

الگوریتمی جدید برای آشکارسازی عیوب رنگی کاشی‌ها و سرامیک‌ها بر پایه مدلسازی خوشه‌ای و الگوریتم‌های ژنتیکی*

مهدی سعادت‌مند طرزجان

دانشجوی دکتری مهندسی پزشکی-بیوالکتریک، دانشگاه تربیت مدرس

saadatmand@kiaeee.org

مرتضی خادمی

عضو هیأت علمی دانشگاه فردوسی مشهد

khademi@um.ac.ir

حسن قاسمیان

عضو هیأت علمی دانشگاه تربیت مدرس

ghassemi@modares.ac.ir

چکیده

در این مقاله الگوریتمی جدید، بر پایه مدلسازی خوشه‌ای و الگوریتم‌های ژنتیکی برای آشکارسازی عیوب رنگی کاشی‌ها و سرامیک‌ها ارائه شده است. این الگوریتم شامل دو مرحله است: استخراج ویژگی و بازرسی. در مرحله استخراج ویژگی، الگوریتم پیشنهادی با تنظیم پارامترهای خود، با استفاده از یک یا چند کاشی مرجع، مدلی از خصوصیات رنگی کاشی ارائه می‌دهد. سپس در مرحله بازرسی، خصوصیات رنگی کاشی تحت بازرسی با مدل بدست آمده در مرحله آموزش، مقایسه می‌شود. بدیهی است که وجود هر گونه اختلافی بین مدل مذکور و کاشی تحت بازرسی، بیانگر وجود یک عیب رنگی است. در حقیقت، الگوریتم پیشنهادی ترکیبی از یک الگوریتم خوشه‌بندی رنگ جدید بر اساس معیار MinMax و یک الگوریتم ژنتیکی است. به این ترتیب که الگوریتم خوشه‌بندی نقش تابع هزینه الگوریتم ژنتیکی را ایفا کرده و وظیفه الگوریتم ژنتیکی، بهینه‌سازی پاسخ‌های الگوریتم خوشه‌بندی است. به عبارت دیگر، الگوریتم ژنتیکی در طول فرآیند تکاملی، با تنظیم مقادیر اولیه پارامترهای الگوریتم خوشه‌بندی، پاسخ‌های آن را بهینه می‌نماید. نتایج تجربی شامل ارزیابی‌های کمی و کیفی بر روی یک پایگاه تصویر شامل ۱۲۰ تصویر در شش طرح مختلف، بیانگر عملکرد مناسب و قابل قبول الگوریتم پیشنهادی در آشکارسازی عیوب رنگی کاشی‌ها است. دقت قابل قبول، سرعت پردازش بالا (در مرحله بازرسی) و قابلیت تنظیم حساسیت، سه ویژگی مهم الگوریتم پیشنهادی است.

واژه‌های کلیدی

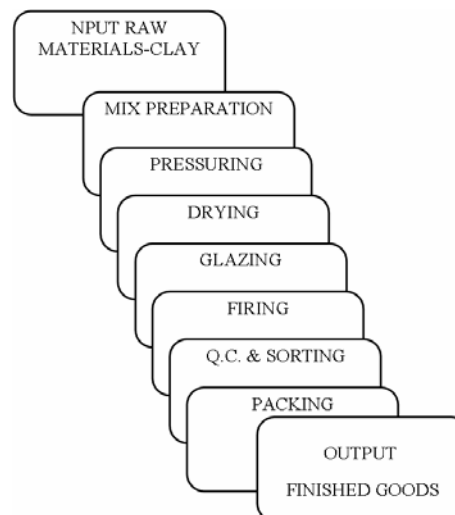
آشکارسازی عیوب کاشی‌ها، عیوب رنگی، خوشه‌بندی، روش بیشترین شیب، الگوریتم‌های ژنتیکی

۱. مقدمه

بوده و در کیفیت و قیمت محصول نهایی اهمیتی حیاتی دارد. با وجود این، کنترل کیفیت در بسیاری از کارخانجات تولید کاشی به صورت دستی انجام شده و سبب گردیده گلوگاهی در فرآیند تولید ایجاد شود. امروزه، یکی از مهمترین مسائل صنعت کاشی خودکار نمودن فرآیند درجه‌بندی است زیرا بیش از ۷۰٪ شکایات خریداران مربوط به عملکرد این بخش می‌باشد. اولین گام برای درجه‌بندی کاشی آشکارسازی عیوب آن به تفکیک نوع است. بدیهی است که دقت سامانه درجه‌بندی خودکار کاشی مستقیماً وابسته به کارایی الگوریتم

محصولات سرامیکی مانند کاشی، سرامیک و چینی به اشیایی از جنس مواد معدنی غیرفلزی اطلاق می‌شود که بر اساس نیاز شکل داده شده و طی فرآیندی مقاومت مکانیکی لازم را بدست آورده‌اند. مراحل تولید این محصولات در شکل (۱) نشان داده شده است. با گسترش فن‌آوری، همه بخش‌های تولید در این صنعت بجز مرحله کنترل کیفیت و درجه‌بندی بسیار متحول شده است. کنترل کیفیت مرحله‌ای کلیدی در فرآیند تولید محصولات سرامیکی بویژه کاشی

* این مقاله، بخشی از طرح آشکارسازی عیوب کاشی‌ها است که در پنجمین جشنواره جوان خوارزمی در سال ۱۳۸۲ به عنوان طرح برگزیده انتخاب گردیده است.



شکل ۱. مراحل تولید محصولات سرامیکی [۱].

الگو شناخته می‌شود. در نهایت، عیوب تیز از قبیل ترک، خراش، سوراخ و خال در تصویر ساختارهایی با کنتراست بالا بوجود می‌آورند.

بدیهی است که یک عیب ممکن است همزمان در دو یا چند دسته از میان پنج دسته فوق قرار گیرد. به عنوان مثال، ممکن است ترکی در یک کاشی الگودار علاوه بر ایجاد ساختاری با کنتراست بالا (عیب تیز) دارای رنگی متفاوت با رنگ‌های کاشی بوده (عیب رنگی) و سبب ایجاد تغییر مهمی در طرح (عیب الگو) نیز گردد. به عبارت دیگر، پنج دسته فوق از هم مستقل نبوده و دارای برهم‌افتادگی می‌باشند. در ادامه به بررسی روش‌های متداول در آشکارسازی عیوب کاشی‌ها می‌پردازیم.

۱-۲. الگوریتم‌های آشکارسازی عیوب کاشی‌ها

همه الگوریتم‌های آشکارسازی عیوب کاشی شامل دو مرحله کلی می‌باشند: استخراج ویژگی یا آموزش و بازرسی. در مرحله استخراج ویژگی، با پردازش تصویر یک یا چند کاشی بدون عیب مرجع، مدلی از طرح کاشی مورد نظر بدست می‌آید. سپس، در مرحله بازرسی، کاشی‌های تحت بازرسی با مدل حاصل مقایسه گردیده و عیوب آنها تشخیص داده می‌شود.

به عنوان مثال، Boukouvalas و همکارانش [۱] برای جبران‌سازی تغییرات (فضایی) روشنایی در سطح کاشی از یک تابع درجه دو استفاده نموده‌اند. آنها به منظور تشخیص عیوب رنگی در کاشی‌های ساده و الگودار، در مرحله استخراج ویژگی با میانگین‌گیری از رنگ‌های تعدادی کاشی مینا، تصویری مرجع به عنوان مدل بدست آورده‌اند. با توجه به محدود بودن تعداد سطوح رنگی در یک کاشی ساده، از یک تابع خطی برای جبران‌سازی تغییرات رنگ کاشی تحت بازرسی استفاده شده است. به این ترتیب، رنگ نواحی مختلف کاشی‌های مینا و تحت بازرسی قابل مقایسه خواهد بود. در کاشی‌های الگودار ابتدا تصویر کاشی به چند قسمت ناحیه‌بندی شده و سپس فرآیند فوق برای هر بخش به صورت جداگانه تکرار می‌شود. سعادت‌مند و خادمی [۲] برای آشکارسازی عیوب رنگی کاشی از روش مدل‌سازی خوشه‌ای سود جسته‌اند. همچنین، آنها مدل پیشنهادی خود را با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی بهینه کرده‌اند [۳]. در کار دیگری، Gallina [۴] الگوریتمی بر مبنای پراکنش نور لیزر برای تشخیص عیوب رنگی ارائه داده است. در این روش، از تبدیل Karhunen-Loeve برای استخراج ویژگی استفاده

آشکارسازی عیوب می‌باشد. در این مقاله روشی جدید برای آشکارسازی عیوبی که رنگ آنها متفاوت با رنگ‌های بکار رفته در کاشی می‌باشد (عیوب رنگی) مانند ترک، خراش، خال، سوراخ، لعاب نگرفتگی و لب‌پریدگی ارائه گردیده است.

۱-۱. دسته‌بندی عیوب کاشی‌ها

بر اساس نوع رنگ‌آمیزی و طرح، کاشی‌ها را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود: کاشی‌های ساده، بافتی و الگودار. کاشی‌های ساده دارای طرح یا الگویی نبوده و تمام سطح آنها به صورت یکنواخت با یک رنگ، رنگ‌آمیزی شده است مانند بسیاری از کاشی‌های سنتی (طرح M11 در شکل ۴). طرح کاشی‌های بافتی یک بافت می‌باشد. به عبارت دیگر، دو کاشی بافتی مشابه دارای بافتی یکسان می‌باشند، اما لزوماً طرح آنها دقیقاً یکسان نیست، مانند سرامیک‌های پشت‌چرمی (طرح‌های M21، M31 و M41 در شکل ۴). در مقابل، همه کاشی‌های الگودار مشابه دارای طرحی کاملاً یکسان با یک طرح مرجع بوده و کوچکترین اختلاف به عنوان عیب در نظر گرفته می‌شود (طرح‌های M51 و M61 در شکل ۴).

از دیدگاه اثری که عیوب بر ظاهر کاشی می‌گذارند، می‌توان آنها را به پنج دسته تقسیم نمود: شکستگی، عیوب رنگی، عیوب بافتی، عیوب الگو و عیوب تیز. عیوب رنگی از قبیل لعاب‌نگرفتگی، عیوب چاپ و لب‌پریدگی دارای رنگی متفاوت با کلیه رنگ‌های بکاررفته در کاشی می‌باشند. عیوب بافتی عبارت است از عیوب چاپ بافت در کاشی‌های بافتی. هر نوع تخریفی از الگوی مرجع در کاشی‌های الگودار به عنوان عیب

شده است. Nyarco و Hocenski [۵] برای تشخیص عیوب رنگی از شبکه عصبی خودانجمنی استفاده کرده‌اند. بعلاوه، Boukouvalas و همکارانش [۶] از پردازش هیستوگرام رنگ برای تشخیص عیوب رنگی و بافتی کاشی‌ها سود جستند.

برای تشخیص عیوب بافتی کاشی، Desoli و همکارانش [۷] هیستوگرام بلاک‌های تصویر را با یک هیستوگرام مینا مقایسه نموده‌اند. Song و همکارانش [۸] ابتدا رنگ‌های کاشی را خوشه‌بندی کرده و تصویری چندسطحی بدست آورده‌اند؛ به طوری که هر سطح پیکسل‌های مربوط به یک خوشه را در بر می‌گیرد. سپس، در مرحله استخراج ویژگی، برای همه لکه‌های موجود در یک سطح رنگی، ویژگی‌هایی چون مساحت، میزان شکستگی‌های محیط لکه‌ها، کشیدگی لکه‌ها و فاصله هر یک تا لکه‌های دیگر محاسبه گردیده و مدلی آماری با توزیع نرمال تخمین زده می‌شود. در مرحله بازرسی، هر لکه‌ای که ویژگی‌های آن با مدل آماری مذکور مطابقت نداشته باشد به عنوان عیب آشکار می‌گردد. Mirmehdi و همکارانش [۹] با اعمال فیلترهای ریخت‌شناسی بر سطوح رنگی مختلف کاشی، سعی نموده‌اند عیوب بافتی آن را تشخیص دهند. Mäenpää و همکارانش [۱۰] از روش الگوی باینری محلی و نگاشت‌های خودسازمان‌ده برای استخراج ویژگی و بازرسی کاشی‌های بافتی سود جستند. اخیراً، Palm روشی مبتنی بر ماتریس‌های هم‌اتفاق برای دسته‌بندی بافت ارایه نموده است [۱۱]. در کار دیگری، سعادت‌مند و خادمی [۱۲] الگوریتمی مبتنی بر محاسبه تراکم لکه‌ها در سطوح مختلف رنگی کاشی با استفاده از عملگرهای مورفولوژیکی ارایه داده‌اند.

برای آشکارسازی عیوب تیز کاشی‌ها نیز تاکنون، الگوریتم‌های متعددی ارایه شده است. به عنوان مثال، در پروژه ASSIST [۱۳] از یک الگوریتم آشکارسازی خطوط، برای تشخیص ترک‌ها و خال‌های کاشی‌ها استفاده شده است. در این روش، دو فیلتر یک بعدی آشکارسازی خط، در دو جهت عمودی و افقی با تصویر کانالو شده [۱۴] و از مقایسه ماکزیمم‌های محلی حاصل با پاسخ مطلوب، عیوب کاشی استخراج می‌گردند. مزیت اساسی این روش حجم کم محاسباتی آن است؛ اما قادر به آشکارسازی ترک‌های خیلی نازک (با عرض یک یا دو پیکسل) نمی‌باشد. سعادت‌مند و خادمی [۱۵] در کار دیگری با توسعه فیلتر LoG از افست منفی آن برای آشکارسازی عیوب تیز کاشی‌ها استفاده نموده‌اند. به طور کلی، روش‌های کانولوشنی علیرغم حجم

محاسباتی کم در کاشی‌هایی که طرح آنها دارای ساختارهایی با کنتراست بالا هستند، عملکرد مناسبی نداشته و نیازمند روش‌های تکمیلی هستند. به عبارت دیگر، نمی‌توان انتظار داشت که بدون توجه به طرح کاشی الگوریتمی یکپارچه برای استخراج عیوب پیشنهاد نمود.

در مباحث تشخیص الگو، اثرات الگوهای منظم به آسانی در فضای فرکانسی یا فضایی از هم تفکیک می‌شود. برای این منظور معمولاً تحلیل فضای فرکانسی ترجیح داده می‌شود؛ زیرا علاوه بر تجزیه تصویر به عناصر فرکانسی مجزا، انرژی هر یک نیز محاسبه می‌گردد. با وجود این، در کاشی‌های بافتی که بعضاً بسیار تصادفی می‌باشند، جداسازی عیوبی از قبیل ترک‌ها تنها با استفاده از اطلاعات فرکانسی بسیار مشکل است [۱۳]. لذا، برای تشخیص عیوب در چنین کاشی‌هایی از توصیف توأم فرکانسی و فضایی تصویر استفاده می‌شود. این شیوه با تقویت ساختارهای مشخصه الگو در نواحی جداگانه سبب بهبود تفکیک‌پذیری آنها می‌باشد [۱۶]. اخیراً، Jiaoyan و همکارانش [۱۷] از موجک‌های Biorthogonal برای تشخیص عیوب کاشی‌ها سود جستند. آنها از ضرایب کوواریانس بین مقیاس‌های مختلف موجک، به عنوان ویژگی استفاده نموده‌اند. Fioravanti و همکارانش [۱۸] از توزیع ویگنر^۱ برای تشخیص عیوب تیز استفاده نموده‌اند. در این روش، به مرکز هر پیکسل پنجره‌ای در نظر گرفته می‌شود. سپس، تبدیل فوریه ترکیبی غیر خطی از پیکسل‌های این پنجره محاسبه می‌گردد. از توزیع تصادفی این پنجره‌ها، برای تشخیص ترک‌ها استفاده شده است. مشکل اساسی این الگوریتم حجم محاسباتی بالا است. به همین منظور در همان مقاله، الگوریتم دیگری مبتنی بر عملگرهای ریخت‌شناسی برای تشخیص عیوب تیز کاشی‌ها ارایه شده است. در این روش به کمک یک الگوریتم بهینه‌سازی محلی، شکل ماسک عملگرهای ریخت‌شناسی چنان انتخاب می‌شود که پاسخ آن به ساختارهای الگو کمترین مقدار ممکن باشد. سپس با اعمال ماسک مذکور بر تصویری بدون عیب، آستانه خطا محاسبه می‌شود. در مرحله بازرسی، هر پیکسلی که پاسخش به عملگر مذکور بیش از مقدار آستانه فوق باشد به عنوان عیب شناخته می‌شود. این روش برخلاف الگوریتم قبلی در عین حال که دقت قابل قبولی دارد از سرعت مناسبی نیز برخوردار است. بعلاوه، سعادت‌مند و خادمی [۱۹] الگوریتم فوق را توسعه داده و

¹ Wigner distribution

عملکرد آن را با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی بهینه کرده‌اند.

علیرغم تعدد عیوب کاشی و الگوریتم‌های تشخیص آن، در یک سیستم عملی تشخیص عیوب کاشی باید از چند الگوریتم در کنار یکدیگر استفاده کرد [۲۰]. به عبارت دیگر، الگوریتم‌های مختلف تشخیص عیوب مکمل یکدیگر هستند.

۱-۳. روش پیشنهادی

در این مقاله با استفاده از مدل‌سازی خوشه‌ای (بر اساس معیار MinMax) و الگوریتم‌های ژنتیکی، روشی جدید بنام EMC برای آشکارسازی عیوب رنگی کاشی‌ها ارائه شده است. الگوریتم پیشنهادی دارای دو مرحله استخراج ویژگی و بازرسی است. در مرحله استخراج ویژگی، EMC با استفاده از تصویر یک یا چند کاشی بدون عیب مرجع، مراکز خوشه‌های کروی-شکل را با کمینه کردن شعاع آنها، بهینه می‌نماید. سپس در مرحله بازرسی، از مقایسه کاشی تحت بازرسی با مدل بدست آمده در مرحله قبل، عیوب احتمالی موجود در آن آشکار می‌گردد.

در مرحله آموزش، یک الگوریتم خوشه‌بندی محلی بنام MC، با کمینه نمودن شعاع خوشه‌ها، مراکز خوشه‌های مربوط به رنگ‌های پیکسل‌ها (در کاشی‌های مرجع) را بهینه می‌نماید. همانند دیگر الگوریتم‌های بهینه‌سازی محلی، پاسخ‌های MC نیز وابسته به مقادیر اولیه پارامترهای آن (در اینجا مراکز اولیه خوشه‌ها) است. لذا، در روش پیشنهادی از یک الگوریتم ژنتیکی برای بهینه نمودن مراکز اولیه خوشه‌ها استفاده شده است. می‌توان گفت که در روش پیشنهادی، الگوریتم خوشه‌بندی محلی MC در حقیقت نقش تابع هزینه را برای الگوریتم ژنتیکی مورد استفاده در EMC ایفا می‌کند. پس از خاتمه تکامل، بردارهای رنگ (در کاشی‌های مرجع) با استفاده از مراکز بهینه خوشه‌ها، بروش نزدیکترین همسایه خوشه‌بندی شده و شعاع هر خوشه (بیشترین فاصله اقلیدوسی بین پیکسل‌های موجود در هر خوشه تا مرکز آن خوشه) محاسبه می‌گردد. مدل پیشنهادی برای آشکارسازی عیوب رنگی در کاشی، از مراکز خوشه‌های بهینه و شعاع آنها تشکیل شده است.

برخلاف مرحله آموزش، مرحله بازرسی نیازمند هیچگونه فرآیند آموزش یا بهینه‌سازی نمی‌باشد. در این مرحله، بردارهای رنگ موجود در کاشی تحت بازرسی با استفاده از خوشه‌های بهینه حاصل از مرحله آموزش، به روش نزدیکترین همسایه خوشه‌بندی می‌شود. سپس، هر بردار

رنگی که فاصله اقلیدوسی آن تا مرکز خوشه متناظر از شعاع آن خوشه بیشتر باشد، به عنوان خطای رنگی تشخیص داده می‌شود.

باید توجه داشت که آموزش برخلاف بازرسی، یک فرآیند خارج خط^۲ بوده و از نظر زمانی محدودیت چندانی ندارد. در این مرحله، آنچه اهمیت دارد دقت نهایی مدل است. هر چه مدل دقیق‌تر باشد، کارایی الگوریتم در آشکارسازی عیوب نیز افزایش می‌یابد. بنابراین استفاده از الگوریتم‌های ژنتیکی در مرحله آموزش، علیرغم زمان محاسباتی زیاد آنها، بلامانع و قابل قبول می‌باشد. در مقابل، مرحله بازرسی کاملاً برخط^۳ بوده و باید از سرعت پردازشی بالایی برخوردار باشد. روش پیشنهادی با قابلیت پردازش بیش از ده کاشی در ثانیه در مرحله بازرسی، نیاز فوق را به نحو مقتضی برآورده می‌نماید. ارزیابی‌های کمی و کیفی بر روی پایگاه تصویری شامل ۱۲۰ تصویر در شش طرح، بیانگر کارایی الگوریتم پیشنهادی است. قابلیت تنظیم آسان حساسیت، سرعت پردازش بالا (در مرحله بازرسی) و دقت قابل قبول از مهمترین ویژگی‌های الگوریتم پیشنهادی است.

۱-۴. ساختار مقاله

در ادامه، در بخش ۲، دستگاه رنگی مورد استفاده در این مقاله معرفی می‌شود. بخش ۳ به معرفی الگوریتم خوشه‌بندی پیشنهادی می‌پردازد و در بخش ۴، کاربرد آن در تشخیص عیوب رنگی شرح داده شده است. در نهایت، بخش ۵ به بررسی نتایج تجربی پرداخته و بخش ۶ به نتیجه‌گیری اختصاص یافته است.

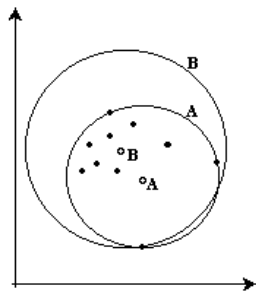
۲. انتخاب دستگاه مختصات رنگ

همانطور که می‌دانید نور بر روی چشم دو اثر مهم دارد: روشنایی^۴ که نشان‌دهنده تراکم طول موج‌های مختلف است و رنگ که بیانگر ترکیب طیفی آن می‌باشد. توماس یانگ و ماکسول نشان دادند که هر رنگ به صورت ترکیبی از سه رنگ پایه است. همچنین نشان داده شده که رنگ‌ها تشکیل یک فضای برداری می‌دهند. بر این اساس، تاکنون برای بیان رنگ‌ها، سیستم‌های مختصات مختلفی ارائه شده است که هر یک دارای ویژگی‌های خاصی است. به طور کلی مقوله

² Off-line

³ On-line

⁴ Brightness



شکل ۲. یک خوشه با دو مرکز و در نتیجه دو شعاع مختلف.

اندیشه اصلی آن است که با استخراج مراکز خوشه‌های کروی از تصویر یک یا چند کاشی مرجع بدون عیب و محاسبه شعاع هر خوشه، می‌توان شاخصی از پراکندگی بردارهای رنگی بدست آورد. منظور از شعاع خوشه در اینجا، کوچکترین شعاع ممکن برای کره‌ای به مرکز خوشه مورد نظر می‌باشد؛ به طوری که همه بردارهای رنگ متعلق به آن خوشه را در بر بگیرد. بدیهی است که در مرحله بازرسی، تمام پیکسل‌هایی که خارج از خوشه کره‌ای قرار گیرند (فاصله آنها تا مرکز بیشتر از شعاع خوشه باشد)، نشانگر عیوب رنگی هستند.

در این مقاله، از الگوریتم‌های خوشه‌بندی، به منظور استخراج مرکز و شعاع خوشه‌های کروی استفاده شده است. شعاع هر خوشه رابطه مستقیمی با نحوه انتخاب مرکز خوشه دارد. به عنوان مثال، در شکل ۲ برای بردارهای داده دو مرکز متفاوت در نظر گرفته شده است (مراکز با نقاط توخالی و داده‌ها با نقاط توپر مشخص شده‌اند). همانطور که مشاهده می‌شود، به ازای این دو مرکز، دو شعاع مختلف برای خوشه فوق بدست می‌آید (دوایر A و B). در مثال فوق، بدیهی است که دایره A به دلیل داشتن شعاعی کوچکتر در مقایسه با دایره B، برای آشکارسازی عیوب رنگی مناسبتر است. به عبارت دیگر، به منظور مدلسازی بهینه توزیع رنگ در کاشی‌های مرجع، باید مراکز خوشه‌ها از کمینه‌سازی شعاع خوشه‌ها بدست آیند. با توجه به اینکه در اینجا، تمام داده‌های یک خوشه (همه رنگ‌های موجود در کاشی‌های مرجع) مهم می‌باشند، باید برای همه آنها در مدلسازی ارزش یکسانی قایل شد. در نتیجه، روش‌های آماری خوشه‌بندی همچون روش کمترین واریانس^۸، در این کاربرد کارایی لازم را نخواهند داشت. به عنوان مثال، در شکل ۲ مرکز نامناسب B منطبق بر میانگین آماری داده‌ها می‌باشد.

رنگ از سه منظر بررسی می‌شود [۲۱]: تطابق رنگ^۵، تفاوت بین رنگ‌ها^۶ و درک رنگ^۷.

آنچه که در این مقاله اهمیت دارد مقوله «تفاوت بین رنگ‌ها» است. این مبحث به دنبال معیاری برای اندازه‌گیری اختلاف دو رنگ است، به طوری که تا حد ممکن به آنچه که چشم درک می‌کند، نزدیک باشد. یکی از روش‌هایی متداول برای تحقق این خواسته، طراحی سیستم‌های مختصات رنگ خاص است. یکی از معروفترین این سیستم‌ها که در سال ۱۹۷۶ توصیه گردیده، $CIE-L^*u^*v^*$ است (برای مشاهده معادلات تبدیل مربوطه به مراجع [۲۱-۲۲] مراجعه شود). با اینکه $CIE-L^*u^*v^*$ به منظور اندازه‌گیری اختلاف بین رنگ‌ها پیشنهاد شده است، اما هنوز هم در این فضا اختلاف دو رنگ دقیقاً برابر با فاصله اقلیدسی آنها نیست (گرچه نسبت به سایر فضاهای رنگی تخمین مناسبتری ارائه می‌دهد) [۲۱]. ما با قبول این تقریب، از این فضای رنگی استفاده می‌کنیم. در این مقاله، همه بردارهای رنگی در دستگاه مختصات فوق بیان می‌شوند، مگر آنکه خلاف آن صریحاً ذکر شود.

۳. الگوریتم خوشه‌بندی پیشنهادی

خوشه‌بندی روشی استاندارد برای تجزیه مسائل به اجزای کوچکتر است. این روش داده‌های همسان را در یک کلاس قرار می‌دهد. می‌توان از مشخصات این کلاس‌ها برای فهمیدن جزئیات مسأله یا یافتن گروه‌های مشابه در میان داده‌های موجود، سود جست. از میان زمینه‌هایی که خوشه‌بندی در آنها کاربرد فراوانی دارد می‌توان به فشردسازی اطلاعات و استخراج ویژگی اشاره کرد. اکثر قریب به اتفاق این الگوریتم‌ها با هدف فشردسازی اطلاعات طراحی گردیده‌اند و به همین جهت بیشتر بر روی مشخصه‌های آماری خوشه‌ها (همچون میانگین، واریانس و ...) تکیه دارند [۲۳-۲۵].

برای تشخیص عیوب رنگی لازم است، برای رنگ‌های بکار رفته در کاشی مدلی بدست آورد. معمولاً در تصویر یک کاشی بیش از ۴۰۰۰۰۰ پیکسل وجود دارد، درحالی‌که تنوع رنگ در آن خیلی زیاد نیست. بنابراین، پیکسل‌ها در فضای رنگی خوشه‌هایی تشکیل می‌دهند که می‌توانند مبنای کار مدلسازی قرار گیرند.

⁵ Color matching

⁶ Color differences

⁷ Color appearance

⁸ Minimum variance

۳-۱. مبانی ریاضی

ما برای تنظیم مراکز خوشه‌ها بر اساس معیار کمترین شعاع خوشه از یک الگوریتم بهینه‌سازی عددی استفاده می‌نماییم. تابع هزینه این الگوریتم برابر با شعاع خوشه است. مطابق معادله (۱)، شعاع خوشه را می‌توان به صورت نرم بینهایت فاصله بردارهای رنگ (متعلق به خوشه) تا مرکز آن تعریف نمود:

$$R_i = \max_{j=1, \dots, N_i} (d_{i,j}) = \lim_{p \rightarrow \infty} \sqrt[p]{\sum_{j=1}^{N_i} d_{i,j}^p}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

که در آن، M تعداد خوشه‌ها، R_i شعاع خوشه i -ام، N_i تعداد بردارهای رنگ موجود در خوشه i -ام و $\|\cdot\|_p$ بیانگر عملگر نرم مرتبه p می‌باشد. همچنین، $d_{i,j}$ فاصله بردار رنگ j -ام متعلق به خوشه i -ام تا مرکز آن خوشه بوده و مطابق معادله ذیل تعریف می‌شود:

$$d_{i,j} = \|\hat{C}_i - C_{i,j}\| = \sqrt{(x_i - x_{i,j})^2 + (y_i - y_{i,j})^2 + (z_i - z_{i,j})^2} \quad (2)$$

که در آن $C_i = (x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ بردار داده j -ام متعلق به خوشه i -ام به مرکز $\hat{C}_i = (x_i, y_i, z_i)$ است. اکنون، تابع f_i را طبق معادله (۳) تعریف می‌کنیم:

$$f_i = \sqrt[p]{\sum_{j=1}^{N_i} d_{i,j}^p} \quad (3)$$

با مشتق‌گیری از f_i بر حسب x_i داریم:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_i} = \frac{1}{p f_i^{p-1}} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{\partial d_{i,j}^p}{\partial x_i} \quad (4)$$

بعلاوه، به آسانی می‌توان نشان داد:

$$\frac{\partial d_{i,j}^p}{\partial x_i} = p d_{i,j}^{p-2} (x_i - x_{i,j}) \quad (5)$$

از (۴) و (۵)، می‌توان نتیجه گرفت:

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_i} = \frac{1}{f_i^{p-1}} \sum_{j=1}^{N_i} d_{i,j}^{p-2} (x_i - x_{i,j}) \quad (6)$$

و از آنجا داریم:

$$\lim_{p \rightarrow \infty} \frac{\partial f_i}{\partial x_i} = \frac{x_i - x_{i,\beta_i}}{R_i} \Bigg|_{k = \text{index}(\max_{j=1}^{N_i} d_{i,j})} \quad (7)$$

بنابراین،

$$\begin{cases} \frac{\partial R_i}{\partial x_i} = \frac{x_i - x_{i,\beta_i}}{R_i} \\ \beta_i = \text{index}(\max_{j=1}^{N_i} d_{i,j}) \end{cases} \quad (8)$$

به روش فوق، می‌توان روابط مشابهی برای y_i و z_i نیز بدست آورد. در جدول ۱، با استفاده از معادله (۸)، یک الگوریتم عددی برای بهینه‌سازی مراکز خوشه‌ها بر اساس معیار کمترین شعاع خوشه ارائه شده است. باتوجه به معادله (۱)، می‌توان گفت که معیار حداقل شعاع خوشه از خانواده MinMax می‌باشد. به عبارت دیگر، الگوریتم پیشنهادی، بردارهای رنگ را بر اساس معیار کمترین حداکثر فاصله تا مرکز، خوشه‌بندی می‌کند.

با توجه به جدول ۱، معادله (۱۱) قلب الگوریتم خوشه‌بندی پیشنهادی را تشکیل می‌دهد. این معادله نتیجه مستقیم معادله (۸) می‌باشد. در حقیقت، ما برای کاهش خطای خوشه‌ها از روش بیشترین شیب سود جستیم [۲۶]؛ به

جدول ۱. الگوریتم پیشنهادی برای خوشه‌بندی بردارهای رنگ بر اساس معیار MinMax.

| |
|--|
| ۱- پارامترهای مقدار آستانه شرط خاتمه (θ)، نرخ همگرایی هر خوشه (η_i) و مرکز هر خوشه \hat{C}_i ($i=1, 2, \dots, M$) را مقاردهی اولیه کنید و $k=1$ |
| ۲- در مرحله k -ام، بردارهای رنگ (مربوط به پیکسل‌های کاشی‌های مرجع) را بر اساس قانون نزدیکترین همسایه خوشه‌بندی کنید. به عبارت دیگر، هر بردار رنگ متعلق به خوشه‌ای است که در مقایسه با بقیه خوشه‌ها، به مرکز آن نزدیکتر باشد. |
| ۳- از میان بردارهای رنگ در هر خوشه، دورترین بردار از مرکز آن خوشه را بیابید. مطابق معادله (۸)، در خوشه i -ام، بردار رنگ C_{i,β_i} دارای بیشترین فاصله تا \hat{C}_i بوده و داریم $R_i^k = d_{i,\beta_i}$. تابع هزینه الگوریتم پیشنهادی در مرحله k -ام مطابق معادله ذیل تعریف می‌شود: |
| $\psi^k = \max_{i=1}^M (d_{i,\beta_i}) \quad (9)$ |
| ۴- چنانچه شرط خاتمه ذیل برقرار باشد، اجرای الگوریتم بهینه‌سازی متوقف می‌شود: |
| $ \psi^k - \psi^{k-1} < \theta \quad (10)$ |
| ۵- مراکز خوشه‌ها مطابق معادله (۱۱) بروز شوند: |
| $\hat{C}_i^{k+1} = \hat{C}_i^k + \eta_i \left(\frac{C_{i,\beta_i} - \hat{C}_i^k}{\ C_{i,\beta_i} - \hat{C}_i^k\ } \right) \quad (11)$ |
| ۶- به k یک واحد افزوده و به مرحله ۲ بروید. |

طوری که مراکز در خلاف جهت مشتق تابع هدف (معادله ۹) حرکت می‌کنند. باید توجه داشت از آنجا که مراکز خوشه‌ها مستقل از هم هستند، مشتقات جزئی در هر خوشه مستقل از سایر خوشه‌ها بوده و داریم:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x_i} = \frac{\partial d_{i,\beta_i}}{\partial x_i} = \frac{\partial R_i}{\partial x_i} \quad (12)$$

در معادله (۱۰)، مقدار آستانه θ تعیین کننده شرط خاتمه خوشه‌بندی است. هر چه این آستانه کوچکتر باشد، زمان بیشتری صرف بهینه‌سازی شده و الگوریتم دیرتر همگرا می‌گردد. باید توجه داشت که θ باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود؛ زیرا در غیر این صورت، الگوریتم خوشه‌بندی قبل از همگرایی کامل، خاتمه خواهد یافت. الگوریتم خوشه‌بندی پیشنهادی را Min-Max Color Clustering (MC) می‌نامیم.

۳-۲. تنظیم خودکار نرخ همگرایی

سرعت همگرایی و دقت پاسخ‌های الگوریتم خوشه‌بندی MC رابطه مستقیمی با نرخ همگرایی η_i دارد. نرخ همگرایی کوچک سبب همگرایی کند الگوریتم و بدام افتادن آن در مینیمم‌های محلی ضعیف می‌گردد. در مقابل یک نرخ همگرایی بزرگ می‌تواند منجر به ناپایداری الگوریتم شود. لذا، تنظیم η_i می‌تواند در عملکرد الگوریتم تأثیر بسزایی داشته باشد. تنظیم η_i در اینجا بسیار شبیه به روش‌های مورد استفاده برای تنظیم نرخ آموزش در شبکه‌های عصبی مصنوعی است [۲۷]. در این مقاله، برای این منظور از روشی که در مرجع [۲۸] برای تنظیم خودکار نرخ آموزش در شبکه‌های پیش‌رو ارائه شده، استفاده گردیده است. در این روش به تغییرات متوالی بردارهای تصحیح توجه می‌شود. بردارهای جابجایی مرکز یک خوشه، طی دو مرحله متوالی از الگوریتم خوشه‌بندی را در نظر بگیرید. بسته به مقدار همبستگی این دو بردار، سه حالت مختلف می‌توان در نظر گرفت:

- اگر همبستگی نزدیک یک باشد، دو بردار تقریباً همجهت بوده‌اند. بنابراین، تابع هدف در محل فعلی مرکز خوشه صاف و بدون برجستگی و فرورفتگی‌های تند است؛ پس می‌توان با افزایش η_i بر سرعت همگرایی افزود.
- اگر همبستگی نزدیک منهای یک باشد، دو بردار تقریباً در خلاف جهت یکدیگرند. بنابراین تابع هدف در محل فعلی مرکز خوشه، دارای برجستگی‌ها و فرورفتگی‌های تند

است؛ پس برای پرهیز از نوسان الگوریتم در دو لبه این ناهمواری‌ها، η_i را باید کاهش داد.

- اگر بین دو بردار همبستگی‌ای وجود نداشته باشد، بهتر است η_i بدون تغییر باقی بماند.

با توجه به مطالب فوق، بردار تصحیح مرکز خوشه i -ام مطابق معادله ذیل تعریف می‌شود:

$$\Delta \hat{C}_i^k = C_{i,\beta_i} - \hat{C}_i^k \quad (13)$$

ضریب همبستگی بردارهای تصحیح، طی دو مرحله متوالی عبارت است از:

$$r_i^k = \begin{cases} \frac{\Delta \hat{C}_i^k \cdot \Delta \hat{C}_i^{k-1}}{\|\Delta \hat{C}_i^k\| \|\Delta \hat{C}_i^{k-1}\|} & \text{otherwise} \\ 0 & k = 0, 1 \end{cases} \quad (14)$$

نرخ همگرایی، با توجه به سه ضابطه مذکور، در هر مرحله به صورت ذیل بهنگام می‌شود:

$$\eta_i^k = (1 + cr_i^k) \eta_i^{k-1} \quad (15)$$

که در آن،

$$c = 0.25(1 - \text{sgn}(r_i^k)) \quad (16)$$

پارامتر c بیانگر میزان تأثیر ضریب همبستگی بر نرخ همگرایی است. همانطور که مشاهده می‌شود، c برای ضرایب همبستگی مثبت برابر با ۰/۲۵ و برای ضرایب منفی برابر با ۰/۵۰ است. به این ترتیب، سرعت رشد نرخ همگرایی η_i (به ازای ضرایب همبستگی مثبت) نصف سرعت کاهش آن (به ازای ضرایب منفی) است. با توجه به اینکه الگوریتم خوشه‌بندی برای η_i کوچکتر پایدارتر است، فرآیند فوق مانع از رشد سریع و بی‌رویه η_i شده و بر پایداری الگوریتم می‌افزاید. علاوه، کاهش سریع نرخ همگرایی سبب پرهیز از نوسانات اضافی الگوریتم ناشی از مقادیر بزرگ η_i می‌شود. اکنون می‌توان با استفاده از (۱۵)، معادله (۱۱) را به صورت ذیل بازنویسی نمود:

$$\hat{C}_i^{k+1} = \hat{C}_i^k + \eta_i^k \Delta \hat{C}_i^k \quad (17)$$

در معادله فوق در مقایسه با معادله (۱۱)، ضریب نرمالیزه $\|C_{i,\beta_i} - \hat{C}_i^k\|$ حذف گردیده است. با توجه به تنظیم دینامیکی نرخ همگرایی در (۱۷)، ضریب فوق به صورت خودکار در دل η_i جای خواهد گرفت که در نتیجه، به منظور سادگی معادلات از معادله (۱۷) حذف شده است.

۳-۳. بهینه‌سازی مراکز اولیه خوشه‌ها

همانطور که در جدول ۱-بند ۱ شرح داده شده است، در الگوریتم خوشه‌بندی MC، باید در ابتدا مراکز خوشه‌ها

مقداردهی اولیه شوند. همانند هر الگوریتم بهینه‌سازی دیگر، عملکرد MC نیز وابسته به مقادیر اولیه پارامترهای خود (در اینجا مراکز اولیه خوشه‌ها) است. لذا، می‌توان با بهینه‌سازی این پارامترها به خوشه‌هایی با شعاع کوچکتر دست یافت. ما برای این منظور از الگوریتم‌های ژنتیکی سود جستیم.

الگوریتم‌های ژنتیکی خانواده‌ای از مدل‌های محاسباتی هستند که از تکامل موجودات و فرآیند انتخاب طبیعی الهام گرفته شده [۲۹] و اولین بار توسط Holland [۳۰] پیشنهاد گردیده است. انتخاب طبیعی یک فرایند زیستی است که بر اساس آن در یک جامعه رقابتی، احتمال برنده شدن افراد قویتر بیشتر است. امروزه از الگوریتم ژنتیکی در کاربردهای مختلفی مانند بهینه‌سازی توابع، شناسایی سیستم و پردازش تصویر استفاده می‌شود [۲۹]، [۳۱-۳۲]. هنگامی که هدف پیدا کردن جوابی نزدیک به پاسخ بهینه، برای یک تابع چندبعدی با چندین قید باشد، الگوریتم‌های ژنتیکی بسیار مؤثر و کارا هستند [۳۳].

هر الگوریتم ژنتیکی از بخش‌های رمزنگاری^۹، تابع هزینه^{۱۰}، تابع شایستگی^{۱۱} و عملگرهای انتخاب والدین^{۱۲}، برش^{۱۳} و جهش^{۱۴} تشکیل شده است. در الگوریتم ژنتیکی مورد استفاده در این مقاله برای بهینه‌سازی مراکز اولیه خوشه‌ها، هر کروموزوم باید بیانگر یک مجموعه از مراکز خوشه‌ها باشد. بدیهی است که کروموزومی بهتر است که پس از مقداردهی اولیه و همگرایی MC (جدول ۱)، مقدار نهایی تابع هزینه ψ (معادله ۹) برای آن کمتر باشد. لذا، کروموزوم $m-p$ به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$\hat{C}_p = \{\hat{C}_{p,1}, \hat{C}_{p,2}, \dots, \hat{C}_{p,M}\} \quad p=1,2,\dots,P \quad (18)$$

که در آن، P تعداد کل کروموزوم‌ها در جمعیت و $\hat{C}_{p,i}$ مرکز اولیه خوشه $i-p$ در کروموزوم $m-p$ می‌باشد. به این ترتیب، هر کروموزوم شامل $3M$ ژن خواهد بود. برای ارزیابی هر کروموزوم (به عنوان مثال کروموزوم $m-p$)، ابتدا مراکز اولیه خوشه‌ها در MC، مطابق معادله ذیل مقداردهی اولیه می‌شود:

$$\hat{C}_i = \hat{C}_{p,i} \quad i=1,2,\dots,M \quad (19)$$

پس از اجرا و همگرایی MC، مقدار نهایی تابع هزینه ψ (معادله ۹) بیانگر ارزش کروموزوم مورد نظر است:

$$\psi_p = \psi^{\text{end}} \text{ for initialization with } \hat{C}_p \quad (20)$$

بدیهی است که هر چه ψ_p کوچکتر باشد، کروموزوم مورد نظر مناسب‌تر است. در حقیقت، MC نقش تابع هزینه را برای الگوریتم ژنتیکی ایفا می‌نماید.

برای محاسبه شایستگی هر کروموزوم در جمعیت از تابع شایستگی رتبه استفاده شده است. به این ترتیب که پس از ارزیابی همه کروموزوم‌های جمعیت، آنها را بر اساس تابع ارزیابی ψ به ترتیب صعودی مرتب می‌نماییم. فرض کنید که رتبه کروموزوم $m-p$ در جمعیت r_p باشد؛ در این صورت، شایستگی این کروموزوم مطابق معادله ذیل تعریف می‌شود:

$$\xi_p = \frac{2(P-r_p)}{P(P-1)} \quad (21)$$

به آسانی می‌توان نشان داد که در تابع فوق هر چه رتبه یک کروموزوم (r_p) کمتر باشد، میزان شایستگی آن بیشتر خواهد بود.

الگوریتم ژنتیکی پیشنهادی از عملگر برش دو نقطه‌ای [۲۹] و عملگر جهش متداول سود می‌برد. عملگر جهش در ابتدا برای هر ژن یک عدد تصادفی تولید می‌کند و چنانچه این عدد کمتر از احتمال جهش (P_m) باشد، ژن مذکور با ژنی که به صورت تصادفی تولید شده، جایگزین می‌شود. احتمال جهش، عددی مثبت و کوچکتر از یک است که قبل از شروع فرآیند تکامل الگوریتم ژنتیکی انتخاب می‌شود و معمولاً عددی کوچک، بین 0.001 و 0.01 است. برای انتخاب والدین از روش مسابقه^{۱۵} استفاده شده است. به این ترتیب که به صورت تصادفی تعداد Q کروموزوم از جمعیت انتخاب شده و از بین آنها دو کروموزومی که بیشترین شایستگی (۲) را دارند، به عنوان والدین انتخاب می‌شوند [۳۴]. سپس، عملگرهای برش و جهش بر والدین انتخابی اعمال گردیده تا دو کروموزوم فرزند ایجاد شده و با استفاده از معادله‌های (۱۹) و (۲۰) ارزیابی گردند.

تکامل بیش از آنکه به حفظ گونه‌هایی بپردازد که تطابق بیشتری با محیط اطرافشان داشته‌اند، به حذف گونه‌هایی پرداخته که کمتر با محیط اطرافشان تطبیق داشته‌اند [۳۲]. به عبارت دیگر، در تکامل، حذف عناصر ضعیفتر به مراتب اثر بیشتری از حفظ عناصر قویتر دارد. در الگوریتم ژنتیکی پیشنهادی مشابه با Genitor [۳۴]، در هر تولید نسل^{۱۶} از میان جمعیت موجود تنها دو کروموزوم به عنوان ولی^{۱۷} انتخاب می‌شوند و بنابراین تنها دو کروموزوم فرزند تولید

¹⁵ Tournament

¹⁶ Generation

¹⁷ Parent

⁹ Coding

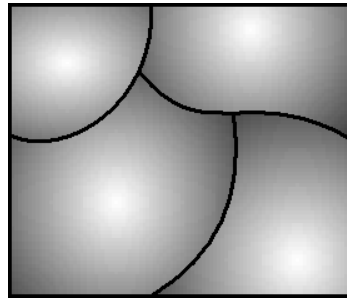
¹⁰ Evaluation function

¹¹ Fitness function

¹² Selection

¹³ Cross-over

¹⁴ Mutation



شکل ۳. ناحیه‌بندی فضای ورودی توسط الگوریتم خوشه‌بندی. در هر ناحیه، نقطه‌ای که مقدار تابع هزینه در آن کمینه می‌باشد با سطح خاکستری سفید نشان داده شده است.

می‌گردد. جمعیت جدید با جایگزینی این دو فرزند به جای بدترین کروموزوم‌های جمعیت قبلی بوجود می‌آید.

جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیکی با انتخاب تصادفی بردارهای رنگی از میان رنگ‌های موجود در کاشی‌های مرجع تولید می‌شود. تکامل نیز تا آنجا ادامه می‌یابد که یا بهترین عضو جمعیت در ۵۰۰ مرحله متوالی دیگر بهبود قابل توجهی نداشته باشد و یا فرآیند تولید نسل بیش از ۲۰۰۰ مرتبه تکرار شده باشد (شرایط خاتمه فوق به صورت تجربی بدست آمده‌اند).

مزیت اساسی الگوریتم ژنتیکی فوق، سرعت بالا و حجم کم محاسبات آن می‌باشد؛ به طوری که در هر تولید نسل تنها ۲ کروموزوم فرزند تولید می‌شود. استفاده توأم از مدل Genitor و روش انتخاب مسابقه سبب افزایش سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیکی شده است. با وجود این، شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در بعضی موارد قبل از همگرایی الگوریتم ژنتیکی به یک پاسخ نزدیک به بهینه، پراکندگی^{۱۸} جمعیت از بین رفته و در نتیجه، الگوریتم ژنتیکی در یک مینیمم محلی ضعیف گرفتار می‌شود. ما برای رفع این مشکل، تنها کروموزوم‌های فرزندی را وارد جمعیت می‌کنیم که مشابه با هیچ یک از کروموزوم‌های جمعیت قبلی نباشند.

برای تعریف معیار شباهت باید به یک نکته کلیدی توجه داشت. از آنجا که خوشه‌های نهایی متناظر با هر کروموزوم، پس از همگرایی MC بدست می‌آید، نمی‌توان مستقیماً از ژن‌های کروموزوم‌ها برای تعریف شباهت بین آنها استفاده نمود. در توضیح این مسأله باید خاطر نشان کرد که MC یک بهینه‌ساز محلی است که ما را از خوشه‌های اولیه به نزدیکترین مینیمم محلی تابع هزینه ψ (معادله ۹) می‌برد. به

عبارت دیگر، همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده، MC فضای ورودی را به چندین زیرفضا تقسیم می‌کند. چنانچه MC توسط هر یک از نقاط متعلق به یک زیرفضا مقداردهی اولیه شود، در نهایت به مینیمم محلی آن زیرفضا همگرا می‌گردد. از اینرو ما از مقدار تابع ارزیابی ψ برای هر کروموزوم، به عنوان معیاری برای بررسی شباهت کروموزوم‌ها استفاده کرده‌ایم. به عبارت دیگر، یک کروموزومی فرزند تنها در صورتی پذیرفته می‌شود که هیچ کروموزومی در جمعیت فعلی با آن مشابه با آن وجود نداشته باشد.

پس از اتمام تکامل الگوریتم ژنتیکی، کروموزومی که در بین جمعیت بهترین شایستگی را دارد، به عنوان بهترین مقداردهی اولیه برای MC انتخاب می‌گردد. همچنین، خوشه‌های حاصل از MC و شعاع آنها به ازای کروموزوم بهینه مذکور، به عنوان مدل بهینه برای توزیع رنگ کاشی مورد نظر انتخاب می‌شوند. الگوریتم تکاملی پیشنهادی را Evolutionary MC (EMC) می‌نامیم.

۴. روش پیشنهادی برای تشخیص عیوب رنگی

روش پیشنهادی برای آشکارسازی عیوب رنگی کاشی‌ها را می‌توان به صورت ذیل خلاصه نمود. این الگوریتم شامل دو مرحله می‌باشد: استخراج ویژگی و بازرسی. در مرحله استخراج ویژگی بردارهای رنگ موجود در یک یا چند کاشی مرجع توسط EMC به صورت بهینه خوشه‌بندی شده و مرکز و شعاع خوشه‌های بهینه به عنوان مدل توزیع رنگ کاشی ذخیره می‌شود.

در مرحله بازرسی، برای هر کاشی تحت بازرسی، بردارهای رنگ با استفاده از مراکز خوشه‌های بدست آمده در مرحله استخراج ویژگی و بر اساس قانون نزدیکترین همسایه خوشه‌بندی می‌شوند. به این ترتیب که هر بردار رنگ متعلق به خوشه‌ای است که به مرکز آن نزدیکتر باشد. سپس فاصله بردارهای رنگ تا مرکز خوشه متناظر محاسبه گردیده و با شعاع خوشه (بدست آمده در مرحله استخراج ویژگی) مقایسه می‌گردد. بردارهایی که فاصله آنها تا مرکز، از شعاع خوشه بیشتر باشد (یا اصطلاحاً خارج خوشه قرار گیرند) به عنوان عیب رنگی تشخیص داده می‌شوند. به عبارت دقیق‌تر، اگر $\vec{C}_{i,j}$ بردار رنگ i -م متعلق به خوشه i -م در کاشی تحت بازرسی بوده و فاصله آن تا مرکز خوشه (\vec{C}_i) برابر با $\vec{d}_{i,j}$ باشد؛ آنگاه در صورتی که شرط ذیل برقرار باشد، این بردار متعلق به یک عیب رنگی است:

¹⁸ Diversity

$$\tilde{d}_{i,j} > (1 + \alpha)R_i \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (22)$$

که در آن α ضریب تحمل خطا بوده و توسط کاربر تنظیم می‌شود. هر چه α به یک نزدیکتر باشد، از حساسیت الگوریتم کاسته شده و امکان عدم تشخیص عیوب رنگی افزایش می‌یابد. برعکس، چنانچه α بسیار کوچک و نزدیک صفر انتخاب شود، حساسیت الگوریتم به سرعت افزایش یافته و امکان تأثیر نویز بر آن افزایش می‌یابد. نتایج تجربی نشان داد که انتخاب مقدار α در محدوده ۰/۱ تا ۰/۲ برای اکثر طرح‌ها مناسب می‌باشد.

در الگوریتم پیشنهادی، مرحله استخراج ویژگی تنها یکبار و به صورت خارج خط برای یک یا چند کاشی مرجع اجرا می‌گردد، تا مدل خوشه‌ای بهینه بدست آید. بنابراین، استفاده از الگوریتم‌های زمانبری چون الگوریتم‌های تکاملی برای بهینه‌سازی مدل در این مرحله بلامانع می‌باشد. با وجود این شبیه‌سازی‌ها نشان داد که این مرحله بر روی یک کامپیوتر شخصی با پردازنده AMD Athlon XP 1600+ و حافظه 768 MB، به طور متوسط، در کمتر از یک ساعت به پایان می‌رسد. در مقابل، در مرحله بازرسی باید هر یک از کاشی‌های تحت بازرسی به صورت برخط مورد پردازش قرار گرفته و عیوب آنها تشخیص داده شود. در روش پیشنهادی، این مرحله تنها شامل یک خوشه‌بندی ساده بر اساس قانون نزدیکترین همسایه بوده و قادر به پردازش ده کاشی در یک ثانیه می‌باشد.

روش پیشنهادی ابزاری مناسب برای آشکارسازی عیوبی است که در تصویر، ساختارهایی با رنگی متفاوت با رنگ‌های کاشی ایجاد می‌کنند (عیوب رنگی) مانند خال، سوراخ، کثیفی، برخی ترک‌ها و خراش‌ها، لعاب نگرفتگی و لب پریدگی. با وجود این، اگر رنگ عیب در محدوده رنگ‌های کاشی باشد، الگوریتم پیشنهادی قادر به تشخیص آن نخواهند بود. به عنوان مثال، با استفاده از روش پیشنهادی یک خال یا ترک تیره در یک کاشی با رنگ‌های روشن به آسانی قابل تشخیص می‌باشد؛ اما همان عیب در یک کاشی با رنگ‌های تیره ممکن است تشخیص داده نشود. در اینگونه موارد، الگوریتم‌های کمکی دیگری مانند آنچه در [۱۵] و [۱۹] معرفی شده باید به خدمت گرفته شود. به عبارت دیگر، تشخیص همه عیوب کاشی نیازمند استفاده از مجموعه‌ای از الگوریتم‌های همکار در قالب یک سیستم یکپارچه می‌باشد.

الگوریتم خوشه‌بندی پیشنهادی در این مقاله از سه منظر بر رقبای خود برتری دارد: (۱) استفاده از معیار غیرآماري کمترین شعاع خوشه در خوشه‌بندی، (۲) بهینه‌سازی با استفاده

الگوریتم‌های تکاملی و (۳) استفاده موفقیت‌آمیز در کاربرد آشکارسازی عیوب رنگی کاشی‌ها.

۵. نتایج تجربی

در ادامه به بررسی نتایج تجربی حاصل از پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی می‌پردازیم.

۵-۱. پایگاه تصویر

برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی از یک پایگاه تصویر متشکل از ۱۲۰ تصویر کاشی و سرامیک در شش طرح متفاوت (۲۰ تصویر از هر طرح) شامل یک طرح ساده M1، سه طرح بافتی (M2، M3 و M4) و دو طرح الگودار (M5 و M6) استفاده شده است. در پایگاه تصویر، هر کاشی مطابق با روش ذیل نامگذاری گردیده است:

(شماره کاشی) (شماره طرح) (مرجع M / تحت بازرسی I)

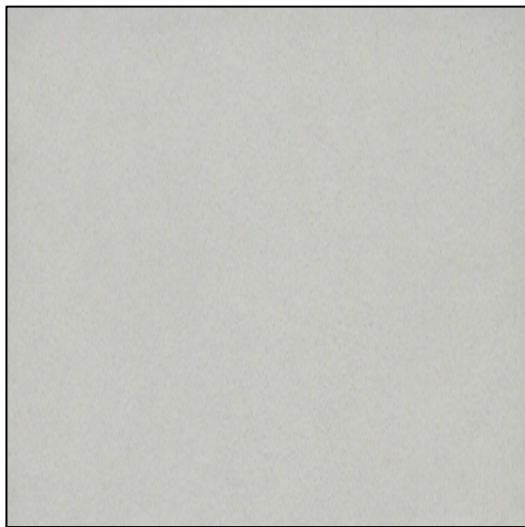
به عنوان مثال، M31 نشان دهنده کاشی مرجع شماره ۱ با طرح شماره ۳ می‌باشد. در شکل ۴ یک کاشی مرجع بدون عیب از هر طرح نشان داده شده است. با توجه به شباهت بسیار زیاد طرح‌های بافتی M3 و M4، در این مقاله، تنها نتایج تجربی مربوط به طرح M3 آورده شده است.

تصاویر پایگاه داده فوق همانند روش Mirmehdi و همکارانش [۹] توسط یک اسکنر رنگی تهیه شده است. استفاده از این روش دارای دو مزیت عمده است: اولاً ما را از پیچیدگی‌های سیستم تصویربرداری و نورپردازی رها می‌نماید و ثانیاً این اطمینان را به ما می‌دهد که همه تصاویر تحت شرایط یکسانی تهیه شده‌اند. بدیهی است که پیاده‌سازی صنعتی سامانه پیشنهادی مستلزم رعایت تمهیدات ویژه‌ای در تصویربرداری است که Boukouvalas و همکارانش در [۱] مورد بررسی قرار داده‌اند.

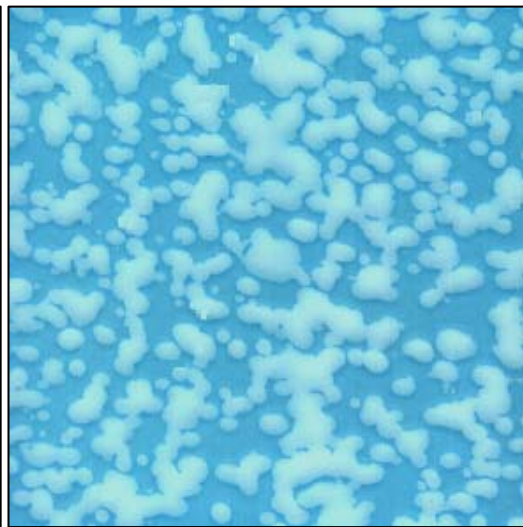
برای مدل‌سازی توزیع رنگ در تمام طرح‌ها (به صورت تجربی) از تعداد $M=10$ خوشه استفاده شده است. در جدول ۲، بیشترین شعاع خوشه‌بندی (ψ بهینه) برای هر یک از شش طرح موجود در پایگاه تصویر نشان داده شده است.

جدول ۲. بیشترین شعاع خوشه‌بندی (ψ) در الگوریتم EMC برای هر یک از شش طرح مختلف موجود در پایگاه تصویر (شکل ۴).

| | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | M6 |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| ψ | 1.1 | 7.1 | 8.2 | 8.0 | 2.1 | 11.8 |



(M11)



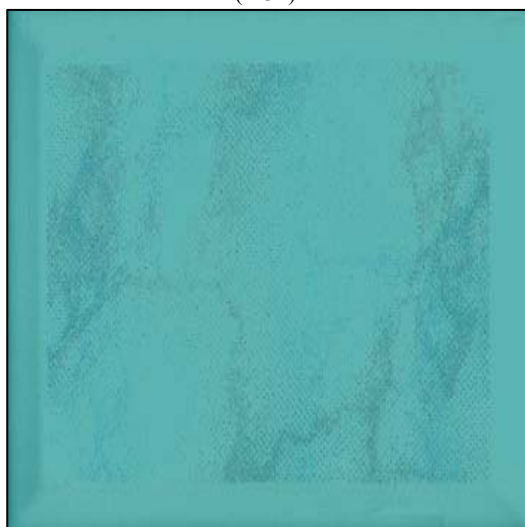
(M21)



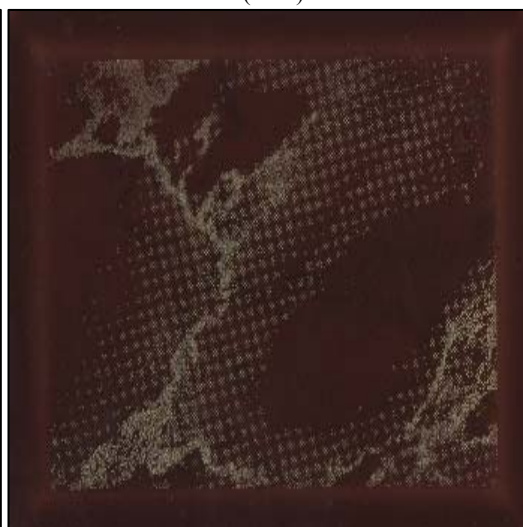
(M31)



(M41)



(M51)



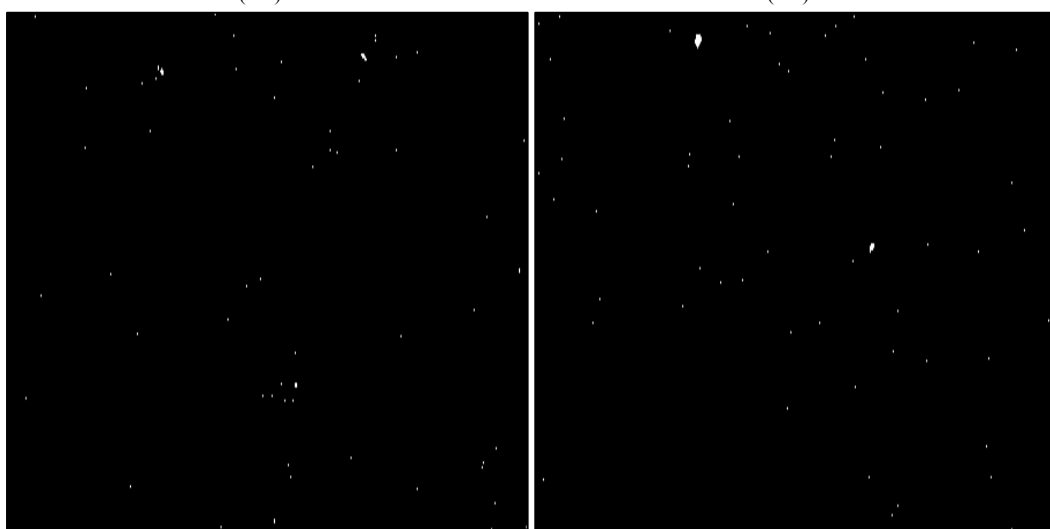
(M61)

شکل ۴. یک کاشی مرجع بدون عیب نمونه از شش طرح موجود در پایگاه تصویر. طرح M1 ساده و کاملاً سفید، طرح‌های M2، M3 و M4 بافتی و طرح‌های M5 و M6 الگودار هستند.



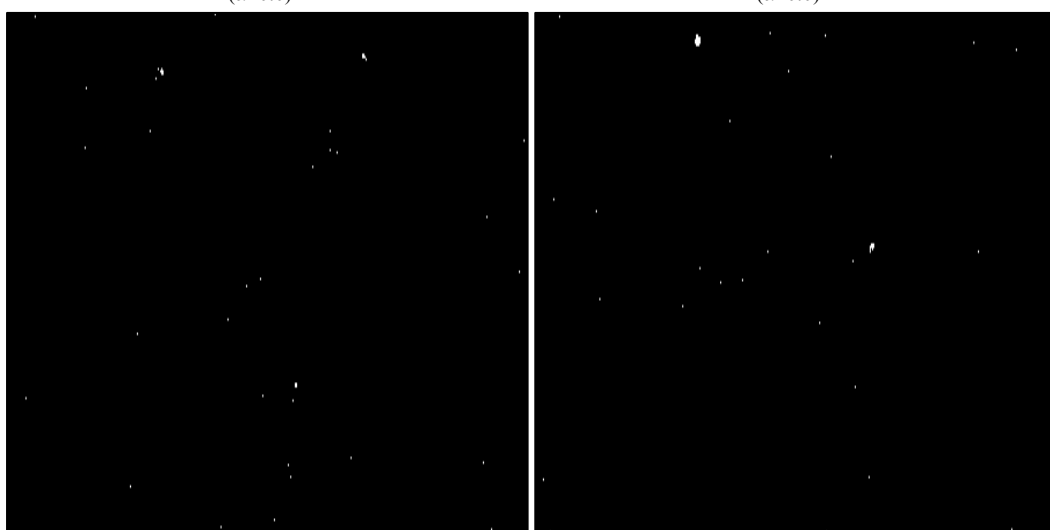
(I11)

(I12)



($\alpha=0.0$)

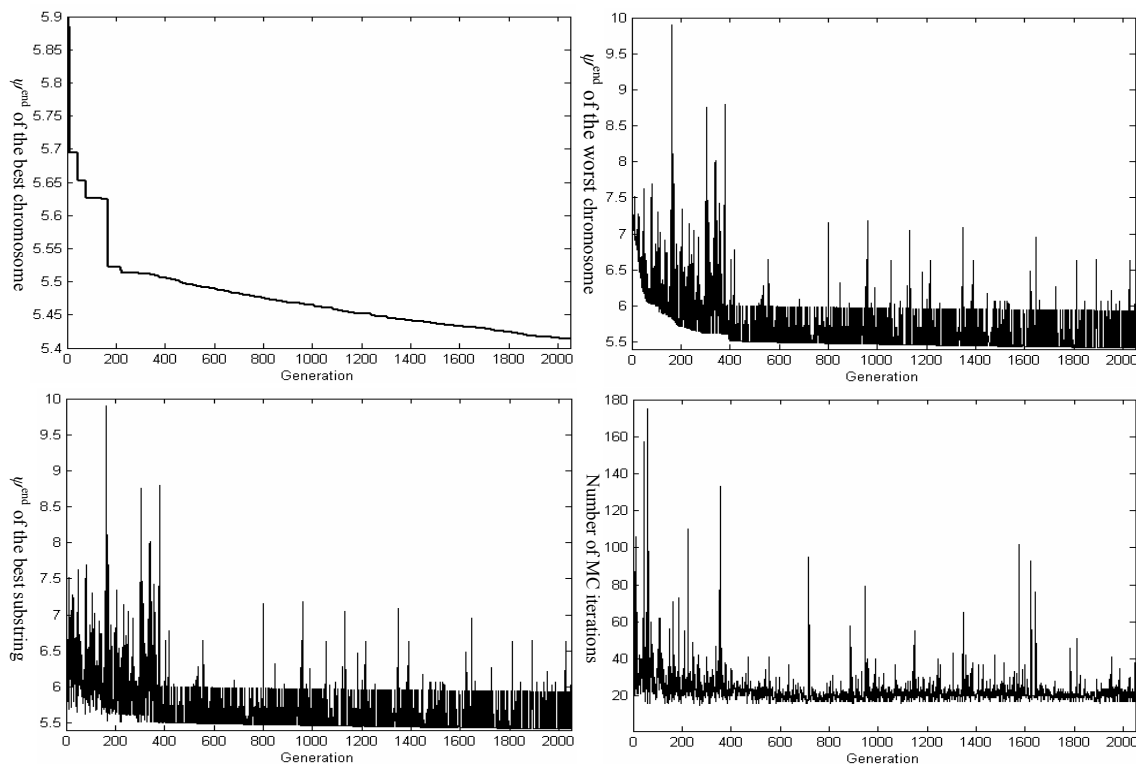
($\alpha=0.0$)



($\alpha=0.4$)

($\alpha=0.4$)

شکل ۵. پاسخ الگوریتم EMC برای دو کاشی ساده (تحت بازرسی) I11 و I12 با $\alpha=0.0$ و $\alpha=0.4$.



شکل ۶. منحنی تغییرات مقدار تابع هزینه ψ برای (بالا-چپ) بهترین کروموزوم جمعیت، (پایین-چپ) بهترین کروموزوم فرزند و (پایین-راست) منحنی تعداد تکرارهای MC برای کروموزوم فرزند اول، در طول فرآیند تکامل برای کاشی M21.

۵-۳. کاشی‌های بافتی

با توجه به اینکه کاشی‌های بافتی و الگودار از تنوع رنگ بیشتری برخوردار هستند، ممکن است EMC قادر به آشکارسازی برخی عیوب که رنگ آنها در محدوده رنگ‌های کاشی است، نباشد. بنابراین، در اینگونه کاشی‌ها استفاده از الگوریتم‌های مکمل که برای تشخیص عیوب از سایر اثرات آنها در تصویر استفاده می‌کنند، ضروری است. به عنوان مثال، در [۱۵] و [۱۹] دو روش معرفی شده‌اند که برای آشکارسازی عیوب تیز در تصویر، از کنتراست بالای آنها استفاده می‌کنند.

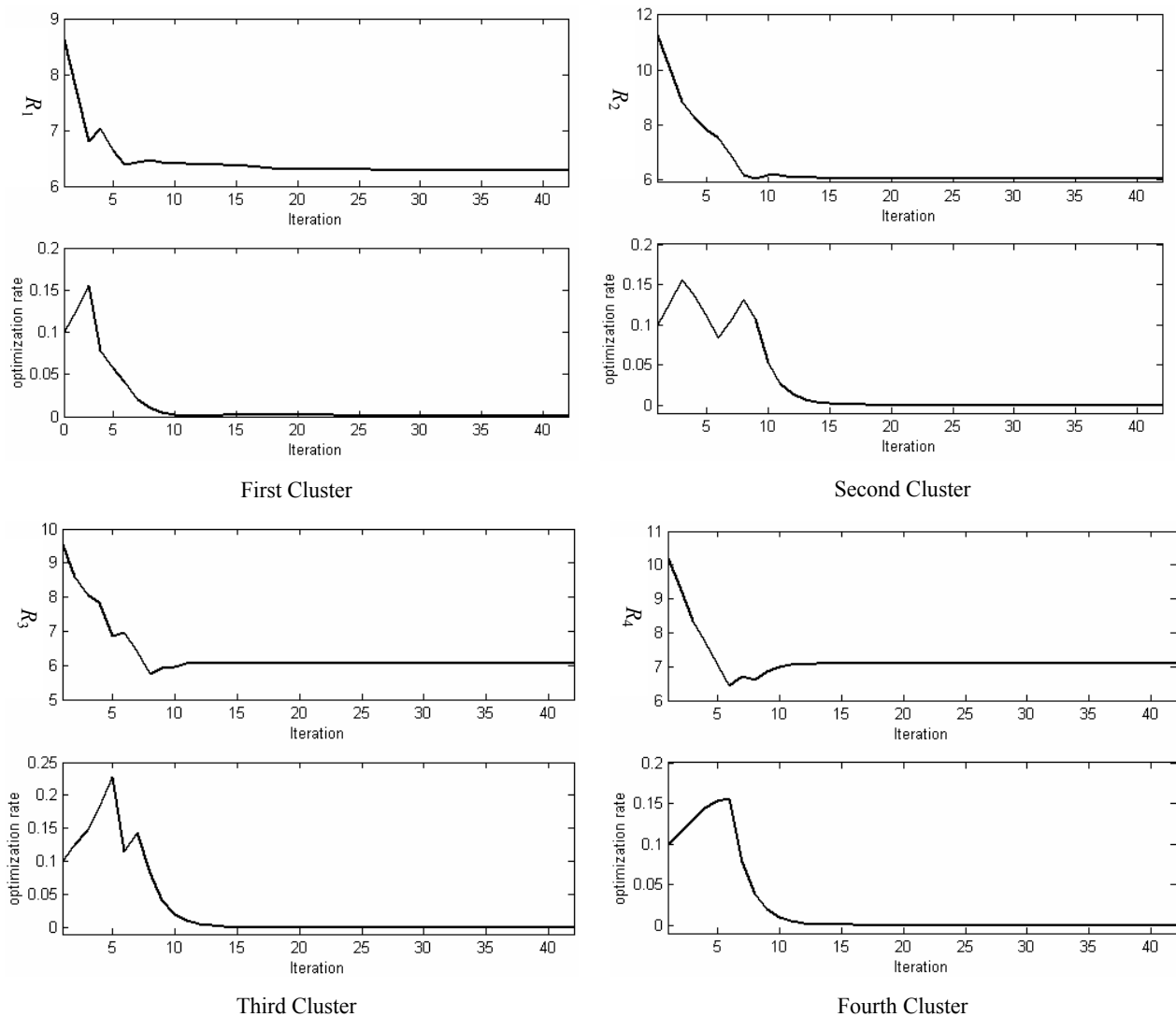
از میان شش طرح موجود در پایگاه تصاویر، سه طرح M2، M3 و M4 از نوع بافتی می‌باشند. به منظور بررسی عملکرد الگوریتم ژنتیکی، در شکل ۶ منحنی‌های تغییرات تابع ارزیابی ψ مربوط به کاشی M21 در طول تکامل، برای بهترین کروموزوم جمعیت، بدترین کروموزوم جمعیت و بهترین کروموزوم فرزند نشان داده شده است. همچنین، این شکل منحنی تعداد تکرارهای MC برای کروموزوم فرزند اول را نیز در طول دوره تکامل نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌کنید، الگوریتم ژنتیکی پیشنهادی بخوبی توانسته

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش پیچیدگی و تنوع رنگ در طرح کاشی شعاع خوشه‌بندی نیز افزایش یافته است. کوچکترین شعاع خوشه‌بندی برای کاشی ساده M1 و بیشترین شعاع برای کاشی الگودار M6 بدست آمده است که به ترتیب ساده‌ترین و پیچیده‌ترین طرح در پایگاه تصویر می‌باشند.

۵-۲. کاشی‌های ساده

با توجه به اینکه کاشی‌های ساده تک‌رنگ می‌باشند لذا، الگوریتم EMC قادر به استخراج همه انواع عیوب در این نوع کاشی می‌باشد. در شکل ۵، عملکرد الگوریتم EMC در استخراج خال و سوراخ در دو کاشی (تحت بازرسی) I11 و I12 با $\alpha=0.0$ و $\alpha=0.4$ نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود، حساسیت EMC با $\alpha=0.0$ نسبت به نویز زیاد می‌باشد، به طوری که هر تغییر ناچیزی را به عنوان یک عیب تیز آشکار نموده است. با افزایش α می‌توان از حساسیت EMC نیز کاست. در شکل ۵ به ازای $\alpha=0.4$ نیز عیوب هر دو کاشی تحت بازرسی به خوبی آشکار گردیده است.

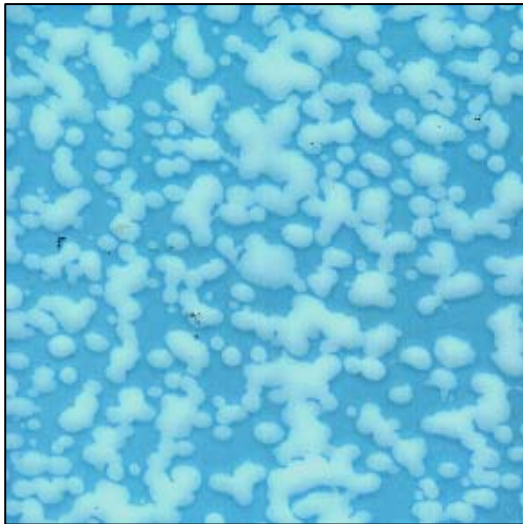


شکل ۷. منحنی‌های تغییرات شعاع خوشه (R_i) و نرخ بهینه‌سازی (η_i) برای چهار خوشه (از میان ده خوشه) در طول همگرایی الگوریتم MC برای کاشی M21.

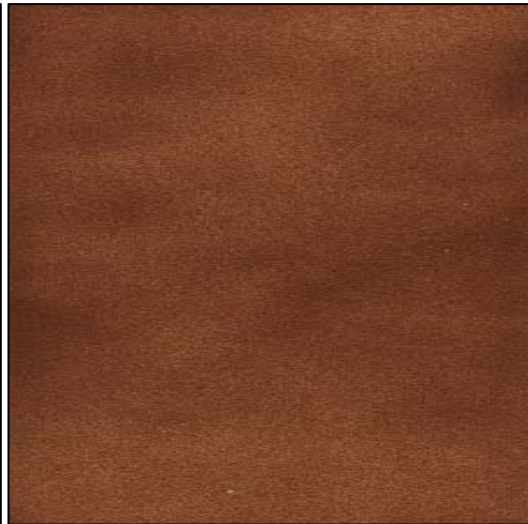
MC نیز کاهش یافته است. در توضیح این پدیده می‌توان گفت که با پیشرفت تکامل، کروموزوم‌های فرزند بهبود یافته و به مینیمم محلی موجود در زیرفضای اطراف خود نزدیکتر شده‌اند. در نتیجه، MC طی مراحل کمتری به خوشه‌های بهینه مربوط به این کروموزوم‌ها همگرا می‌شود.

در شکل ۷، منحنی‌های تغییرات شعاع خوشه (R_i) و نرخ بهینه‌سازی (η_i) برای چهار خوشه (از میان ده خوشه) در طول همگرایی الگوریتم MC برای کاشی M21، نشان داده شده است. در این مثال، الگوریتم MC توسط بهترین کروموزوم حاصل از EMC مقداردهی اولیه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، الگوریتم پیشنهادی توانسته طی (تقریباً) چهل مرحله به پاسخ نهایی‌اش همگرا شود.

است با مقداردهی اولیه مناسب MC، شعاع خوشه‌ها (ψ^{end}) را کاهش دهد (شکل ۶-بالا-چپ). همچنین، منحنی تغییرات مقدار تابع هزینه بدترین کروموزوم جمعیت نشان می‌دهد که در طول فرآیند تکامل، همواره اعضای جمعیت بهترین کروموزوم را دنبال نموده‌اند (شکل ۶-بالا-راست)؛ بطوری که با هر بار کاهش ψ مربوط به بهترین کروموزوم جمعیت، ψ مربوط به سایر کروموزوم‌ها نیز به تدریج کاهش یافته است. منحنی تغییرات ψ مربوط به بهترین کروموزوم فرزند نیز این موضوع را تأیید می‌کند (شکل ۶-پایین-چپ). با مشاهده منحنی تعداد تکرارهای الگوریتم MC برای کروموزوم فرزند اول (شکل ۶-پایین-راست)، به روشنی می‌توان دریافت که با پیشرفت فرآیند تکامل تعداد تکرارهای



(I21)



(I31)



($\alpha=0.0$)



($\alpha=0.0$)



($\alpha=0.2$)



($\alpha=0.2$)

شکل ۸. پاسخ الگوریتم EMC برای دو کاشی بافتی (تحت بازرسی) I21 و I31 با $\alpha=0.0$ و $\alpha=0.2$.

همچنین از مقایسه منحنی‌های شعاع و نرخ بهینه‌سازی هر خوشه با یکدیگر، به روشنی می‌توان دید که هر کجا که منحنی شعاع خوشه به طور یکنواخت کم شده، منحنی نرخ بهینه‌سازی اوج گرفته است و برعکس، هر کجا منحنی شعاع خوشه نوسان داشته، از نرخ بهینه‌سازی نیز کاسته شده است. در شکل ۸-چپ پاسخ EMC برای کاشی بافتی (تحت بازرسی) I21 با عیوب خال و سوراخ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، برخلاف کاشی‌های ساده (شکل ۵)، در اینجا حساسیت EMC (حتی با $\alpha=0.0$) به نوبت کمتر است. دلیل این امر را باید در طرح کاشی جستجو نمود. از آنجا که تنوع رنگ‌های موجود در طرح یک کاشی بافتی (یا الگودار) در مقایسه با یک کاشی ساده بیشتر می‌باشد لذا، شعاع خوشه‌بندی نیز برای این نوع کاشی‌ها بیشتر از کاشی‌های ساده خواهد بود (جدول ۲). بدیهی است که با افزایش شعاع خوشه‌بندی، از حساسیت EMC به تغییرات کوچک رنگ در تصویر کاسته می‌شود. با وجود این، EMC بخوبی توانسته است با $\alpha=0.2$ عیوب رنگی کاشی I21 را آشکار نماید (شکل ۸-پایین-چپ) که بیانگر قابلیت اطمینان الگوریتم و عدم وابستگی شدید آن به ضریب α برای طرح‌های مختلف است. همچنین، در شکل ۸-راست نتایج حاصل از اعمال EMC بر کاشی بافتی (تحت بازرسی) I31 نشان داده شده است. از مقایسه بافت کاشی‌های M21 و M31 در شکل ۴ به سهولت می‌توان نتیجه گرفت که تنوع رنگ در M31 بیشتر از M21 است (جدول ۲). الگوریتم EMC به ازای $\alpha=0.0$ و $\alpha=0.2$ نیز نتایجی مشابه برای I21 ارائه داده و در هر دو حالت، در تشخیص عیوب موفق بوده است.

۵-۴. کاشی‌های الگودار

در شکل ۹ پاسخ EMC در آشکارسازی عیوبی چون خال، سوراخ و لعاب‌نگرفتگی برای کاشی‌های الگودار I51 و I61 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، EMC توانسته عیوب هر دو کاشی را با موفقیت تشخیص دهد. با وجود این، EMC در آشکارسازی کامل عیب لعاب‌نگرفتگی در I61 موفق نبوده که این به دلیل تنوع زیاد رنگ در طرح M6 (جدول ۲) بوده است. کاستی فوق را می‌توان به دو روش بر طرف نمود: افزایش تعداد خوشه‌ها (M) و تقسیم کاشی به چندین ناحیه و استخراج خوشه‌ها در هر ناحیه به صورت جداگانه. فعالیت‌های فوق می‌توانند موضوع تحقیقات آینده ما در این زمینه باشند.

۵-۵. ارزیابی کیفی

به منظور ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، از دو مشاهده‌گر خبره نظرسنجی به عمل آمده است. به این ترتیب که وی پس از مشاهده تصویر هر کاشی تحت بازرسی و عیوب آشکار شده در آن توسط EMC، بر اساس میزان صحت نتایج، یکی از گزینه‌های ضعیف (عدم آشکارسازی برخی عیوب مهم)، قابل قبول (آشکارسازی همه عیوب مهم اما نه همه عیوب) و خوب (آشکارسازی همه عیوب) را در فرم نظرسنجی علامتگذاری می‌نمود.

ارزیابی کیفی به دو دلیل در آشکارسازی عیوب کاشی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است: اولاً یک الگوریتم آشکارسازی عیوب زمانی موفق است که منطبق بر دآوری مشاهده‌گر خبره باشد و ثانیاً هدف یک سامانه درجه‌بندی کاشی، شبیه‌سازی عملکرد مشاهده‌گر خبره می‌باشد.

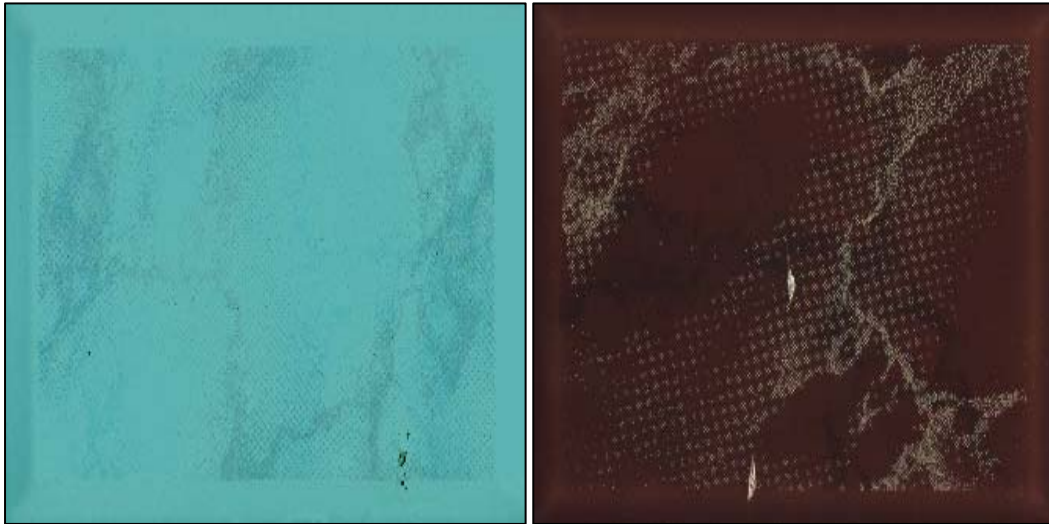
نتایج حاصل در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به اینکه برای هر کاشی دو دآوری انجام گردیده و پایگاه تصویر شامل ۲۰ تصویر از هر طرح می‌باشد لذا، در مجموع ۴۰ دآوری برای هر طرح انجام شده است. با توجه به جدول ۳، الگوریتم پیشنهادی توانسته در ۹۵٪ موارد تمام عیوب رنگی کاشی‌ها را استخراج نماید. در ۵٪ باقیمانده نیز همه عیوب مهم کاشی‌ها آشکار گردیده است؛ اما برخی اشکالات کم اهمیت‌تر مانند خال‌های بسیار ریز استخراج نشده‌اند.

۶. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک الگوریتم خوشه‌بندی رنگ جدید بنام MC، بر اساس معیار MinMax، برای مدلسازی توزیع رنگ در انواع مختلف کاشی‌ها شامل ساده، بافتی و الگودار ارائه شده است.

جدول ۳. ارزیابی کیفی الگوریتم پیشنهادی.

| کاشی | خوب | قابل قبول | ضعیف |
|------|-------|-----------|------|
| M1 | 40 | 0 | 0 |
| | 100% | 0% | 0% |
| M2 | 39 | 1 | 0 |
| M3 | 38 | 2 | 0 |
| M4 | 37 | 3 | 0 |
| | 95.0% | 5.0% | 0% |
| M5 | 39 | 1 | 0 |
| M6 | 35 | 5 | 0 |
| | 92.5% | 7.5% | 0% |
| | 95.0% | 5.0% | 0% |



(I51)

(I61)



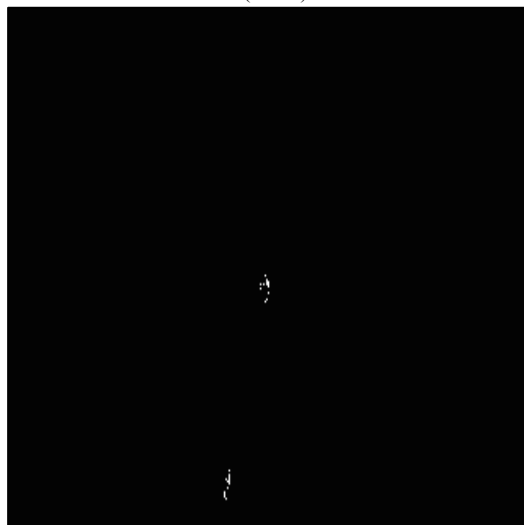
($\alpha=0.0$)



($\alpha=0.0$)



($\alpha=0.2$)



($\alpha=0.2$)

شکل ۹. پاسخ الگوریتم EMC برای دو کاشی الگودار (تحت بازرسی) I51 و I61 با $\alpha=0.0$ و $\alpha=0.2$.

خوشه‌سازی رنگ جدید، دومین کنفرانس ماشین بینایی و پردازش تصویر ایران، جلد ۱، صص ۱۰۸-۱۱۵، ۱۳۸۱.

[۳] م. سعادت‌مند طرزجان و م. خادمی، "ارائه یک الگوریتم خوشه‌سازی رنگ جدید بر اساس معیار MinMax و بهینه‌سازی آن به کمک الگوریتم‌های ژنتیکی و استفاده از آن در آشکارسازی عیوب رنگی کاشی‌ها"، پنجمین کنفرانس سیستم‌های هوشمند، صص. ۲۲۸-۲۳۵، ۱۳۸۲.

[4] P. Gallina, "Neural network painting defect classification using Karhunen-Loeve transformation," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 32, pp. 29-40, 1999.

[5] Z.F. Hocenski and E.K. Nyarko, "Surface quality control of ceramic tiles using neural networks approach," *IEEE Int'l Sym. Industrial Electronics (ISIE02)*, 2002, pp. 657-660.

[6] C. Boukouvalas, J. Kittler, R. Marik, and M. Petrou, "Color grading of randomly textured ceramic tiles using color histograms," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 46, no. 1, pp. 219-226, 1999.

[7] G.S. Desoli, S. Fioravanti, R. Fioravanti, and D. Corso, "A System for Automated Visual Inspection of Ceramic Tiles," *Int'l Conf. Industrial Elec., Control, and Instrumentation (IECON'93)*, 1993, pp.1871-1876.

[8] K.Y. Song, J. Kittler, M. Petrou, and I. Ng., "Chromato-structural approach towards surface defect detection in random textured images," *Proc. of SPIE*, vol. 2183, pp. 193-204, 1994.

[9] M. Mirmehdi, R. Marik, M. Petrou, and J. Kittler, "Structural Fault Detection in Random Macro Textures," *Proc. of Signal Processing, Theories and Applications*, vol. III, pp. 1499-1502, Sep. 1996.

[10] T. Maenpää, M. Turtinen, and M. Pietikäinen, "Real-time surface inspection by texture," *Real-Time Imaging*, vol. 9, pp. 289-296, 2003.

[11] C. Palm, "Color texture classification by integrative co-occurrence matrices," *Pattern Recognition*, vol. 37, pp. 965-976, 2004.

[۱۲] م. سعادت‌مند و م. خادمی، "ارائه یک الگوریتم جدید برای آشکارسازی عیوب بافتی کاشی‌ها"، دوازدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران، جلد ۱، صص ۵۱-۵۶، ۱۳۸۳.

[13] C. Boukouvalas, J. Kittler, R. Marik, M. Mirmehdi, and M. Petrou, "Ceramic tile inspection for colour and structural defects", *2nd Int'l Conf. Advances in Materials and Processing Technologies*, 1995, pp. 390-399.

[14] M. Petrou, "Optimal convolution filters and an algorithm for the detection of wide linear features", *IEE Proceeding-I*, vol. 140, no. 5, pp. 331-339, 1993.

MC با کمینه کردن شعاع خوشه‌ها، توزیع بردارهای رنگ در تصویر (یک یا چند کاشی مرجع) را به صورت چند خوشه کروی مدل‌سازی میکند. به منظور افزایش سرعت همگرایی و پایداری الگوریتم، از یک روش وقتی برای تنظیم نرخ بهینه‌سازی در MC استفاده شده است. همچنین، در این مقاله، از یک الگوریتم ژنتیکی برای بهینه‌سازی مراکز اولیه خوشه‌ها در MC استفاده گردیده است (الگوریتم EMC). در حقیقت، MC نقش تابع ارزیابی را برای EMC ایفا می‌کند.

الگوریتم پیشنهادی برای استخراج عیوب رنگی شامل دو مرحله استخراج ویژگی و بازرسی است. در مرحله استخراج ویژگی مراکز بهینه خوشه‌ها با استفاده از یک یا چند کاشی مرجع بدست آمده و شعاع هر یک محاسبه می‌شود. در مرحله بازرسی، بردارهای رنگ هر کاشی تحت بازرسی با استفاده از مراکز خوشه‌های بهینه حاصل از مرحله استخراج ویژگی بر اساس قانون نزدیکیترین همسایه خوشه‌بندی شده و هر بردار رنگ که فاصله آن تا مرکز خوشه مربوطه بیشتر از شعاع آن خوشه باشد، به عنوان عیب رنگی تشخیص داده می‌شود.

نتایج تجربی بر روی یک پایگاه تصویر شامل ۱۲۰ تصویر در شش طرح بیانگر عملکرد قابل قبول الگوریتم پیشنهادی در آشکارسازی عیوب رنگی در همه انواع کاشی‌ها شامل ساده، بافتی و طرح‌دار بوده است. از مهمترین مزایای الگوریتم پیشنهادی می‌توان به تنظیم آسان حساسیت، دقت قابل قبول و سرعت پردازش بالا (در مرحله بازرسی) اشاره نمود.

الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص عیوب رنگی از ویژگی‌های عمومی توزیع رنگ در طرح کاشی سود جسته و قادر به ارزیابی توزیع رنگ به صورت محلی و با توجه به الگوی کاشی نمی‌باشد. با تقسیم کاشی به چندین ناحیه و استخراج خوشه‌های رنگ در هر یک از این نواحی می‌توان اشکال فوق را برطرف نمود. چگونگی پیاده‌سازی ایده فوق و نحوه تأثیر آن بر عملکرد الگوریتم سؤالاتی هستند که نیازمند تحقیق بیشتر در این زمینه می‌باشند.

منابع

[1] C. Boukouvalas, J. Kittler, R. Marik, and M. Petrou, "Automatic color grading of ceramic tiles using machine vision," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 132-135, 1997.

[۲] م. سعادت‌مند و م. خادمی، "آشکارسازی عیوب رنگی کاشی‌ها با استفاده از مدل‌سازی خوشه‌ای و ارائه یک الگوریتم

<http://www.carleton.ca/~hmasum/clustering.html>

[24] D. Fasulo, "An analysis of recent work on clustering algorithms," *Technical Report # 01-03-02*, 1999.

[25] K. Krishna, K.R. Ramakrishnan, M.A.L. Thathachar, "Vector quantization using genetic K-means algorithm for image compression," *ICICS'97*, 1997.

[26] J.S. Arora, O.A. Elwakeil, A.I. Chahnde, C.C. Hsieh, "Global optimization methods for engineering applications: a review," *Structural Optimization*, vol. 9, pp. 137-159, 1995.

[27] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Prentice-Hall, 1999.

[28] J. Y. F. Yam, T. W. S. Chow, "Extended least squares based algorithm for training feedforward networks," *IEEE Trans on Neural Networks*, vol. 8, no. 3, pp. 806-810, 1997.

[29] D. Whitley, "A genetic algorithm tutorial," *Statistics and Computer*, vol. 4, pp. 65-85, 1994.

[30] J. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, 1975.

[31] D.E. Goldberg, "Genetic and evolutionary algorithms in the real world," *IlligAL Report No. 99013*, March 1999.

[32] M. Mitchell, S. Forrest, "Genetic algorithms and artificial life," *Artificial Life*, vol. 1, no. 3, pp. 267-289, 1994. Reprinted in C.G. Langton (Ed.) *Artificial Life: an Overview*. MIT Press, Cambridge, MA (1995).

[33] R. Samii, *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms*. Wiley – RsP, 1999.

[34] D. Whitley, "The GENITOR algorithm and selective pressure," *Proc. 3rd Int'l Conf. Genetic Algorithms*, ed. Morgan-Kaufmann: 116-121, 1989.

[۱۵] م. سعادت‌مند و م. خادمی، "ارائه یک الگوریتم جدید برپایه شکل توسعه‌یافته فیلتر LoG برای آشکارسازی عیوب تیز کاشی‌ها و سرامیک‌ها"، *یازدهمین کنفرانس مهندسی برق/ایران*، جلد ۲، صص ۵۰۰-۵۰۷، ۱۳۸۲.

[16] C. Boukouvalas, F.D. Natale, G.D. Toni, J. Kittler, R. Marik, M. Mirmehdi, M. Petrou, P. L. Roy, R. Salgari, and G. Vernazza, "An integrated system for quality inspection of tiles", *Int'l Conf. Quality Control by Artificial Vision*, vol. 97, 1997, pp. 49-54.

[17] A. Jiaoyan, L. Di, and Z. Xuefeng, "Combination of wavelet analysis and color applied to automatic color grading of ceramic tiles," *17th Int'l Conf. Pattern Recognition (ICPR'04)*, vol. 3, 2004, pp. 235-238.

[18] S. Fioravanti, F.G. D. Natale, R. Marik, M. Mirmehdi, J. Kittler, and M. Petrou, "Spectral and rank order approaches to texture analysis," *European Trans. Telecommunications*, vol. 6, no. 3, pp. 287-300, 1995.

[۱۹] م. سعادت‌مند و م. خادمی، "الگوریتمی برای آشکارسازی عیوب تیز کاشی‌ها با استفاده از عملگرهای ریخت‌شناسی و الگوریتم‌های ژنتیکی"، *دوازدهمین کنفرانس مهندسی برق/ایران*، جلد ۱، صص ۷۷-۸۲، ۱۳۸۳.

[20] C. Boukouvalas, F.D. Natale, G.D. Toni, J. Kittler, R. Marik, M. Mirmehdi, M. Petrou, P.L. Roy, R. Salgari, and G. Vernazza, "ASSIST: automatic system for surface inspection and sorting of tiles", *J. of Material Processing Technology*, vol. 82, no. 1-3, pp. 179-188, 1998.

[21] A.N. Netraval, B.G. Haskell, *Digital Pictures, representation, and compression*. 2nd printing, Plenum Press, AT&T Bell Laboratories, 1989.

[22] D. Bourgin, "Color space FAQ," 1994.

[23] H. Masum, "Clustering algorithms (an overview of clustering techniques, with potential applications)," Available Online: