $CIE L^*a^*b^*$ نگاشت می‌شود. چنانچه پیش از این نیز بیان شد $f_a(x), f_b(x)$ نشان دهنده اطلاعات رنگی خواهند بود. کانال a^* حاوی اطلاعات سبز-قرمز است در حالی که کانال b^* حاوی اطلاعات آبی-زرد است. اگر پیکسلی دارای مقدار a^* کوچک (بزرگ) باشد، مایل به سبز (قرمز) است. همچنین، اگر پیکسلی دارای مقدار b^* کوچک (بزرگ) باشد، مایل به آبی (زرد) است. بنابراین اگر پیکسلی دارای مقدار a^* و یا b^* بزرگتر باشد، «گرم‌تر» به نظر می‌رسد، در غیر این صورت «سردتر» به نظر خواهد رسید. بر اساس این تحلیل، برای به دست آوردن معیار ارزیابی «برجستگی رنگ» برای یک پیکسل، ابتدا نگاهت خطی $f_a(x) \in [0,1] \rightarrow f_{an}(x)$ و $f_b(x) \in [0,1] \rightarrow f_{bn}(x)$ به صورت زیر اعمال می‌شود [۲۸]:

$$f_{an}(x) = \frac{f_a(x) - \min a}{\max a - \min a}, f_{bn}(x) = \frac{f_b(x) - \min b}{\max b - \min b} \quad (۶)$$

در معادله (۶) منظور از $\min a$ (maxa) کمترین (بیشترین) مقدار $f_a(x) \in \Omega$ و $\min b$ (maxb) کمترین (بیشترین) مقدار $f_b(x) \in \Omega$ است. هنگامی که در نقطه‌ای $(f_{an}(x) = 0, f_{bn}(x) = 0)$ باشد، آن نقطه سردترین نقطه است و نقطه‌ای با کمترین اهمیت تلقی می‌شود. بنابراین برجستگی رنگ در نقطه x به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸]:

$$S_C(x) = 1 - \exp\left(-\frac{f_{an}^2(x) + f_{bn}^2(x)}{\sigma_c^2}\right) \quad (۷)$$

که σ_c پارامتر تنظیم کننده است.

عامل آخری که برای محاسبه‌ی برجستگی دیداری در نظر گرفته شده است، موقعیت پیکسل است. تحقیقات نشان داده است که اشیائی که نزدیک مرکز تصویر هستند، برای چشم انسان جذاب‌تر هستند. این نشان دهنده این است که موقعیت‌های نزدیک به مرکز تصویر نسبت به موقعیت‌های دورتر از مرکز با احتمال بیشتری «برجسته» هستند. این ویژگی چشم انسان به سادگی توسط یک فیلتر گاوسی قابل شبیه‌سازی است. اگر c مرکز تصویر f باشد، نقشه برجستگی بر اساس موقعیت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$S_D(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c\|_2^2}{\sigma_D^2}\right) \quad (۸)$$

که σ_D پارامتر تنظیم کننده است.

در نهایت و بر اساس سه عامل به دست آمده معیار SDSP به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$SDSP(x) = S_F(x) \cdot S_D(x) \cdot S_C(x) \quad (۹)$$

در جهت‌ها و مقیاس‌های مختلف با استفاده از فیلترهای دوبعدی محاسبه شده و رابطه‌ی (۱) به این شیوه اصلاح می‌شود که محاسبات در راستاها و مقیاس‌های متفاوت به کار گرفته خواهد شد.

$$PC_{2D}(x) = \frac{\sum_j E_{\theta_j}(x)}{\varepsilon + \sum_n \sum_j A_{n,\theta_j}(x)} \quad (۴)$$

لازم به ذکر است که پیاده‌سازی‌های متفاوتی برای به دست آوردن هم‌فازی مطرح شده است. در این نوشتار از روش مطرح شده در [۲۳] استفاده شده است. مقدار ε برای جلوگیری از ناپایداری در نظر گرفته شده است.

۲-۲ برجستگی‌های دیداری

سیستم بینایی انسان توجه ویژه‌ای به مناطق برجسته تصاویر دارد. مدل‌های محاسباتی مؤثری به منظور شبیه‌سازی توجه سیستم بینایی انسان به مناطق برجسته توسط محققان زمینه‌های گوناگون نظیر روانشناسی، عصب‌شناسی و بینایی ماشین مورد مطالعه قرار گرفته است و تاکنون مدل‌های قدرتمند و مؤثر زیادی ارائه شده‌است [۲۸-۲۵].

یکی از ساده‌ترین و مؤثرترین مدل‌های محاسباتی جهت استخراج برجستگی‌های دیداری، مدل SDSP [۲۸] است. سه عامل در ساخت این مدل دخالت دارند: نخست این که، رفتاری که سیستم بینایی انسان در تشخیص اشیاء دارد را می‌توان به خوبی توسط فیلتر میان‌گذر شبیه‌سازی کرد. عامل دوم در نظر گرفتن توجه سیستم بینایی بشر به مرکز تصویر است و در نهایت حساسیت چشم نسبت به رنگ‌های گرم به عنوان عامل سوم لحاظ شده است [۲۹]. برجستگی دیداری اهمیت نسبی نواحی در یک تصویر را نشان می‌دهد.

در این مدل استخراج برجستگی‌های دیداری، از فیلتر گابور لگاریتمی برای به دست آوردن نقاط برجسته تصاویر طبیعی استفاده شده است. هر چند استفاده از هر فیلتر میان‌گذری عملی است [۲۸]. برای این منظور فرض می‌شود $f(x)$ یک تصویر در فضای رنگ RGB است، برای به دست آوردن نقشه‌ی برجستگی‌های دیداری، توسط اعمال فیلتر میان‌گذر، ابتدا تصویر به فضای رنگ $CIE L^*a^*b^*$ انتقال داده می‌شود. پاسخ به صورت سه کانال $f_L(x), f_a(x), f_b(x)$ به دست می‌آید، در نهایت برجستگی $S_F(x)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$S_F(x) = ((f_L * g)^2 + (f_a * g)^2 + (f_b * g)^2)^{\frac{1}{2}}(x) \quad (۵)$$

در عبارت (۵) * نشان دهنده عمل کانولوشن بوده، g فیلتر میان‌گذر گابور لگاریتمی است.

۳-۲ اندازه‌گرادیان

۳ ترکیب ویژگی‌های استخراج شده

گردایان تصویر از جمله ویژگی‌های معروف و کاربردی در ارزیابی کیفیت تصویر است. گردایان، ساختار محلی تصویر را استخراج می‌کند. عملگرهای مختلفی، مثل عملگر sobel، عملگر prewitt [۳۰] و یا عملگر scharr [۳۱] برای محاسبه گردایان وجود دارند. اندازه گردایان تصویر $f(x)$ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (10)$$

که G_x و G_y ، مشتق‌های جزئی برای تصویر $f(x)$ به ترتیب در جهت‌های افقی و عمودی باشند. در روش پیشنهادی همانند محاسبه گردایان در روش [۵] از عملگر Scharr استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$G_x(x) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 3 & 0 & -3 \\ 10 & 0 & -10 \\ 3 & 0 & -3 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$G_y(x) = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 3 & 10 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

۴-۲ استخراج اطلاعات مربوط به رنگ

همان‌گونه که مطرح شد دو ویژگی هم‌فازی و اندازه گردایان هر دو تنها با استفاده از مؤلفه روشنایی تصویر محاسبه می‌شوند. بنابراین هیچ‌کدام از تخریب‌های اعمال شده به روی مؤلفه‌های رنگی را به خوبی ثبت نخواهند کرد. برای این که معیار پیشنهادی به خوبی بتواند برای تخریب رنگی نیز عملکرد مطلوبی داشته باشد، بهتر است از اطلاعات مؤلفه‌های رنگی استفاده شود. برای تصاویر رنگی RGB، ابتدا آنها را به فضای رنگی که اطلاعات روشنایی را از مؤلفه‌های رنگی جدا کند، نگاشت می‌کنیم:

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.63 & 0.27 \\ 0.30 & 0.04 & -0.35 \\ 0.34 & -0.6 & 0.17 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (13)$$

برای نگاشت از فضای رنگ RGB به فضای رنگی که مؤلفه‌های رنگی و مؤلفه روشنایی را جدا کند روش‌های گوناگونی وجود دارد. مدل نگاشت گاوسی که در عبارت (۱۳) آورده شده است، می‌تواند نتایج مطلوبی را فراهم آورد [۹].

۳-۱ نقشه تشابه

در روش پیشنهادی برای به دست آوردن نقشه تشابه بین دو تصویر f_1 و f_2 که به ترتیب تصویر مرجع و تصویر تخریب شده می‌باشند، چهار نقشه تشابه که متشکل از نقشه هم‌فازی، نقشه برجستگی‌های دیداری، نقشه گردایان و در انتها نقشه مؤلفه‌های رنگی محاسبه می‌شوند. PC_1 و PC_2 ، به ترتیب نقشه هم‌فازی، VS_1 و VS_2 ، به ترتیب نقشه برجستگی‌های دیداری، GM_1 و GM_2 ، به ترتیب نقشه اندازه گردایان به دست آمده برای تصاویر f_1 و f_2 می‌باشند. M_1 و M_2 نماینده مؤلفه رنگی M و همچنین N_1 و N_2 نیز به معنی دو مؤلفه رنگی N ، برای تصاویر f_1 و f_2 در نظر گرفته شده است.

۳-۲ معیار GMPCVS

محاسبات روش پیشنهادی شامل دو مرحله کلی است: در مرحله اول، نقشه تشابه محلی محاسبه می‌شود. این نقشه تشابه ماتریسی است که تشابه محلی پیکسل‌ها را نمایش می‌دهد. در مرحله دوم، با یک روش تجمیع مناسب با در نظر گرفتن نقشه تشابه نهایی، مقدار کیفیت تصویر را به دست می‌آوریم. همان‌گونه که در بخش نقشه تشابه عنوان شد، چهار نقشه تشابه به ترتیب برای هم‌فازی، برجستگی‌های دیداری، اندازه گردایان، و در نهایت برای مؤلفه‌های رنگی محاسبه می‌شود. ابتدا، نقشه تشابه بین PC_1 و PC_2 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_{PC}(X) = \frac{2PC_1(x).PC_2(x) + C_1}{PC_1^2(x) + PC_2^2(x) + C_1} \quad (14)$$

در معادله (۱۴) C_1 یک ثابت مثبت برای افزایش پایداری نتیجه است و PC_1 و PC_2 ، نقشه هم‌فازی برای شکل اصلی و تخریب شده در نظر گرفته شده است.

به طور مشابه، برای محاسبه نقشه تشابه بین VS_1 و VS_2 خواهیم داشت:

$$S_{VS}(X) = \frac{2VS_1(x).VS_2(x) + C_2}{VS_1^2(x) + VS_2^2(x) + C_2} \quad (15)$$

در معادله (۱۵) C_2 ثابت و مثبت است. نقشه‌های تشابه برجستگی دیداری با استفاده از عبارت (۹) محاسبه می‌شوند. نقشه اندازه گردایان به دست آمده برای تصویر اصلی و تصویر تخریب شده نیز با هم مقایسه شده و نقشه تشابه آنها را به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$S_{GM}(X) = \frac{2GM_1(x).GM_2(x) + C_3}{GM_1^2(x) + GM_2^2(x) + C_3} \quad (16)$$

که C_3 عددی ثابت و مثبت است. در آخر تشابه بین مؤلفه‌های رنگی را نیز به صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌کنیم:

$$S_C(X) = \frac{2M_1(x).M_2(x) + C_4}{M_1^2(x) + M_2^2(x) + C_4} \cdot \frac{2N_1(x).N_2(x) + C_4}{N_1^2(x) + N_2^2(x) + C_4} \quad (17)$$

۳-۴ ارزیابی معیار پیشنهادی

برای ارزیابی و مقایسه روش پیشنهادی از چهار مجموعه داده بزرگ که برای ارزیابی معیارهای ارزیابی کیفیت تصویر در نظر گرفته شده‌اند، استفاده خواهیم کرد که شامل مجموعه داده‌های TID2013، TID2008، CSIQ، و LIVE است. این مجموعه داده‌ها از نظر تعداد تصاویر مرجع، تعداد تصاویر تخریب شده، تعداد انواع تخریب‌ها و تعداد مشاهده‌کنندگان هم متفاوت هستند. ویژگی‌های این چهار مجموعه داده به صورت خلاصه در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱ - خصوصیات پایگاه داده‌های بررسی شده

| نام مجموعه | تعداد تصاویر مرجع | تعداد تصاویر تخریب شده | انواع تخریب | نوع تصویر | تعداد مشاهده‌کنندگان |
|------------|-------------------|------------------------|-------------|-----------|----------------------|
| TID2013 | ۲۵ | ۳۰۰۰ | ۲۴ | رنگی | ۹۷۱ |
| TID2008 | ۲۵ | ۱۷۰۰ | ۱۷ | رنگی | ۸۳۸ |
| CSIQ | ۳۰ | ۸۶۶ | ۶ | رنگی | ۳۵ |
| LIVE | ۲۹ | ۷۷۹ | ۵ | رنگی | ۱۶۱ |

به طور کلی کارایی مدل‌های ارزیابی کیفیت تصویر از سه جنبه دقت، یکنواختی، و سازگاری مورد بررسی قرار می‌گیرند [۱]. به همین منظور برای ارزیابی معیارهای کیفیت تصویر، معمولاً از چهار معیار $SROCC$ ، $KROCC$ ، $PLCC$ و $RMSE$ استفاده می‌شود.

دو معیار نخست یعنی $SROCC$ و $KROCC$ تنها بر روی ترتیب نقاط داده عمل می‌کنند و فاصله نسبی بین نقاط داده را در نظر نمی‌گیرند. برای محاسبه دو معیار دیگر ابتدا می‌باید بر روی معیارهای انسانی مجموعه داده، یک نگاهت غیرخطی اعمال گردد. سپس بین خروجی نتیجه نگاهت مذکور و معیار به دست آمده همبستگی خطی ($PLCC$) و خطای حاصل ($RMSE$) محاسبه گردد. از آنجایی که غالباً انسان‌ها ناظر نهایی تصاویرند، بهترین ارزیاب کیفیت تصویر نیز خود آنانند. لذا با ارزیابی کیفیت تصویر به کمک انسان (ارزیابی کیفیت تصویر انسانی)، قابل اعتمادترین نمره به کیفیت تصویر انتساب داده می‌شود بدین ترتیب که تصاویر به تعداد قابل قبولی از انسان‌ها نشان داده شده، از آنها خواسته می‌شود که به کیفیت هر تصویر نمره دهند، میانگین این نمرات برای هر تصویر، نمره نهایی کیفیت تصویر خواهد بود که به «MOS» معروف است.

C_4 در عبارت (۱۷) یک ثابت مثبت است.

در نهایت، S_{GM} ، S_{PC} ، S_{VS} ، S_C با هم ترکیب می‌شود، تا تشابه محلی نهایی $S(x)$ بین $f_1(x)$ و $f_2(x)$ محاسبه گردد:

$$S(x) = S_{PC} \cdot S_{VS} \cdot [S_{GM}]^\alpha \cdot [S_C]^\beta \quad (18)$$

در عبارت (۱۸)، دو پارامتر α و β به منظور تنظیم اهمیت نسبی نقشه‌های تشابه به دست آمده برای محاسبه نقشه تشابه نهایی به کار می‌روند.

از آنجایی که ویژگی به دست آمده از هم‌فازی و برجستگی‌های دیداری نسبت به تباین مقاوم هستند از گرادین برای ثبت تغییرات تباین استفاده می‌شود. استفاده از برجستگی‌های دیداری در کنار هم‌فازی می‌تواند با در نظر گرفتن ویژگی‌هایی هم‌چون ارزش گذاری به مرکز تصویر و اهمیت به رنگ‌های گرم عملکرد سیستم بینایی بشر را به شیوه موثرتری لحاظ کند.

برای به دست آوردن یک معیار عددی که نشان‌دهنده کیفیت ارزیابی شده از نقشه تشابه نهایی است، لازم است فرآیند تجمیع به روی نقشه تشابه نهایی اعمال گردد. با توجه به حساسیت سیستم بینایی بشر به برجستگی‌های دیداری، درجه اهمیت نقاط به دست آمده در نقشه تشابه نهایی را می‌توان با برجستگی دیداری وزن‌دهی کرد. در حقیقت می‌توان گفت، مقدار برجستگی دیداری در یک نقطه منعکس‌کننده میزان اهمیت آن نقطه از دید سیستم بینایی بشر در تصویر است. در مرحله تجمیع، برای هر موقعیت x ، از بین f_1 و f_2 هر کدام که دارای مقدار برجستگی دیداری بالاتری باشند، نشان دهنده این است که این موقعیت تاثیر بیشتری در ارزیابی شباهت بین f_1 و f_2 دارد. در این راستا برای وزن‌دهی میزان اهمیت $S(x)$ در محاسبه تشابه نهایی از بیشینه VS_1 و VS_2 استفاده خواهیم کرد. در پایان، معیار پیشنهادی $GMPCVS_SIM$ بین دو تصویر را به صورت رابطه (۱۹) تعریف می‌کنیم:

$$GMPCVS_SIM = \frac{\sum_{x \in \Omega} S(x) \cdot VS_{\max}(x)}{\sum_{x \in \Omega} VS_{\max}(x)} \quad (19)$$

که در معادله (۱۹)، Ω به معنی کل دامنه مکان است که در آن:

$$VS_{\max}(x) = \max(VS_1(x), VS_2(x))$$

۳-۳ نحوه مقداردهی ثابت‌ها

برای تعیین کردن پارامترهایی که به صورت مقادیر ثابت در روش پیشنهادی آورده شده است همانند رویکردی که در [۹] به کار گرفته شده، از یک زیر مجموعه از مجموعه داده TID2008 استفاده شده است. این زیر مجموعه شامل ۸ تصویر مرجع و ۵۴۴ تصویر تخریب شده است. به این منظور آزمایش‌هایی صورت گرفت و مقادیر ثابت‌هایی که منجر به مقدار $SROCC$ بالاتری شدند انتخاب گردید. در نهایت و با توجه به نتایج به دست آمده مقدار ثابت‌ها $\alpha=0.4$ ، $\beta=0.02$ ، $C_1=0.95$ ، $C_2=1.27$ ، $C_3=386$ در نظر گرفته شده‌اند.

Accuracy

Monotonicity

Consistency

Spearman rank order correlation coefficient

Kendall rank order correlation coefficient

Pearson linear correlation coefficient

Root mean square error

Mean Opinion Score

روش پیشنهادی مؤلفه‌های استفاده شده شامل هم‌فازی و اندازه‌گرادیان است و همچنین از برجستگی دیداری برای استخراج ویژگی و تجمیع استفاده شده است، برای مقایسه، ESIM4 انتخاب شده است چرا که معیار ESIM4 از ترکیب دو معیار VSI و FSIMc به دست می‌آید که مؤلفه‌های مذکور در ساخت این دو معیار دخالت دارند.

با توجه به عملکرد غیرخطی سیستم بینایی بشر، بر این گاشت غیرخطی معیار محاسباتی و معیار انسانی از تابع زیر که در [۳۲] ارائه شده است، استفاده می‌شود:

$$f(x) = \beta_1 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1 + e^{\beta_2(x - \beta_3)}} \right) + \beta_4 x + \beta_5 \quad (20)$$

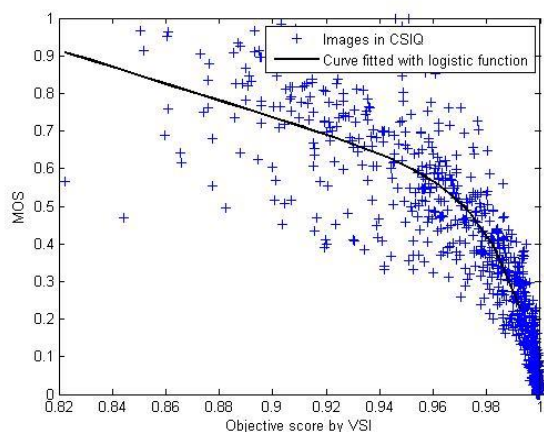
که $\beta_i, i = 1, 2, \dots, 5$ پارامترهای مدل نگاشت هستند. برای مقایسه، روش‌های متفاوتی مانند [5] FSIMc، [9] VSI، [18] ESIM4، [16] GDRW و [17] SLW به عنوان روش‌هایی برای ارزیابی کیفیت تصاویر در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این که در

جدول ۲ مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های مرجع کامل بررسی شده و ارایه میانگین معمولی و وزن‌دار

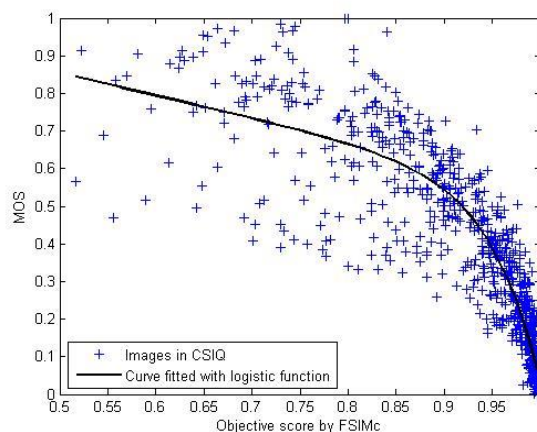
| GMPCVS_SIM | ESIM4 | GDRW | VSI | FSIMc | IGM | SLW | GSM | MAD | IWSSIM | SSIM | معیار | مجموعه داده |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|---------|-------------|
| ۰/۸۹۵ | ۰/۸۸۵ | ۰/۸۸۰ | ۰/۸۹۷ | ۰/۸۵۱ | ۰/۸۱۰ | ۰/۷۹۷ | ۰/۷۹۵ | ۰/۷۸۱ | ۰/۷۷۸ | ۰/۷۴۲ | SROCC | TID2013 |
| ۰/۷۱۶ | ۰/۷۰۶ | ۰/۶۹۸ | ۰/۷۱۸ | ۰/۶۶۷ | ۰/۶۴۰ | ۰/۶۰۳ | ۰/۶۲۶ | ۰/۶۰۴ | ۰/۵۹۸ | ۰/۵۵۹ | KROCC | 3000 |
| ۰/۹۰۴ | ۰/۹۰۰ | ۰/۸۹۱ | ۰/۹۰۰ | ۰/۸۷۷ | ۰/۸۵۶ | ۰/۸۲۲ | ۰/۸۴۶ | ۰/۸۲۷ | ۰/۸۳۲ | ۰/۷۹۰ | PROCC | |
| ۰/۵۲۹ | ۰/۵۴۲ | ۰/۵۶۲ | ۰/۵۴۰ | ۰/۵۹۶ | ۰/۶۴۱ | ۰/۷۱۱ | ۰/۶۶۰ | ۰/۶۹۸ | ۰/۶۸۸ | ۰/۶۶۱ | RMSE | |
| ۰/۹۰۰ | ۰/۹۰۲ | ۰/۸۹۷ | ۰/۸۹۸ | ۰/۸۸۴ | ۰/۸۹۰ | ۰/۸۸۷ | ۰/۸۵۰ | ۰/۸۳۴ | ۰/۸۵۶ | ۰/۷۷۵ | SROCC | TID2008 |
| ۰/۷۱۵ | ۰/۷۲۱ | ۰/۷۱۳ | ۰/۷۱۲ | ۰/۶۹۹ | ۰/۷۱۰ | ۰/۷۱۰ | ۰/۶۶۰ | ۰/۶۴۵ | ۰/۶۶۴ | ۰/۵۷۷ | KROCC | 1700 |
| ۰/۸۸۷ | ۰/۸۸۷ | ۰/۸۸۲ | ۰/۸۷۶ | ۰/۸۷۶ | ۰/۸۸۶ | ۰/۸۹۰ | ۰/۸۴۲ | ۰/۸۳۱ | ۰/۸۵۸ | ۰/۷۷۳ | PROCC | |
| ۰/۶۲۰ | ۰/۶۱۹ | ۰/۶۳۲ | ۰/۶۴۷ | ۰/۶۴۷ | ۰/۶۲۳ | ۰/۶۱۹ | ۰/۷۲۴ | ۰/۷۴۷ | ۰/۶۹۰ | ۰/۸۵۱ | RMSE | |
| ۰/۹۵۱ | ۰/۹۴۱ | ۰/۹۵۹ | ۰/۹۴۲ | ۰/۹۳۱ | ۰/۹۴۰ | ۰/۹۱۴ | ۰/۹۱۱ | ۰/۹۴۷ | ۰/۹۲۱ | ۰/۸۷۶ | SROCC | CSIQ |
| ۰/۸۰۲ | ۰/۷۸۶ | ۰/۸۱۷ | ۰/۷۸۶ | ۰/۷۶۹ | ۰/۷۸۸ | ۰/۷۴۵ | ۰/۷۳۷ | ۰/۷۹۷ | ۰/۷۵۳ | ۰/۶۹۱ | KROCC | 866 |
| ۰/۹۴۷ | ۰/۹۲۹ | ۰/۹۵۴ | ۰/۹۲۸ | ۰/۹۱۹ | ۰/۹۲۸ | ۰/۹۲۰ | ۰/۸۹۶ | ۰/۹۵۰ | ۰/۹۱۴ | ۰/۸۶۱ | PLCC | |
| ۰/۰۸۵ | ۰/۰۹۷ | ۰/۰۷۹ | ۰/۰۹۸ | ۰/۱۰۳ | ۰/۰۹۸ | ۰/۱۰۳ | ۰/۱۱۶ | ۰/۰۸۲ | ۰/۱۰۶ | ۰/۱۳۳ | RMSE | |
| ۰/۹۵۶ | ۰/۹۶۳ | ۰/۹۶۱ | ۰/۹۵۲ | ۰/۹۶۵ | ۰/۹۵۸ | ۰/۹۵۷ | ۰/۹۵۶ | ۰/۹۶۷ | ۰/۹۵۷ | ۰/۹۴۸ | SROCC | LIVE |
| ۰/۸۱۵ | ۰/۸۳۱ | ۰/۸۲۸ | ۰/۸۰۶ | ۰/۸۳۶ | ۰/۸۲۵ | ۰/۸۲۴ | ۰/۸۱۵ | ۰/۸۴۲ | ۰/۸۱۸ | ۰/۷۹۶ | KROCC | 779 |
| ۰/۹۵۳ | ۰/۹۶۱ | ۰/۹۶۰ | ۰/۹۴۸ | ۰/۹۶۱ | ۰/۹۵۷ | ۰/۹۵۹ | ۰/۹۵۱ | ۰/۹۶۸ | ۰/۹۵۲ | ۰/۹۴۵ | PROCC | |
| ۸/۳۲۰ | ۷/۶۰۱ | ۷/۶۲۵ | ۸/۶۸۲ | ۷/۵۳۰ | ۷/۹۲۴ | ۴/۶۰۸ | ۸/۴۳۳ | ۶/۹۰۷ | ۸/۳۴۷ | ۸/۹۴۶ | RMSE | |
| ۰/۹۱۱ | ۰/۹۰۷ | ۰/۹۰۵ | ۰/۹۱۰ | ۰/۸۸۵ | ۰/۸۶۷ | ۰/۸۵۷ | ۰/۸۴۵ | ۰/۸۴۰ | ۰/۸۴۰ | ۰/۷۹۴ | AvSROCC | Weighted |
| ۰/۷۴۰ | ۰/۷۳۶ | ۰/۷۳۴ | ۰/۷۳۷ | ۰/۷۱۰ | ۰/۷۰۲ | ۰/۶۷۸ | ۰/۶۷۳ | ۰/۶۷۰ | ۰/۶۶۴ | ۰/۶۱۱ | AVKROCC | Mean |
| ۰/۹۱۱ | ۰/۹۰۸ | ۰/۹۰۶ | ۰/۹۰۳ | ۰/۸۹۳ | ۰/۸۸۶ | ۰/۸۷۰ | ۰/۸۶۵ | ۰/۸۶۲ | ۰/۸۶۵ | ۰/۸۱۴ | AvPROCC | |
| ۰/۹۲۵ | ۰/۹۲۳ | ۰/۹۲۴ | ۰/۹۲۲ | ۰/۹۰۸ | ۰/۹۰۰ | ۰/۸۸۹ | ۰/۸۷۸ | ۰/۸۸۲ | ۰/۸۷۸ | ۰/۸۳۵ | AvSROCC | Mean |
| ۰/۷۶۲ | ۰/۷۶۱ | ۰/۷۶۴ | ۰/۷۵۶ | ۰/۷۴۳ | ۰/۷۴۱ | ۰/۷۲۰ | ۰/۷۰۹ | ۰/۷۲۲ | ۰/۷۰۸ | ۰/۶۵۶ | AVKROCC | |
| ۰/۹۲۳ | ۰/۹۱۹ | ۰/۹۲۲ | ۰/۹۱۳ | ۰/۹۰۸ | ۰/۹۰۷ | ۰/۸۹۸ | ۰/۸۸۴ | ۰/۸۹۴ | ۰/۸۸۹ | ۰/۸۴۲ | AvPROCC | |

جدول ۳ مقایسه روش پیشنهادی با روشهای مرجع کامل به لحاظ تخریب‌های مختلف (همبستگی spearman)

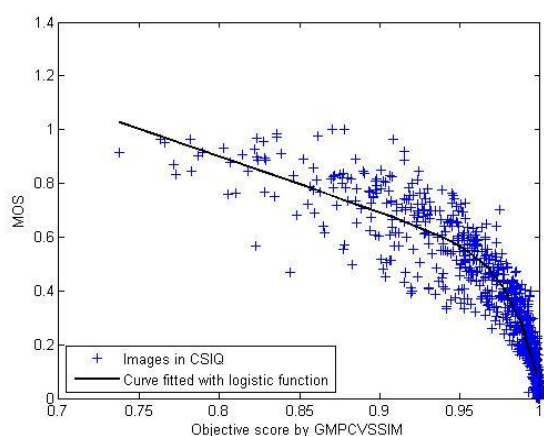
| GMPCVS_SIM | ESIM4 | GDRW | VSI | FSIMc | GSM | MAD | IWSSIM | SSIM | انواع تخریب | مجموعه | |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|-----------------|-------------|
| ۰/۹۳۵ | ۰/۹۲۷۷ | ۰/۹۴۷ | ۰/۹۴۶ | ۰/۹۱۰۱ | ۰/۹۰۶۴ | ۰/۸۸۴۳ | ۰/۸۴۳۸ | ۰/۸۶۷۱ | AGN | TID2013 3000 | |
| ۰/۸۶۰۷ | ۰/۸۵۵۷ | ۰/۸۶۷۵ | ۰/۸۷۰۵ | ۰/۸۵۳۷ | ۰/۸۱۷۵ | ۰/۸۰۱۹ | ۰/۷۵۱۵ | ۰/۷۷۲۶ | ANC | | |
| ۰/۹۲۳۸ | ۰/۹۲۱۱ | ۰/۹۳۸۶ | ۰/۹۳۶۷ | ۰/۸۹ | ۰/۹۱۵۸ | ۰/۸۹۱۱ | ۰/۸۱۶۷ | ۰/۸۵۱۵ | SCN | | |
| ۰/۷۶۸۵ | ۰/۷۹۱۳ | ۰/۷۱۱۶ | ۰/۷۶۹۷ | ۰/۸۰۹۴ | ۰/۷۲۹۳ | ۰/۷۳۸ | ۰/۸۰۲ | ۰/۷۷۶۷ | MN | | |
| ۰/۹۱۴۳ | ۰/۹۱۰۲ | ۰/۹۱۷۸ | ۰/۹۲ | ۰/۹۰۴ | ۰/۸۸۶۹ | ۰/۸۸۷۶ | ۰/۸۵۵۳ | ۰/۸۶۳۴ | HFN | | |
| ۰/۸۵۸۱ | ۰/۸۵۰۹ | ۰/۸۰۳۸ | ۰/۸۷۴۱ | ۰/۸۲۵۱ | ۰/۷۹۶۵ | ۰/۲۷۶۹ | ۰/۷۲۸۱ | ۰/۷۵۰۳ | IN | | |
| ۰/۸۷ | ۰/۸۸۰۱ | ۰/۸۹۵۵ | ۰/۸۷۴۸ | ۰/۸۸۰۷ | ۰/۸۸۴۱ | ۰/۸۵۱۴ | ۰/۸۴۶۸ | ۰/۸۶۵۷ | QN | | |
| ۰/۹۵۹۹ | ۰/۹۵۹۱ | ۰/۹۲۰۶ | ۰/۹۶۱۲ | ۰/۹۵۵۱ | ۰/۹۶۸۹ | ۰/۹۳۱۹ | ۰/۹۷۰۱ | ۰/۹۶۶۸ | GB | | |
| ۰/۹۴۱۳ | ۰/۹۳۹۹ | ۰/۹۵۳۹ | ۰/۹۴۸۴ | ۰/۹۳۳ | ۰/۹۴۳۲ | ۰/۹۲۵۲ | ۰/۹۱۵۲ | ۰/۹۲۵۴ | DEN | | |
| ۰/۹۴۵۹ | ۰/۹۴۲۶ | ۰/۹۵۱۳ | ۰/۹۵۴۱ | ۰/۹۳۳۹ | ۰/۹۲۸۴ | ۰/۹۲۱۷ | ۰/۹۱۸۷ | ۰/۹۲ | JPEG | | |
| ۰/۹۶۵۹ | ۰/۹۶۴۷ | ۰/۹۶۵۷ | ۰/۹۷۰۶ | ۰/۹۵۸۹ | ۰/۹۶۰۲ | ۰/۹۵۱۱ | ۰/۹۵۰۶ | ۰/۹۴۶۸ | JP2K | | |
| ۰/۹۱۸۶ | ۰/۹۰۱ | ۰/۸۸۴۷ | ۰/۹۲۱۶ | ۰/۸۶۱ | ۰/۸۵۱۲ | ۰/۸۲۸۳ | ۰/۸۳۸۸ | ۰/۸۴۹۳ | JGTE | | |
| ۰/۹۱۷۱ | ۰/۹۱۱ | ۰/۹۱۷۴ | ۰/۹۲۲۸ | ۰/۸۹۱۹ | ۰/۹۱۸۲ | ۰/۸۷۸۸ | ۰/۸۶۵۶ | ۰/۸۸۲۸ | J2TE | | |
| ۰/۸۰۴۶ | ۰/۸۰۰۷ | ۰/۸۱۳۷ | ۰/۸۰۶ | ۰/۷۹۳۷ | ۰/۸۱۳ | ۰/۸۳۱۵ | ۰/۸۰۱۱ | ۰/۷۸۲۱ | NEPN | | |
| ۰/۲۱۱۷ | ۰/۴۴۹۴ | ۰/۲۶۲۷ | ۰/۱۷۱۳ | ۰/۵۵۳۲ | ۰/۶۴۱۸ | ۰/۲۸۱۲ | ۰/۳۷۱۷ | ۰/۵۷۲ | Block | | |
| ۰/۷۵۶۹ | ۰/۷۶۳۹ | ۰/۷۵۹۷ | ۰/۷۷ | ۰/۷۴۸۷ | ۰/۷۸۷۵ | ۰/۶۴۵ | ۰/۷۸۳۳ | ۰/۷۷۵۲ | MS | | |
| ۰/۴۶۲۴ | ۰/۴۷۲۲ | ۰/۳۷۹۵ | ۰/۴۷۵۴ | ۰/۴۶۷۹ | ۰/۴۸۵۷ | ۰/۱۹۷۲ | ۰/۴۵۹۳ | ۰/۳۷۷۵ | CTC | | |
| ۰/۸۰۰۵ | ۰/۸۲۴۵ | ۰/۷۹۸ | ۰/۸۱ | ۰/۸۳۵۹ | ۰/۳۵۷۸ | ۰/۰۵۷۵ | ۰/۴۱۹۶ | ۰/۴۱۴۱ | CCS | | |
| ۰/۹۰۰۳ | ۰/۸۸۸۱ | ۰/۸۹۰۴ | ۰/۹۱۱۷ | ۰/۸۵۶۹ | ۰/۸۳۴۸ | ۰/۸۴۰۹ | ۰/۷۷۲۸ | ۰/۷۸۰۳ | MGN | | |
| ۰/۹۲۰۱ | ۰/۹۱۷۹ | ۰/۹۳۰۲ | ۰/۹۲۴۳ | ۰/۹۱۳۵ | ۰/۹۱۲۴ | ۰/۹۰۶۴ | ۰/۸۷۶۲ | ۰/۸۵۶۶ | CN | | |
| ۰/۹۵۴ | ۰/۹۵۴۸ | ۰/۹۶۳۱ | ۰/۹۵۶۴ | ۰/۹۴۸۵ | ۰/۹۵۶۳ | ۰/۹۴۴۳ | ۰/۹۰۳۷ | ۰/۹۰۵۷ | LCNI | | |
| ۰/۸۷۸۵ | ۰/۸۸۴۶ | ۰/۹۰۴۴ | ۰/۸۸۳۹ | ۰/۸۸۱۵ | ۰/۸۹۷۳ | ۰/۸۷۴۵ | ۰/۸۴۰۱ | ۰/۸۵۴۲ | ICQD | | |
| ۰/۸۹۱۲ | ۰/۸۹۳۸ | ۰/۸۶۰۹ | ۰/۸۹۰۶ | ۰/۸۹۲۵ | ۰/۸۸۲۳ | ۰/۸۳۱ | ۰/۸۶۸۲ | ۰/۸۷۷۵ | CHA | | |
| ۰/۹۶۰۴ | ۰/۹۶۰۱ | ۰/۹۶۶۷ | ۰/۹۶۲۸ | ۰/۹۵۷۶ | ۰/۹۶۶۸ | ۰/۹۳۳۹ | ۰/۹۴۷۴ | ۰/۹۴۶۱ | SSR | | |
| ۰/۹۱ | ۰/۹۰۲۹ | ۰/۹۲۰۷ | ۰/۹۲۲۹ | ۰/۸۷۵۸ | ۰/۸۶۰۶ | ۰/۷۷۲۸ | ۰/۷۸۶۹ | ۰/۸۱۰۷ | AGN | TID2008 1700 | |
| ۰/۸۹۹۴ | ۰/۸۹۹۳ | ۰/۹۰۳۷ | ۰/۹۱۱۸ | ۰/۸۹۳۱ | ۰/۸۰۹۱ | ۰/۷۷۹۳ | ۰/۷۹۲ | ۰/۸۰۲۹ | ANC | | |
| ۰/۹۱۴۱ | ۰/۹۰۹۵ | ۰/۹۲۱۹ | ۰/۹۲۹۶ | ۰/۸۷۱۱ | ۰/۸۹۴۱ | ۰/۷۶۶۵ | ۰/۷۷۱۴ | ۰/۸۱۴۴ | SCN | | |
| ۰/۷۷۲۷ | ۰/۸۰۰۹ | ۰/۷۱۴۲ | ۰/۷۷۳۴ | ۰/۸۲۶۴ | ۰/۷۴۵۲ | ۰/۷۲۹۵ | ۰/۸۰۸۷ | ۰/۷۷۹۵ | MN | | |
| ۰/۹۲۱ | ۰/۹۱۷۳ | ۰/۹۱۹۹ | ۰/۹۲۵۳ | ۰/۹۱۵۶ | ۰/۸۹۴۵ | ۰/۸۸۱۱ | ۰/۸۶۶۲ | ۰/۸۷۲۹ | HFN | | |
| ۰/۸۱۱۸ | ۰/۷۹۹۸ | ۰/۷۳۲۴ | ۰/۸۲۹۸ | ۰/۷۷۱۹ | ۰/۷۲۳۵ | ۰/۶۴۷۱ | ۰/۶۴۶۴ | ۰/۶۳۲۲ | IN | | |
| ۰/۸۶۴۷ | ۰/۸۷۷۵ | ۰/۸۸۴۱ | ۰/۸۷۳۱ | ۰/۸۷۲۶ | ۰/۸۸ | ۰/۸۲۷ | ۰/۸۱۷۷ | ۰/۸۵۳۱ | QN | | |
| ۰/۹۵۳ | ۰/۹۵۲۸ | ۰/۹۱۲۳ | ۰/۹۵۲۹ | ۰/۹۴۷۲ | ۰/۹۶ | ۰/۹۳۳ | ۰/۹۶۳۶ | ۰/۹۵۴۴ | GB | | |
| ۰/۹۶۵۲ | ۰/۹۶۶۹ | ۰/۹۷۶ | ۰/۹۶۹۳ | ۰/۹۶۱۸ | ۰/۹۷۲۵ | ۰/۹۲۸۶ | ۰/۹۴۷۳ | ۰/۹۵۳ | DEN | | |
| ۰/۹۴۹۲ | ۰/۹۴۲۷ | ۰/۹۵۸۹ | ۰/۹۶۱۶ | ۰/۹۲۹۴ | ۰/۹۳۹۳ | ۰/۹۱۷۴ | ۰/۹۱۸۴ | ۰/۹۲۵۲ | JPEG | | |
| ۰/۹۸۱۸ | ۰/۹۸۲ | ۰/۹۸۱۲ | ۰/۹۸۴۸ | ۰/۹۷۸ | ۰/۹۷۵۸ | ۰/۹۵۱۵ | ۰/۹۷۳۸ | ۰/۹۶۲۵ | JP2K | | |
| ۰/۹۱۲ | ۰/۹۰۶۸ | ۰/۸۹۱ | ۰/۹۱۶ | ۰/۸۷۵۶ | ۰/۸۷۹ | ۰/۸۰۵۵ | ۰/۸۵۸۸ | ۰/۸۶۷۸ | JGTE | | |
| ۰/۸۸۵۲ | ۰/۸۸۱۴ | ۰/۸۸۶۶ | ۰/۸۹۴۲ | ۰/۸۵۵۵ | ۰/۸۹۳۶ | ۰/۸۳۹۴ | ۰/۸۲۰۳ | ۰/۸۵۷۷ | J2TE | | |
| ۰/۷۷۲۱ | ۰/۷۶۱۴ | ۰/۷۶۳۶ | ۰/۷۶۹۹ | ۰/۷۵۱۴ | ۰/۷۳۸۶ | ۰/۸۲۸۷ | ۰/۷۷۲۴ | ۰/۷۱۰۷ | NEPN | | |
| ۰/۶۹ | ۰/۷۸۵۴ | ۰/۶۶۶۴ | ۰/۶۲۹۵ | ۰/۸۴۶۴ | ۰/۸۸۶۲ | ۰/۷۹۷ | ۰/۷۶۲۳ | ۰/۸۴۶۲ | Block | | |
| ۰/۶۵۰۵ | ۰/۶۷۱۵ | ۰/۶۶۴۶ | ۰/۶۷۱۴ | ۰/۶۵۵۴ | ۰/۷۱۹ | ۰/۵۱۶۳ | ۰/۷۰۶۷ | ۰/۷۲۳۱ | MS | | |
| ۰/۶۴۱۲ | ۰/۶۵۵ | ۰/۵۲۸۴ | ۰/۶۵۵۷ | ۰/۶۵۱ | ۰/۶۶۹۱ | ۰/۲۷۲۳ | ۰/۶۳۰۱ | ۰/۵۲۴۶ | CTC | | |
| ۰/۹۵۸ | ۰/۹۶۳۶ | ۰/۹۶۸۶ | ۰/۹۶۳۶ | ۰/۹۳۵۹ | ۰/۹۴۴ | ۰/۹۵۴۱ | ۰/۹۳۸ | ۰/۸۹۷۴ | AGWN | | CSIQ 866 |
| ۰/۹۶۸۴ | ۰/۹۶۱۷ | ۰/۹۶۶۹ | ۰/۹۶۱۸ | ۰/۹۶۶۴ | ۰/۹۶۳۲ | ۰/۹۶۱۵ | ۰/۹۶۶۲ | ۰/۹۵۴۶ | JPEG | | |
| ۰/۹۷۴۴ | ۰/۹۶۹۳ | ۰/۹۷۵۱ | ۰/۹۶۹۴ | ۰/۹۷۰۴ | ۰/۹۶۴۸ | ۰/۹۷۵۲ | ۰/۹۶۸۳ | ۰/۹۶۰۶ | JP2K | | |
| ۰/۹۵۹۶ | ۰/۹۶۳۷ | ۰/۹۶۲۳ | ۰/۹۶۳۸ | ۰/۹۳۷ | ۰/۹۳۸۷ | ۰/۹۵۷ | ۰/۹۰۵۹ | ۰/۸۹۲۲ | AGPN | | |
| ۰/۹۷۵۳ | ۰/۹۶۱۹ | ۰/۹۷۳ | ۰/۹۶۷۹ | ۰/۹۷۲۹ | ۰/۹۵۸۹ | ۰/۹۶۰۲ | ۰/۹۷۸۲ | ۰/۹۶۰۹ | GB | | |
| ۰/۹۵۰۵ | ۰/۹۵۰۳ | ۰/۹۲۸۲ | ۰/۹۵۰۴ | ۰/۹۴۲۸ | ۰/۹۳۵۴ | ۰/۹۲۰۷ | ۰/۹۵۳۹ | ۰/۹۶۲۲ | GCD | | |
| ۰/۹۶۹۹ | ۰/۹۷۱۴ | ۰/۹۶۹۷ | ۰/۹۶۰۴ | ۰/۹۷۲۴ | ۰/۹۷ | ۰/۹۶۷۶ | ۰/۹۶۴۹ | ۰/۹۶۱۴ | JP2K | LIVE 779 | |
| ۰/۹۸۱۴ | ۰/۹۸۴ | ۰/۹۸۰۵ | ۰/۹۷۶۱ | ۰/۹۸۴ | ۰/۹۷۷۸ | ۰/۹۷۶۴ | ۰/۹۸۰۸ | ۰/۹۷۶۴ | JPEG | | |
| ۰/۹۷۹۵ | ۰/۹۷۹۴ | ۰/۹۸۱۱ | ۰/۹۸۳۵ | ۰/۹۷۱۶ | ۰/۹۷۷۴ | ۰/۹۸۴۴ | ۰/۹۶۶۷ | ۰/۹۶۹۴ | AWGN | | |
| ۰/۹۵۹۷ | ۰/۹۶۵۹ | ۰/۹۵۷۵ | ۰/۹۵۲۷ | ۰/۹۷۰۸ | ۰/۹۵۱۸ | ۰/۹۴۶۵ | ۰/۹۷۲ | ۰/۹۵۱۷ | GB | | |
| ۰/۹۴۲۲ | ۰/۹۴۹۷ | ۰/۹۴۵ | ۰/۹۴۳ | ۰/۹۵۱۹ | ۰/۹۴۰۲ | ۰/۹۵۶۹ | ۰/۹۴۴۲ | ۰/۹۵۵۶ | FF | | |



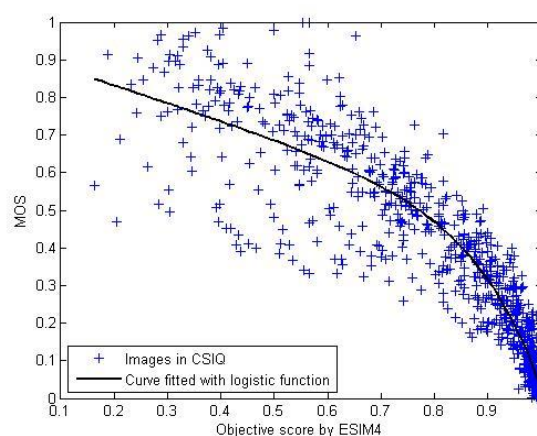
ب



الف



د



ج

شکل ۳ نمودار پراکندگی میان معیار انسانیو معیارهای الف- FSIMc ب- VSI ج- ESIM4-د- GMPCVS-SIM (روش پیشنهادی) بر روی مجموعه داده CSIQ

در جدول ۳، ارزیابی کیفیت روش پیشنهادی و چند روش مطرح مرجع کامل بر اساس همبستگی Spearman برای تخریب‌های مختلف آورده شده است. در جدول ۳ نیز دو معیاری که از سایر روش‌ها بهتر نتیجه گرفته‌اند با قلم پررنگ مشخص شده‌اند. نتایج به دست آمده از جدول‌های ۲ و ۳ نشان‌گر این مطلب است که روش پیشنهادی در تخریب‌های متفاوت عملکرد پایدار داشته است و نسبت به تغییر مدل تخریب مقاوم می‌باشد. در شکل ۳ نمودار پراکندگی بین معیار انسانی و معیار محاسباتی، برای روش پیشنهادی و چند معیار ارزیابی کیفیت شاخص بر روی مجموعه داده CSIQ مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که در نمودارهای پراکندگی ارائه شده در شکل ۳ محور افقی معیار محاسباتی و محور عمودی معیار انسانی را نشان می‌دهد که برای پایگاه داده‌ی CSIQ این مقدار بین صفر و یک نرمال شده است [۶]. با بررسی نمودار و چگونگی پراکندگی داده‌ها مشخص می‌شود که الگوریتم پیشنهادی از عملکرد مطلوبی در همبستگی با معیار انسانی برخوردار است.

در جدول ۲، دو معیاری که نتایج آن‌بهترین است با قلم پررنگ مشخص شده است. هر چه مقدار معیارهای همبستگی SROCC، KROCC و PLCC بزرگ‌تر باشد به این معنی است که روش محاسباتی تطابق بهتری با معیار انسانی دارد. در مقابل هر چه RMSE کوچک‌تر باشد معنای خطای کم‌تر برای روش مورد بررسی است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی بر روی مجموعه داده بزرگ، TID2008، TID2013 و CSIQ در زمره دو روش برتر قرار می‌گیرد. افزون بر این تقریباً بر روی تمامی مجموعه‌های داده‌ها عملکرد بهتری نسبت به معیار FSIMc دارد و نتایج نسبت به VSI اکثراً بهتر یا نزدیک به آن می‌باشد. در مقایسه با دو روش به روز ESIM4 و GDRW، روش پیشنهادی برای دو مجموعه داده از میان چهار مجموعه داده‌ی مورد بررسی به عملکردی بهتر دست می‌یابد. علاوه بر این، میانگین و میانگین وزن‌دار نتایج روش پیشنهادی نشان‌گر بهترین عملکرد است. با توجه به نتایج میانگین و میانگین وزن‌دار مشخص است که به طور کلی معیار GMPCVS-SIM (روش پیشنهادی) به بهترین نتایج دست یافته است.

۴ نتیجه‌گیری

امروزه با گسترده‌گی استفاده از تصاویر دیجیتال عملاً به معیارهایی نیاز است که کیفیت دیداری تصویر را همسان با سیستم بینایی بشر ارزیابی کنند. در این راستا بررسی سیستم بینایی بشر و چگونگی کارکرد آن، می‌تواند کمک کننده باشد. طبق بررسی‌های انجام شده مشخص شده است چشم انسان نسبت به تغییرات ساختار بسیار حساس است. در این مقاله سعی شده است ویژگی‌هایی از سیگنال تصویر استخراج گردد، که تغییرات ساختاری را نشان دهد. در روش ارائه شده، چهار نقشه تشابه که متشکل از نقشه هم‌فازی، نقشه برجستگی‌های دیداری، نقشه اندازه‌گرادیان و در انتها نقشه مؤلفه‌های رنگی محاسبه می‌شوند و در نهایت با یک سیستم وزن‌دهی کارآمد که برگرفته از نقشه برجستگی‌های دیداری است، تجمع نهایی صورت پذیرفت. آزمایش‌ها نشان می‌دهد، که با وجود پیچیدگی محاسباتی قابل قبول نتایج با معیار انسانی همبستگی مطلوبی دارد.

مراجع

- Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2016, pp. 1090-1094.
- [12] M. C. Q. Farias and W. Y. L. Akamine, "On performance of image quality metrics enhanced with visual attention computational models," *Electronics Letters*, vol. 48, pp. 631-633, 2012.
- [13] Q. Ma and L. Zhang, "Image quality assessment with visual attention," in *2008 19th International Conference on Pattern Recognition*, 2008, pp. 1-4.
- [14] A. K. Moorthy and A. C. Bovik, "Visual Importance Pooling for Image Quality Assessment," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 3, pp. 193-201, 2009.
- [15] W. Zhang, A. Borji, Z. Wang, P. L. Callet, and H. Liu, "The Application of Visual Saliency Models in Objective Image Quality Assessment: A Statistical Evaluation," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 27, pp. 1266-1278, 2016.
- [16] Z. Shi, K. Chen, K. Pang, J. Zhang, and Q. Cao, "A perceptual image quality index based on global and double-random window similarity," *Digital Signal Processing*, vol. 60, pp. 277-286, 2017/01/01/2017.
- [17] Y. Yuan, Q. Guo, and X. Lu, "Image quality assessment: A sparse learning way," *Neurocomputing*, vol. 159, pp. 227-241, 2015/07/02/2015.
- [18] M. Oszust, "Decision Fusion for Image Quality Assessment using an Optimization Approach," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 23, pp. 65-69, 2016.
- [19] P. Kovese, "Edges are not just steps," in *Proceedings of the Fifth Asian Conference on Computer Vision*, 2002, pp. 22-8.
- [20] L. Henriksson, A. Hyvärinen, and S. Vanni, "Representation of Cross-Frequency Spatial Phase Relationships in Human Visual Cortex," *The Journal of Neuroscience*, vol. 29, pp. 14342-14351, 2009.
- [21] M. C. Morrone and D. Burr, "Feature detection in human vision: A phase-dependent energy model," *Proc. R. Soc. Lond. B*, vol. 235, pp. 221-245, 1988.
- [22] M. C. Morrone and R. A. Owens, "Feature detection from local energy," *Pattern Recognition Letters*, vol. 6, pp. 303-313, 1987/12/01/1987.
- [23] P. Kovese, "Image features from phase congruency," *Videre: Journal of computer vision research*, vol. 1, pp. 1-26, 1999.
- [24] P. Kovese, "Symmetry and asymmetry from local phase," presented at the Tenth Australian joint conference on artificial intelligence, 1997.
- [25] P. L. Rosin, "A simple method for detecting salient regions," *Pattern Recognition*, vol. 42, pp. 2363-2371, 2009/11/01/2009.
- [26] S. Bernhard, P. John, and H. Thomas, "Graph-Based Visual Saliency," in *Advances in Neural Information Processing Systems 19: Proceedings of the 2006 Conference*, ed: MIT Press, 2007, pp. 545-552.
- [27] H. J. Seo and P. Milanfar, "Static and space-time visual saliency detection by self-resemblance," *Journal of Vision*, vol. 9, pp. 15-15, 2009.
- [28] L. Zhang, Z. Gu, and H. Li, "SDSP: A novel saliency detection method by combining simple priors," in *2013 IEEE International Conference on Image Processing*, 2013, pp. 171-175.
- [29] X. Shen and Y. Wu, "A unified approach to salient object detection via low rank matrix recovery," in *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2012, pp. 853-860.
- [30] R. Jain, R. Kasturi, and B. G. Schunck, *Machine Vision*: McGraw-Hill, 1995.
- [31] B. Jähne, H. Haussecker, and P. Geissler, *Handbook of Computer Vision and Applications: Systems and applications*: Academic Press, 1999.
- [32] H. R. Sheikh, M. F. Sabir, and A. C. Bovik, "A Statistical Evaluation of Recent Full Reference Image Quality Assessment Algorithms," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 15, pp. 3440-3451, 2006.
- [1] Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: From error visibility to structural similarity," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 600-612, Apr 2004.
- [2] Z. Wang, E. P. Simoncelli, and A. C. Bovik, "Multiscale structural similarity for image quality assessment," in *Signals, Systems and Computers, 2003. Conference Record of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on*, 2003, pp. 1398-1402 Vol.2.
- [3] C. Li and A. C. Bovik, "Three-component weighted structural similarity index," in *IS&T/SPIE Electronic Imaging*, 2009, p. 9.
- [4] G. h. Chen, C. l. Yang, and S. l. Xie, "Gradient-Based Structural Similarity for Image Quality Assessment," in *2006 International Conference on Image Processing*, 2006, pp. 2929-2932.
- [5] Z. Lin, D. Zhang, M. Xuanqin, and D. Zhang, "FSIM: A Feature Similarity Index for Image Quality Assessment," *Image Processing, IEEE Transactions on*, vol. 20, pp. 2378-2386, 2011.
- [6] E. C. Larson and D. M. Chandler, "Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 19, pp. 011006-011006-21, 2010.
- [7] A. Liu, W. Lin, and M. Narwaria, "Image Quality Assessment Based on Gradient Similarity," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 21, pp. 1500-1512, 2012.
- [8] W. Xue, L. Zhang, X. Mou, and A. C. Bovik, "Gradient Magnitude Similarity Deviation: A Highly Efficient Perceptual Image Quality Index," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 23, pp. 684-695, 2014.
- [9] L. Zhang, Y. Shen, and H. Li, "VSI: A Visual Saliency-Induced Index for Perceptual Image Quality Assessment," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 23, pp. 4270-4281, 2014.
- [10] J. M. Geusebroek, R. v. d. Boomgaard, A. W. M. Smeulders, and H. Geerts, "Color invariance," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 23, pp. 1338-1350, 2001.
- [11] W. Zhang, Y. Tian, X. Zha, and H. Liu, "Benchmarking state-of-the-art visual saliency models for image quality assessment," in *2016 IEEE International Conference on*



گونا رحمانیانی در سال ۹۳ مدرک کارشناسی خود را در گرایش نرم افزار و در سال ۹۵ کارشناسی ارشد را در گرایش معماری کامپیوتر از دانشگاه خوارزمی اخذ نموده است. از علاقه‌مندی‌های ایشان می‌توان به یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، تشخیص اشیا و پردازش تصاویر اشاره نمود.



آزاده منصوری دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی کامپیوتر از دانشگاه شیراز است. همچنین مدارک کارشناسی ارشد و دکتری را به ترتیب از دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات و دانشگاه شهید بهشتی اخذ نموده است. او اکنون استادیار گروه مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه خوارزمی است.

زمینه‌های تحقیقاتی ایشان تحلیل محتوای دیجیتال شامل تشخیص جعل در رسانه‌ی دیجیتال، ارزیابی کیفیت سیگنال (تصویر و ویدئو)، تشخیص کنش در ویدئو، کدگذاری و فشرده‌سازی ویدئو و شبکه‌های عصبی مصنوعی است.