

# بازیابی داده های طیفی از صحنه های طبیعی با یک دوربین دیجیتال RGB و فیلتر های رنگی

چکیده :

بسیاری از روش های بازیابی طیفی با استفاده از دوربین های دیجیتال RGB، صافی و یکنواختی منبع نور و طیف های بازتاب را فرض کرده و از مدل های خطی دو بعدی استفاده می کنند. هدف این مطالعه بررسی و تست این موضوع است که آیا یک روش نگاشت مستقیم می تواند به جای یک رویکرد مدل های خطی برای بازیابی تابش های طیفی و بازتاب های صحنه های طبیعی با دوربین های دیجیتال RGB و فیلتر های رنگی استفاده شود. در شبیه سازی های کامپیوترا، یک دوربین دیجیتال RGB با بیش از سه فیلتر رنگی به منظور تصویر برداری از صحنه های حاصل از یک دیتابیس تصویر ابر طیفی استفاده شد. سه شاخص برای ارزیابی بازیابی با روش نگاشت مستقیم استفاده شد: خوبی برآش، خطای جذر میانگین مربعات و یک متريک تفاضل رنگی. نتایج نشان داد که با دو و سه فیلتر، هر دو تابش های طیفی و بازتاب ها را می توان به طور دقیق برای بسیاری از شرایط کاربردی، بازیابی کرد. با افزایش اندازه پیچیدگی طیفی، یک دوربین RGB و تعداد کمی فیلتر رنگی، امکان بازیابی بهتر صحنه های طبیعی نسبت به استفاده نهایا از RGB وجود دارد.

**کلمات کلیدی :** بازتاب، سیستم تصویر برداری چند طیفی، منبع نور، صحنه های طبیعی

## مقدمه

هدف تصویر برداری چند طیفی، بازیابی تابش یا طیف های تابشی و انعکاسی در هر پیکسل در یک صفحه مورد نظر است(1-4). معمولاً، یک سیستم چند طیفی متشکل از دوربین های دیجیتال متصل به طیف وسیعی از فیلتر های پهن و باریک باند است. در صورتی که تعداد فیلتر ها به اندازه کافی بزرگ باشند و پهنای باند آن ها به اندازه کافی کوچک باشد، همانند سیستم تصویر برداری ابر طیفی، داده های طیفی را می توان به طور دقیق بازیابی کرد(5-9). با این حال با چند فیلتر پهن باند، بازیابی طیفی منجر به ایجاد یک مسئله ناخوش تعریف می شود. بسیاری از روش های تصویر برداری چند طیفی از یکنواختی و صافی طیف های سیگنال با منابع نور و بازتاب های طیفی استفاده می کنند که با مدل های بعد پایین بر اساس تحلیل مولفه های طیفی (PCA) و یا تحلیل

مولفه های مستقل(ICA) (16-20) نشان داده می شوند. از این روی با توجه به یک مدل خطی(10-21)، در صورتی که تعداد ضرایب ICA یا PCA یک مجموعه خاصی از طیف ها برابر با تعداد پاسخ های دوربین باشد (در ساده ترین مورد تریکوماتیک، سه مورد)، آنگاه طیف ها را می توان با یک تبدیل معکوس مجموعه ای از پاسخ های طیفی بدست اورد و تبدیل پیشرو از مجموعه داده های معرف براورد شد. در صورتی که تعداد ضرایب بیش از تعداد مقادیر پاسخ باشد، آنگاه ضریب PCA باقیمانده با تصویر برداری از صحنه تحت منابع نور مختلف و یا با معرفی فیلتر های رنگی برای اصلاح طیف های سنسور افزایش یابد (22-23).

به جای اجرای ICA یا PCA اولیه، مجموعه ای از طیف های سیگنال را می توان به طور مستقیم از مجموعه ای از پاسخ های دوربین براورد کرد. این پاسخ ها را می توان از خود دوربین بدست اورد و برای اهداف فعلی مقاله، می توان آن ها را از یک مجموعه حساسیت های طیفی محاسبه کرد (بخش حساسیت های طیفی دوربین و فیلتر های رنگی). برای یک دوربین دیجیتال RGB سنتی، مجموعه ای از پاسخ های دوربین شامل ماتریس سه مقدار برای هر پیکسل در همه پیکسل ها در صحنه است. در صورتی که فیلتر های رنگی معرفی شوند، آنگاه مجموعه ای از پاسخ های دوربین شامل چندین ماتریس (بخش محاسبات) در نظر گرفته می شود. روش نگاشت مستقیم به طور دقیق در بخش بعدی توصیف می شوند.

### نگاشت مستقیم پاسخ های دوربین و طیف ها

با توجه به یک مجموعه ای از طیف های آموزشی  $S$  (که می تواند تابش های طیفی یا بازتاب های مربوط به هر نمونه خاص از پیکسل ها در صحنه باشد) و مجموعه متناظر از پاسخ های دوربین  $R$ ، یک ماتریس تبدیل بازیابی  $D$ ، توسط  $D = SR^+$  تعریف می شود که در آن  $R^+$  شبیه اینورس  $R$  می باشد (این عبارت متفاوت از عبارت ارایه شده در منبع 24 است). اگر  $R$  دارای رتبه کامل باشد، آنگاه  $R^+ = (R^t R)^{-1} R^t$  است که در آن

ترانسپوز  $R$  است. یک براورد  $\hat{S}_1$  مجموعه ای از طیف های آزمایشی  $S_1$  بوده و از مجموعه متناظر از پاسخ های دوربین  $R_1$  با استفاده از تبدیل  $D$  بدست می اید یعنی  $\hat{S}_1 = DR_1$  (منبع 25 و 26). روش نگاشت مستقیم به طور موفق در زمینه تصویر برداری هنری (22-27) و براورد منبع نور و روشنایی استفاده شده است با این حال این مسئله هنوز مشخص نیست که آیا برای براورد بازتاب طیفی و انعکاسی در شرایطی که روشنایی غیر قابل

کنترل است، کارامد و موثر است یا خیر. صحنه های طبیعی، که موضوع این مطالعه است، بیانگر یک چالش مهم برای روش های بازیابی طیفی است.

### بازیابی طیف های طبیعی

انتخاب طیف های آموزشی مورد استفاده برای محاسبه تبدیل بازیابی، در تعیین عملکرد آن اهمیت زیادی دارد. در صورتی که مجموعه معرف نباشد، آنگاه تبدیل بازیابی نیز غیر صحیح خواهد بود و اگر بسیار مشابه با مجموعه آزمایشی باشد، عمومیت خود را از دست می دهد. در عمل، مجموعه های آموزشی مختلف برای کاربرد ها و شرایط مختلف استفاده می شود برای مثال رنگ روغن برای تحلیل چند طیفی اثار هنری.

اگرچه یک استاندارد در برخی از شرایط ازمایشگاهی نظری مجموعه مانسل و مک بث کالر چکر، که شامل طیف های بازتاب در محیط های طبیعی است، می تواند یک سری مجموعه های آزمایشی بهینه را در اختیار بگذارد زیرا آن ها بیانگر و مدل کننده توزیع بازتاب های طیفی طبیعی نمی باشند.

هدف این مطالعه بررسی این است که آیا روش نگاشت مستقیم را می توان به جای رویکرد مدل های خطی برای بازیابی تابش های طیفی و بازتاب ها از صحنه های طبیعی مورد استفاده قرار داد یا خیر. طیف های طبیعی با تصویر برداری ابر طیفی بدست آمده و ماتریس بازیابی با استفاده از پاسخ های طیفیشیبه سازی شده یک دور بین دیجی تال RGB همراه با ترکیبات مختلف فیلتر های رنگی مقایسه می شود.

نتایج نشان داد که طیف های طبیعی به طور صحیح با این سیستم ساده بازیابی شدند و همان طور که انتظار می رفت، صحت به طور معنی داری بهتر بود به خصوص زمانی که بازتاب های طبیعی به عنوان مجموعه آموزشی به جای نمودار رنگی استفاده شد

### روش ها

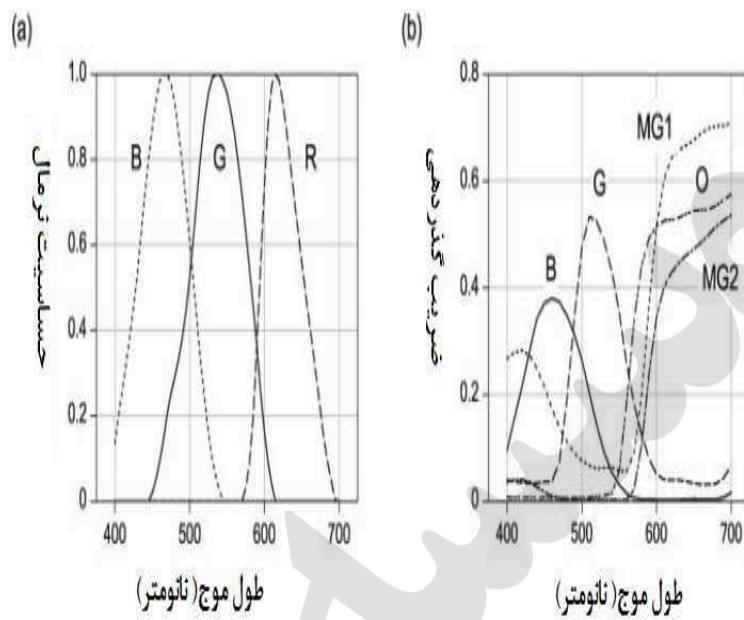
#### داده های ابر طیفی

داده های ابر طیفی از سی صحنه طبیعی، پانزده محیط روستایی و پانزده محیط شهری از طریق دیتابیس با تفکیک پذیری (وضوح) مکانی بالا گرفته شدند. صحنه ها از منطقه مینهو در پرتغال گرفته شد که دارای اقلیم معتدل و طیف وسیعی از سازند های سنگی و پوشش گیاهی طبیعی است. سیستم تصویر برداری طیفی از یک دوربین مونو کروماتیک دیجیتال پلیتر با وضوح مکانی پیکسل های  $1024 \times 1344$  (هامستو، مدل C4742-95-12ER)

) با یک فیلتر کریستال مایع ( واری اسپس مدل VS-VIS2-10-HC-35-SQ، مرکز تحقیقات و ابزار سازی کمبریج) نصب شده در جلوی لنز با فیلتر بلوک مادون قرمز استفاده می کند. برای هر صحنه، 33 تصویر در بازه های 10 نانومتری در 400 تا 720 نانومتر با وضوح شدت 12 بیت در هر پیکسل گرفته شد. این توالی های تصویر خام از نظر نویز، انحراف تصویر، و اتفاصل کروماتیک بزرگ نمایی یا ترجمه تصحیح شد. بازتاب طیفی در هر پیکسل با نرمال سازی سیگنال تصحیح شده در برابر مقادیر بدست آمده از رفرنس طبیعی شامل یک سطح خاکستری صفحه کوچک واقع در صحنه براورد شد. بازتاب طیفی در مرجع با یک اسپکترو رادیومتر اندازه گیری شد که واسنجی و کالیبراسیون آن توسط ازمایشگاه فیزیک ملی صورت گرفته بود. تابش طیفی بازتاب شده در هر پیکسل با ضرب بازتاب طیفی در بازتاب طیفی برخوردي در مرجع طبیعی براورد شد) کالری متر طیفی، مدل PR-650، فتو ریسرج، CA). تجزیه تحلیل فرض اساسی این روش براورد برای سطوح روشن مستقیم یا غیر مستقیم در پیوست الف از منبع 30 نشان داده شده است. روش به کار برده شده از حیث ماهیت سیگنال مدل سازی شده خنثی بودف به طوری که هر دو طیف های تابشی و بازتابی در نظر گرفته شدند.

### حساسیت های طیفی دوربین و فیلتر های رنگی

پاسخ های دوربینی محاسبه شده با استفاده از حساسیت های طیفی دوربین RGB دیجیتال با وضوح مکانی ۱۰۲۴ × ۱۲۸۰ پیکسل با وضوح شدت 12 بیتی در هر کanal و در هر پیکسل بدست امد. شکل 1 الف حساسیت های طیفی سنسور های قرمز، سبز و آبی CCD دوربین را نشان می دهد. حساسیت های اوج و پهنهای باند سه کanal مشابه با دوربین های RGB تجاری موجود بود. شکل 1 ب، ضریب گذر یا انتقال طیفی پنج فیلتر رنگی را نشان می دهد که در شبیه سازی در جلوی دوربین برای اصلاح پاسخ های دوربین واقع شده است. فیلتر ها نمونه هایی از مواد پلاستیکی اکریلیک شفاف بودند: دو قرمz (O)، پرتقال (Mg1) و (Mg2)، یکی سبز (G)، و یکی آبی (B).. این انتخاب بر اساس بهینه سازی رایانشی اکتشافی قبلی فیلتر های مختلف با ضریب گذر طیفی و پهنهای باند متغیر است.



شکل ۱: الف: حساسیت های طیفی نرمال سنسور های دوربین دیجیتال RGB ب: گذر دهی طیفی فیلتر های رنگی مورد استفاده با دروبین ها

#### محاسبات

مجموعه های مختلف قطعات اسکن برای مجموعه های آموزشی و آزمایشی استفاده شد. مجموعه آموزشی - ماتریس مورد استفاده برای دست اوردن ماتریس بازیابی، از 30 قطعه مختلف تشکیل شد یکی از هر صحنه، هر قطعه اندازه پیکسل  $151 \times 151$ . سه مجموعه داده اضافی زیر برای تایید صحت روش استفاده شد. مجموعه آموزشی 1 از سه قطعه تصادفی از مجموعه آموزش ماتریس تشکیل شد. مجموعه 2 از 30 قطعه  $61 \times 61$  پیکسل بدون پیکسل ها در مجموعه آموزشی ماتریس تشکیل شد. و مجموعه آزمایشی 3 با سه قطعه اضافی 151 پیکسل از سایر صحنه ها تشکیل شد (نمای کلوزاپ در مجموعه ازمایشی ماتریس استفاده نشده است).

اثر هر همبستگی احتمالی بین پیکسل های مجاور با نمونه گیری از نیمی از صحنه ها در پیکسل های عمودی و افقی تست شد و طیف های تابیش بازیابی شده بال نوع بدست آمده از صحنه های نمونه برداری نشده مقایسه شدند. دو مجموعه از سیگنال های بازیابی شده (گه توزیع آن ها با تست کلوموگروف اسمیرنوف غیر نرمال بودند) تفاوت معنی داری را در همه مجموعه فیلتر ها نشان دادند (ازمون رتبه بندی ویلکوکسون  $P < 0.001$ ). چون بازتاب ها تفاوت معنی داری را در پیکسل های مجاور نشان دادند، معرفی فاصله های بزرگ تر پیکسل، که یکپارچگی مکانی نمونه را از دست داده است، به طور غیر ضروری در نظر گرفته شد.

مجموعه آزمایشی ماتریس شامل  $30 \times 151 \times 151$  در هر طیف در 400 تا 700 نانومتری تعریف شد.

این طیف‌ها و طیف‌های دیگر در بازه‌های 5 نانومتری مطابق با بازه‌های نمونه برداری برای حساسیت‌های طیفی دور بین میان یابی شد (نمونه گیری شده در فاصله‌های 10 نانومتری)، و این منجر به یک ماتریس  $S$  از مقدار  $684030 \times 61$  شد. پاسخ‌های دوربین  $r_i$  به این طیف‌ها (123 به ترتیب برای سنسور‌های قرمز، سبز و آبی است) که به صورت زیر محاسبه شد: در هر پیکسل، فرض کنید که  $R_i(\lambda)$  طیف سیگنال، حساسیت طیفی دوربین برای هر حسگر  $F(\lambda)$  گذر دهی طیفی یکی از فیلتر‌های انتخاب شده است که در آن  $\lambda = 400, 405, \dots, 700 \text{ nm}$  است. سپس

$$r_i = \sum_{\lambda=400}^{700} S(\lambda)F(\lambda)R_i(\lambda). \quad (1)$$

می‌باشد.

با کل  $n$  فیلتررنگی،  $3n + 3$  پاسخ دوربین برای هر پیکسل (از جمله پاسخ‌های بدون فیلتر‌های رنگی)، یک ماتریس  $D$  برای کل قطعه تشکیل شد. همان‌طور که در مقدمه گفته شد، ماتریس بازیابی  $D^{(3n+3) \times 61}$  از شبیه اینورس  $R^+$  یا  $R$  به صورت زیر محاسبه شد

$$D = SR^+. \quad (2)$$

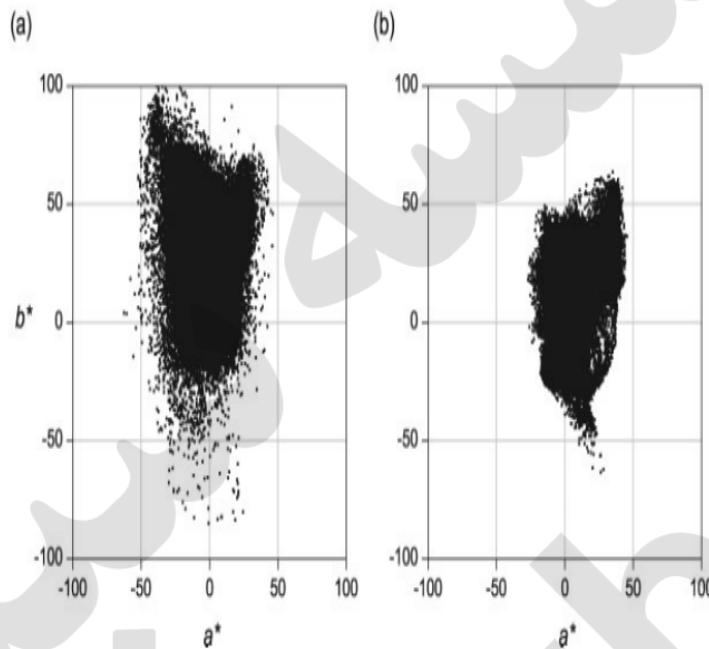
ماتریس  $D$  برای دوربین بدون فیلتر رنگی و یک فیلتر (هر یک از 5 فیلتر) با دو فیلتر (چهار ترکیب متفاوت از دو فیلتر رنگی) و با سه فیلتر (دو ترکیب متفاوت)، محاسبه شد. فیلتر‌های مورد استفاده در ترکیب دو فیلتر از انواع با بهترین عملکرد انتخاب شد. فیلتر‌های مورد استفاده در ترکیب سه فیلتری از انواع با بهترین عملکرد با بازیابی دو فیلتری انتخاب شدند. چهار ترکیب دو فیلتری و دو ترکیب سه فیلتری تست شدند.

ارزیابی کیفیت طیفی و کالریمتری سیگنال‌های بازیابی شد

سه شاخص از عملکرد بازیابی برای اجتناب از برخیتکشاخص‌ها استفاده شد: دو مورد شامل شاخص‌های طیفی و یک مورد کالریمتری بود. به طوری که حساسیت چشم به تفاوت‌های رنگی در نظر گرفته شد. اولین مورد، ضریب

خوبی برازش CFC) بود که به صورت کوسینوس زاویه بین سیگنال بازیابی شده  $\hat{S}$  و سیگنال اصلی تعریف می شود

$$GFC = \frac{\sum_{\lambda=400}^{700} \hat{S}(\lambda)S(\lambda)}{\left(\sum_{\lambda=400}^{700} \hat{S}(\lambda)^2\right)^{1/2} \left(\sum_{\lambda=400}^{700} S(\lambda)^2\right)^{1/2}}. \quad (3)$$



شکل 2: نمودار CIELAB مجموعه آموزش ماتریس ابرای الف: داده های واقعی و ب: داده های شهری

مزیت رایج ترین شاخص تشابه طیفی، این است که تحت تاثیر فاکتور های مقیاس قرار نمی گیرد. مقادیر متغیر از 0 تا 100 درصد می باشد و  $GFC \geq 99.5\%$  با بازیابی قابل قبول و  $GFC \geq 99.99\%$  با یک برازش تقریب‌آدقیق متناظر است. دومین شاخص، خطی جذر میانگین RMSE می باشد که برای تابیش ها، مقیاس بندی شد که ماکریمم مقدار در دامنه طول موج بود. سومین مورد تفاضل رنگی  $\Delta E_{ab}^*$  CIELAB بود که با استناد به سیگنال رنگ یک لکه سفید در صحنه برای براورد نور مجاور شد. برای بازتاب ها، یک منبع نور با انرژی یکسان فرض شد. منابع نور استاندارد و واقعی استفاده نشد زیرا هدف اصلی مقایسه ترکیبات مختلف فیلتر بود. این منبع نور با انرژی یکسان با نور صحنه ثبت شده در زمان کسب تصویر ترکیب شود (بخش داده های طیفی). این سه شاخص برای بازیابی طیفی مجموعه های ازمایشی 1، 2 و 3 استفاده شد.

## نتایج و تفاسیر

از روش نگاشت مستقیم، دو براورد مربوط به ماتریس بازیابی D بدست امد. اولین مورد به پاسخ های دوربین به تابش های طیفی و پاسخ های دوربین به بازتاب های طیفی بود. بر اساس تعریف، تابش های طیفی در یگ پیکسل مطابق با محصول بازتاب طیفی و توزیع توان طیفی منبع نور بود. براورد های بازتاب و تابش طیفی به طور مجزا در زیر بخش های زیر در نظر گرفته شدند) به ترتیب به بخش های بازیابی طیفی و بازیابی انعکاس طیفی مراجعه کنید)

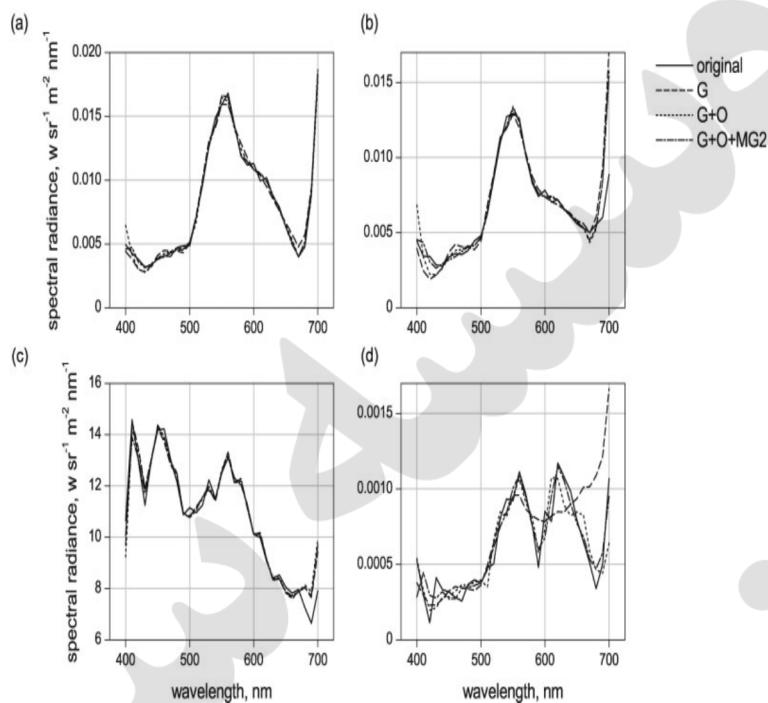
هم چنین بازیابی بستکی به مجموعه داده های آموزشی ماتریس دارد. اگرچه در فضای CIELAB، داده های آموزشی ماتریس شهری و روستایی دارای بازه های روشناهی مشابه بود و توزیع حساسیت آن ها نیز متفاوت بود زیرا نمودار های  $a^*$  در برابر  $b^*$  در شکل 2 نشان داده شده اند. تفاوت بین دو مجموعه از داده ها در بخش تفاوت های بین صحنه های شهری و روستایی در نظر گرفته شده اند بازیابی بازتاب طیفی

شکل 3 چهار نمونه از بازیابی بازتاب طیفی برای قطعات مختلف صحنه را نشان می دهد. مثال های مربوط به ردیف فوقانی الف و ب از مجموعه ازمايشی 1 و ردیف پایین ب و ت، در مجموعه ازمايشی 1 نشان داده شده اند. در قسمت چپ، الف و پ، مقادیر CFC و RMSE در صدک پنجم و در سمت راست ب و ت، در صدک انتهایی است. تفاوت بین مقیاس های بازتاب ناشی از تابش های بازیابی شده از مناطق روشن شده توسط نور خورشید و مناطق سایه دار است. بازیابی مستقل از مقیاس سیگنال می باشد و این مسئله به دلیل ویژگی خطی پاسخ های دوربین و روش نگاشت مستقیم است.

بازیابی با افزایش تعداد فیلتر های دوربین بهبود می یابد. ترکیب فیلتر نشان داده شده با فیلتر های دارای بهترین نتایج مقایسه شده اند و این در حالی است که ترکیب دو فیلتر هنوز بهتر از یک فیلتر بود و ترکیب سه فیلتر بهتر از ترکیب دو فیلتر بود. با این حال معرفی فیلتر های رنگی بیشتر با افزایش در زمان تصویر برداری، بعيد است که منجر به بهبود معنی داری شود.

جدول 1 میانگین ( و مشتق استاندارد نمونه) GFC،  $\Delta E_{ab}^*$  و RMSE محاسبه شده را در همه طیف ها نشان می دهد. تنها بهترین مجموع فیلتر برای ترکیبات سه و دو فیلتری را نشان می دهد. مقادیر RMSE برای ترکیبات

دو سه و فیلتری، پایین هستند. تفاوت های رنگی  $\Delta E_{ab}^*$  فراتر از واحدنیست و این نشان می دهد که تفاوت های کالری متری قابل توجه بین سیگنال های اصلی و بازیابی شده وجود دارد.



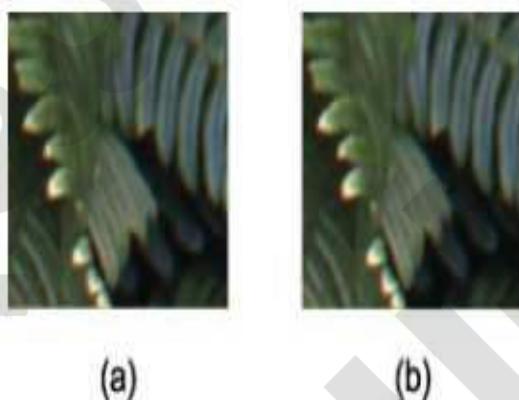
اثرات تعداد فیلتر ها و نوع فیلتر توسط ANOVA دو طرفه فریدمن غیر پارامتری در سه شاخص تایید شد و نتایج آن از نظرآماری معنی دار بود. این آزمون های آماری نشان می دهد که تفاوت ها در بازیابی با یک، دو و سه فیلتر معنی دار بود و این که بازیابی با ترکیبات دو و سه فیلتر معنی دار تر از سایر ترکیبات احتمالی بود.

بازیابی برای مجموعه اموزشی 1 بهتر از مجموعه های اموزشی 2 و 3 بود. این غیرمنتظره بود زیرا برآورد ماتریس بازیابی بر اساس مجموعه ازمایشی 1 بود. شگل 2 تصاویر یک قطعه از طیف های بازتاب الف و بازیابی آن ب را با سه فیلتر رنگی نشان می دهد. ترسیم نمودار بر اساس مقادیر پاسخ طیفی محاسبه شده بود. تفاوت های کالریمتری بین تصاویر اصلی و بازیابی شده قابل شناسایی نبود و این با مقادیر  $\Delta E_{ab}^*$  نشان داده شد که کم تر از یک بود.

جدول 1: کیفیت بازیابی تابش های طیفی از صحنه های طبیعی

## فیلتر های رنگی

		مجموعه ازمايشي	شاخت	None	MG 1	MG 2	B	G	O	G + O	G + O + MG2
GFC (%)	1	99.20 (0.76)	99.64 (0.57)	99.67 (0.56)	99.55 (0.43)	99.50 (0.57)	99.62 (0.41)	99.71 (0.34)	99.86 (0.12)		
	2	97.06 (7.14)	98.34 (4.88)	98.46 (4.52)	98.54 (3.46)	98.08 (5.05)	98.46 (3.54)	99.01 (2.39)	99.34 (1.58)		
	3	97.05 (5.61)	98.64 (3.44)	98.69 (2.92)	98.53 (3.06)	98.61 (3.26)	98.61 (2.24)	98.96 (1.80)	99.26 (1.40)		
RMSE (%)	1	8.28 (2.46)	5.12 (2.09)	4.83 (2.11)	5.99 (1.92)	6.42 (1.84)	5.53 (1.48)	4.72 (1.82)	3.32 (1.15)		
	2	9.96 (3.96)	6.65 (3.48)	6.44 (3.29)	6.82 (3.14)	7.37 (3.67)	7.02 (3.15)	5.65 (3.04)	4.55 (2.83)		
	3	9.31 (3.35)	6.34 (2.50)	6.17 (2.50)	6.73 (2.54)	6.37 (2.54)	6.21 (2.82)	6.14 (2.24)	5.00 (2.17)		
$\Delta E_{ab}^*$	1	0.32 (0.16)	0.09 (0.05)	0.10 (0.06)	0.22 (0.13)	0.06 (0.04)	0.18 (0.12)	0.09 (0.06)	0.05 (0.04)		
	2	0.63 (0.61)	0.24 (0.28)	0.28 (0.32)	0.35 (0.32)	0.17 (0.20)	0.35 (0.46)	0.12 (0.14)	0.09 (0.12)		
	3	1.01 (0.76)	0.28 (0.18)	0.36 (0.26)	0.24 (0.12)	0.15 (0.09)	0.43 (0.32)	0.08 (0.06)	0.08 (0.06)		



شکل 4: تصویر الف: قطعه صحنه اصلی و ب: قطعه پوشش دهی شده با سه فیلتر رنگی

بازیابی بازتاب طیفی

شکل 5 چهار نمونه از بازیابی بازتاب طیفی را برای قطعات مختلف صحنه نشان می دهد. نمونه های مربوط به ردیف بالا الف و ب، از مجموعه ازمايشی 1 و بر روی ردیف پایینی پ و ت از مجموعه ازمايشی 2 می باشند. نمونه های مربوط به سمت چپ الف و پ، دارای مقادیر GFC و RMSE در پنجمین صدک و موارد مربوط به سمت راست الف و ب، در پنجمین صدک پایین است.

جدول 2 میانگین ( انحراف معیار نمونه) از GFC، RMSE و  $\Delta E_{ab}^*$  محاسبه شده را در همه طیف ها نشان می دهد. تنها بهترین ترکیب فیلتر برای مجموعه دو و سه فیلتر نشان داده شده است. همانند تحلیل بازیابی تابش

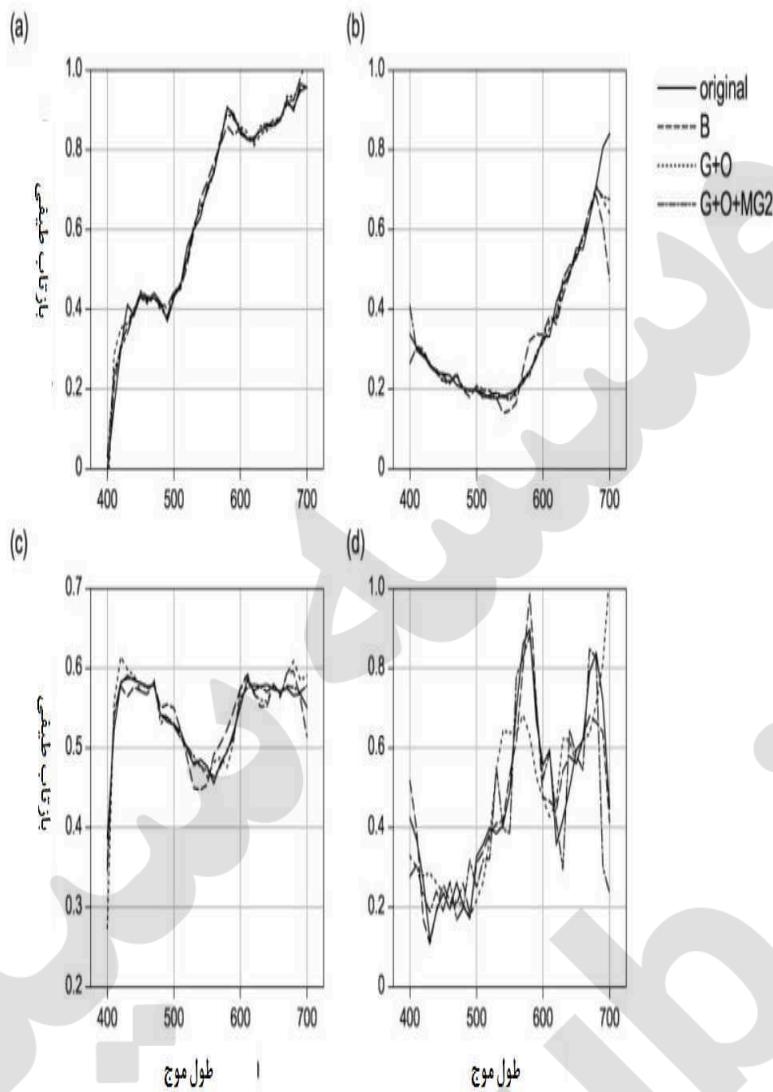
طیفی، اثرات قوی تعداد فیلتر و نوع فیلتر با ANOVA دو سویه فریدمن غیر پارامتری تایید شد و نتایج آن کاملاً معنی دار بود.

این سطح عملکرد با عملکرد موجود در مطالعات دیگر با استفاده از روش نگاشت مستقیم و یا سایر روش‌ها برای بازیابی داده‌های طیفی از رنگ و استانداردهای تصویری تحت نور کنترل شده مناسب است

تفاوت‌های بین صحنه‌های روستایی و شهری

در تحلیل فوق، طیف‌های صحنه‌های روستایی و شهری تفکیک نشده‌اند. با این حال، چون دو نوع طیف دارای منشا فیزیکی و ویژگی‌های متفاوتی هستند (شکل 2)، احتمال دارد که اثر بخشی بازیابی نیز متفاوت باشد. بر همین اساس، ماتریس‌های بازیابی برای هر دو طیف‌های بازتاب و تابش پس از تفکیک صحنه‌های روستایی و شهری از مجموعه‌های 1 و 2 براورد شدند. مجموعه ازمایشی 3 به عنوان تست مرجع برای هر دو ماتریس استفاده شد به طور یکه دو ماتریس بازیابی برای یک مجموعه از طیف‌ها مقایسه شد. برای مجموعه ازمایشی 1، بازیابی 99.64 GFC بازتاب‌ها در مناطق روستایی بهتر از مناطق شهری بود. بازیابی روستایی با فیلتر G یک میانگین

$\Delta E_{ab}^*$  درصد، 5.35 RMSE و 0.04 برابر با 0.04 بود در حالی که بازیابی شهری با فیلتر منجر به 99.66 GFC درصد،  $\Delta E_{ab}^*$  6.18 RMSE و 0.08 برابر با 0.08 بود. برای مجموعه ازمایشی 2، بازیابی تابش‌ها برای صحنه‌های با ماتریس بازیابی شهری بهتر از صحنه‌های روستایی با ماتریس بازیابی روستایی بود (برای مثال، بازیابی شهری با فیلتر G یک میانگین 99.37 GFC درصد، 6.82 RMSE و 0.15 نشان داد، در حالی که بازیابی روستایی با فیلتر یکسان دارای 96.67 GFC درصد، 8.22 RMSE و 0.21 برابر با 0.21 بود). آزمون‌های رتبه‌ای ویلکوگسون نشان داد که بازیابی تابش‌ها برای صحنه‌های روستایی با ماتریس بازیابی روستایی به طور معنی داری با ماتریس بازیابی صحنه‌های تمایز نیافته بهتر بود.



شکل 5: بازیابی بازتاب های طیفی برای دو عضو الف و ب از مجموعه ازمایشی 1 و برای دو عضو پ و ت از مجموعه ازمایشی 2 با الف و پ دارای GFC در صدک بالایی و ت و ت در صدک پنجم پایینی. مقادیر GFC برای فیلتر رنگی B به ترتیب 99.93%, (b) 98.41%, (c) 99.93%, and (d) 93.80% است.

جدول 2: کیفیت بازیابی بازتاب های طیفی از صحنه های طبیعی

		فلتر های رنگی								
		مجموعه ازمایشی شاخص								
		None	MG 1	MG 2	B	G	0	G + O	G + O + MG2	
GFC (%)	1	99.07 (1.65)	99.45 (1.09)	99.49 (1.07)	99.63 (0.70)	99.35 (1.17)	99.59 (0.69)	99.75 (0.42)	99.90 (0.10)	
	2	96.45 (8.18)	98.00 (4.62)	98.13 (4.28)	98.63 (2.96)	97.64 (5.44)	98.39 (3.17)	98.99 (2.58)	99.31 (1.79)	
	3	96.26 (6.30)	97.18 (3.87)	97.30 (3.75)	98.02 (3.32)	96.86 (4.21)	97.64 (3.40)	98.68 (2.40)	98.96 (1.97)	
RMSE (%)	1	7.24 (5.27)	5.49 (4.15)	5.20 (4.12)	4.51 (3.45)	6.03 (4.27)	4.88 (3.28)	3.75 (2.77)	2.47 (1.32)	
	2	5.54 (6.11)	3.59 (3.65)	3.47 (3.57)	3.17 (3.34)	3.96 (3.96)	3.41 (3.38)	2.68 (2.88)	2.02 (2.04)	
	3	2.23 (1.40)	2.25 (1.25)	2.18 (1.23)	1.63 (1.13)	2.46 (1.35)	1.99 (1.13)	1.40 (0.92)	1.25 (0.80)	
$\Delta E_{ab}$	1	1.03 (0.66)	0.53 (0.42)	0.54 (0.45)	0.50 (0.27)	0.43 (0.39)	0.57 (0.44)	0.24 (0.16)	0.18 (0.14)	
	2	1.15 (0.94)	0.68 (0.84)	0.73 (0.82)	0.61 (0.55)	0.53 (0.79)	0.73 (0.85)	0.25 (0.33)	0.22 (0.32)	
	3	1.84 (1.25)	1.07 (0.74)	1.18 (0.82)	0.60 (0.55)	0.84 (0.63)	1.26 (0.96)	0.31 (0.33)	0.27 (0.31)	

وقتی که ماتریس های بازیابی شهر یو روستایی به یک مجموعه از تابیش ها از مجموعه ازمایشی 3 اعمال شد، بازیابی با ماتریس بازیابی روستایی بهتر بود (برای مثال بازیابی روستایی با فیلتر G منجر به 98.70 GFC درصد، 5.97 RMSE و  $\Delta E_{ab}^*$  0.12 بود، در حالی که بازیابی شهری با فیلتر یکسان منحر به میانکین 97.44، 9.72 RMSE و  $\Delta E_{ab}^*$  0.41 بود). این منطقی بود زیرا سه صحنه نمای نزدیک به صورت روستایی تعریف شد. به علاوه، نتایج با ماتریس بازیابی به مجموعه ازمایشی 3 بدتر از ماتریس بازیابی روستایی بود ولی در ماتریس بازیابی بهتر بود (ازمون رتبه ای ویلکوکسون  $P < 0.001$ )

در رابطه با بهترین ترکیب فیلتر، تفاوت های مشابهی برای صحنه های روستایی و شهری با یک فیلتر وجود داشت ولی روند مشابه با ترکیب دو و سه فیلتر دیده شد. نتایج مشابه برای بازیابی بازتاب ها بدست امد

### عملکرد **Macbeth ColorChecker**

برای مقایسه، روش نگاشت مستقیم نیز به مجموعه استانداردی از بازتاب ها یعنی نمودار Macbeth (گرتگ مک بث) استفاده شد که به فراوانی در بازیابی طیفی و شناسایی دوربین استفاده می شود. پنج مجموعه متفاوت از 20 بازتاب از مجموعه ازمایشی 1 به طور تصادفی انتخاب شده و عملکرد ماتریس بازیابی برای ین مجموعه با مجموعه بازتاب های کالر چکر مقایسه شد. در صورتی که مجموعه ColorChecker معرف بازتاب های طبیعی باشد، تفاوت اندگی در عملکرد با دو ماتریس بود.

جدول 3 انحراف معیار و میانگین شاخص های کیفیت را برای دو ماتریس بازیابی با چهار ترکیب فیلتر متفاوت نشان می دهد. ماتریس بازیابی بازتاب طبیعی عملکرد بهتری از ماتریس بازیابی داشت. و تفوت ها از نظر آماری بر طبق ازمون رتبه ای ویلکوگوسن متغیر بود.

یک مقایسه اضافی با 558 بازتاب تصادفی از مجموعه ازمایشی 2 انجام شد. الگوی عملکرد برای همه ترکیبات فیلتر حفظ شد (برای مثال با فیلتر B، ماتریس بازیابی ColorChecker منجر به مقدار میانکین 9640 GFC شد و یک مقدار میانکین 4.82 RMSE و مقدار  $\Delta E_{ab}^*$  از 2.07 بدست امد و از این روی ماتریس بازیابی بازتاب طبیعی منجر به GFC با 98.69 درصد شد و RMSE میانگین 3.15 و مقدار  $\Delta E_{ab}^*$  برابر با 1.02 بود. این تفاوت ها بین بازیابی دو مجموعه طیف های آموزشیناشی از این باشد که نمودار مک بث کالر چکر، دارای بازتاب های طیفی کم تری در منطقه با طیف های طبیعی بود.

جدول 3: کیفیت بازیابی بازتاب های طیفی با ماتریس های بازیابی بر اساس طیف های طبیعی و طیف های نمودار مک بث کالر چکر

ماتریس بازیابی	شاخص	فیلتر رنگی			
		None	B	B+O	B+G+MG1
بازتاب طبیعی	GFC (%)	99.22 (6.62)	99.74 (0.33)	99.86 (0.18)	99.91 (0.13)
	RMSE (%)	6.10 (4.79)	4.45 (3.80)	2.79 (1.68)	2.13 (1.23)
	$\Delta E_{ab}$	1.47 (0.90)	0.75 (0.69)	0.24 (0.19)	0.09 (0.07)
	Macbeth ColorChecker	GFC (%)	98.74 (1.90)	98.88 (1.55)	99.16 (6.16)
	RMSE (%)	7.96 (5.27)	7.21 (5.44)	6.16 (5.24)	5.24 (3.90)
	$\Delta E_{ab}$	1.61 (0.92)	1.46 (0.96)	0.62 (0.76)	0.20 (0.17)

نتیجه گیری :

صحنه های طبیعی با تغییرات پیچیده در ساختار مکانی و روشنایی کنترل نشده منجر به ایجاد مشکلات خاصی برای طیف های بازتاب و انعکاس می کنند. با این حال این مطالعه نشان داده است که یک ترکیب از روش نگاشت مستقیم و دوربین دیجیتال RGB سنتی با تعداد محدودی از فیلتر های رنگی می توانند براورد های دقیق و قابل قبول را در مورد طیف های نوری در صحنه های طبیعی ارایه کنند از ترکیبات متفاوت فیلتر های رنگی، بهترین عملکرد با سه فیلتر بدست آمد. از حیث سه شاخص، سیگنال بازیابی شده دارای ضریب خوبی برازش بهتری از 99 درصد بود که یک خطای میانگین مربعات کم تر از 5 درصد و تفاضل رنگی CIELAB کم تر از 0.27 بود.

استفاده از یک دوربین دیجیتال RGB سنتی در ترکیب با تعداد محدودی از فیلتر های رنگی، منجر به یک رویکرد اقتصادی تر و مقتضد از نظر زمانی برای پوشش چند طیفی صحنه های مصنوعی و طبیعی نسبت به روش های سنتی می شود و روش نگاشت مستقیم، یک عملکرد قابل قبول را بدون تیاز به بهینه سازی پیچیده و پر هزینه برای کاهش خطأ در اختیار می گذارد. این رویکرد امکان نمونه برداری از طیف وسیعی از طیف ها در ساخت ماتریس بازیابی با مجموعه های بازتاب محدود تر نظیر نمودار مک بث می دهد. در عین حال گروه بندی داده ها نیز می تواند مفید باشد. اگرچه بازیابی خوب با مجموعه های اموزشی تمایز نیافته از صحنه های طبیعی و شهری وجود دارد، بازیابی برای صحنه های روستایی با صحنه فقط روستایی به عنوان مجموعه اموزشی و برای صحنه

های شهری تنها با صحنه های شهری به عنوان مجموعه اموزشی، بهتر بود. این مطالعه بیشتر یک تحقیق و حاسباتی بوده و پاسخ ها برای یک دوربین دیجیتال RGB خاص و مجموعه ای از فیلتر های رنگی محاسبه شد با این حال کاربرد آن به سایر دوربین ها و فیلتر ها پس از عملیات پیش پردازش نظیر حذف نویز و تصحیح ناهمنگی و ویژگی غیر خطی پاسخ، ساده است.