

# فیلتر رنگی کاهش‌ی بازتابنده مقاوم در مقابل تغییرات زاویه تابش با استفاده از فراسطح دی‌اکسید تیتانیوم و آینه‌های آلومینیومی

زهرا ناصحی و نجمه نزهت

[۳] تا [۶].

فیلترهای رنگی نوری به طور کلی به دو دسته افزایشی<sup>۴</sup> و کاهشی<sup>۵</sup> تقسیم می‌شوند. فیلترهای رنگی افزایشی بر اساس سه رنگ اصلی قرمز، سبز و آبی که چرخه مشهور RGB را می‌سازند، ساخته می‌شوند و با تغییر شدت نورهای قرمز، سبز و آبی، طیفی از رنگ‌های متنوع حاصل می‌شود. این سه رنگ موسوم به "دیجیتال" هستند و در صفحه‌های نمایش و حسگرهای دوربین به کار می‌روند [۷] تا [۹]. در فیلترهای رنگی کاهش‌ی، رنگ‌های زرد، ارغوانی و فیروزه‌ای به ترتیب با حذف رنگ‌های آبی، سبز و قرمز تشکیل می‌شوند [۱۰].

در سال‌های اخیر، فیلترهای رنگی زیر طول موج، به علت توسعه الگوریتم‌های شبیه‌سازی عددی و روش‌های ساخت نانو/ میکرو بسیار مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. این ساختارهای نانوفوتونیک مهندسی‌شده، از طریق تغییر پارامترهای طراحی برای تغییر خواص طیفی انتقال، بازتاب و جذب در طیف مرئی به کار گرفته می‌شوند. چن<sup>۶</sup> و همکارانش یک فیلتر رنگی زیر طول موج را که حاوی آرایه‌ای از حفره‌هایی با شبکه مثلثی در یک فیلم آلومینیومی بود، برای ایجاد تشدید پلاسمون سطحی ارائه کردند و متوجه شدند که تناوب کمی برای نشان دادن ویژگی‌های فیلترینگ کافی است [۱۱]. سی<sup>۷</sup> و همکارانش یک فیلتر رنگی جدید با آرایه‌ای از نانوحلقه‌های کواکسیال بر اساس مد پلاسمون محلی فابری- پرو طراحی کردند و انتقال نور فوق‌العاده‌ای از این حفره‌های زیر طول موج مشاهده کردند [۱۲]. فیلتر رنگی نوری حاوی فیلم‌های نازک با استفاده از تداخل چندلایه، با قله انتقال بالا، پهنای باند مناسب و مشخصات پایدار به خوبی عمل می‌کند [۱۳] تا [۱۵]. همچنین فیلتر رنگی بر اساس تشدید مد هدایت‌شده<sup>۸</sup> دارای بازتابی با پهنای باند بسیار باریک و بازده<sup>۹</sup> بالاست، اما معمولاً عملکرد نوری این گونه فیلترها نسبت به زاویه تابش حساس است و تحمل زاویه‌ای ضعیفی دارند که این وابستگی به زاویه تابش می‌تواند با روش‌های مختلفی کاهش یابد [۱۶] تا [۱۸].

فیلترهای پلاسمونیک به تازگی به عنوان نقطه عطف تحقیقاتی فیلترهای نوری مطرح شده‌اند و به دلیل خواص منحصر به فرد و فوق‌العاده نوری، کاربردهای گسترده‌ای در زمینه نمایشگرها، آشکارسازی، چاپ و غیره دارند. اما تقریباً تمام فیلترهای پلاسمونیک که قبلاً ارائه

چکیده: اخیراً فیلترهای رنگی برای تصویربرداری و پرینت رنگی با کیفیت و وضوح بالا، در مقیاس زیر طول موج به کار می‌روند. در این مقاله، یک فیلتر رنگی کاهش‌ی بازتابنده با کنتراست رنگی عالی نشان داده شده است. در فیلتر پیشنهادی، نانومکعب‌های دی‌اکسید تیتانیوم با آینه‌های آلومینیومی در بالا و پایین نانومکعب‌ها مجتمع شده است. به دلیل ایجاد دوقطبی مغناطیسی در نانومکعب‌های دی‌اکسید تیتانیوم، یک تشدید در طیف مرئی اتفاق می‌افتد که با تغییر اندازه ضلع نانومکعب‌ها، طول موج تشدید در تمام طیف مرئی تنظیم می‌شود. پیچ‌های آلومینیومی در دو طرف نانومکعب‌ها، باعث دستیابی به بازده بیش از ۷۰٪ و پهنای باند کمتر از ۳۵ نانومتر می‌شوند. فیلتر پیشنهادی نسبت به زاویه تابش خیلی حساس نیست، به طوری که با افزایش زاویه تابش از ۰ تا ۶۰ درجه، طول موج تشدید تغییر بسیار ناچیزی دارد و پهنای باند و بازده یکسانی را حفظ می‌کند. به علاوه، به دلیل هندسه متقارن، فیلتر پیشنهادی به قطبش موج ورودی نیز وابسته نیست. این مزیت‌ها عملکرد فیلتر پیشنهادی را در تصویربرداری و نمایشگرهای با روشنایی و وضوح بالا تسهیل می‌سازد.

کلیدواژه: فیلتر رنگی کاهش‌ی، دوقطبی مغناطیسی، غیر وابسته به قطبش، غیر حساس به زاویه تابش.

## ۱- مقدمه

فیلتر رنگی<sup>۱</sup> به عنوان یک عنصر نوری رایج برای نمایش رنگ‌های مختلف، طول موج خاصی را در طیف مرئی انتقال و یا بازتاب می‌دهد. این گونه فیلترها با توجه به روش فیلترینگ به دو دسته فیلترهای رنگی شیمیایی و نوری تقسیم می‌شوند [۱] و [۲]. فیلترهای رنگی شیمیایی که شامل رنگ یا رنگ‌دانه هستند، فیلترینگ رنگ را از طریق جذب انتخابی طول موج از رنگ‌دانه‌ها امکان‌پذیر می‌سازند. فیلترهای رنگی نوری به عنوان یک عنصر حیاتی برای کاربردهایی مانند دستگاه‌های صفحه نمایش/ تصویربرداری، دیودهای نورگسیل آلی<sup>۲</sup>، سلول‌های خورشیدی آلی<sup>۳</sup> و غیره مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این فیلترها یک جایگزین مناسب برای فیلترهای رنگی شیمیایی هستند که به دلیل حساسیت شدید آنها نسبت به دما و نور فرابنفش در طول زمان مستلزم تخریب جدی هستند

این مقاله در تاریخ ۱۳ مهر ماه ۱۳۹۸ دریافت و در تاریخ ۲۱ تیر ماه ۱۳۹۹ بازنگری شد.

زهرا ناصحی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران، (email: z.nasehi@sutech.ac.ir)

نجمه نزهت (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران، (email: nozhat@sutech.ac.ir)

4. Additive

5. Subtractive

6. Chen

7. Si

8. Guided-Mode Resonance

9. Efficiency

1. Color Filter

2. Organic Light Emitting Diodes

3. Organic Solar Cells

همکاری هم نقش مؤثری در افزایش میزان حبس دوقطبی مغناطیسی در نانومکعب‌ها دارند و در نتیجه آن کنتراست و بازده تشدید افزایش می‌یابد. فیلتر رنگی پیشنهادی را می‌توان حتی در صورت عدم وجود آینه‌های نانوساختار فلزی هم طراحی کرد که این موضوع با در نظر گرفتن نقش دو دیسکی که به صورت آینه عمل می‌کنند، از طریق نمایش توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و رسم منحنی بازتاب در حضور آینه‌های آلومینیومی و بدون حضور آنها به طور دقیق بررسی می‌شود. به علاوه این فیلتر می‌تواند رنگ بازتابی مشابهی را برای بازه وسیعی از زاویه‌های تابش ارائه دهد و به دلیل هندسه متقارن ساختار، فیلتر پیشنهادی به قطبش موج ورودی نیز وابسته نیست.

## ۲- ساختار پیشنهادی فیلتر رنگی کاهشی و نتایج شبیه‌سازی

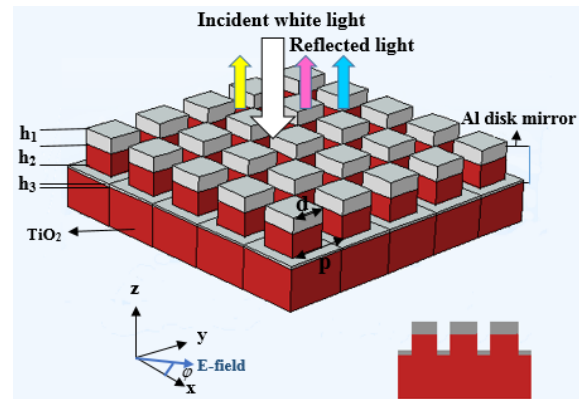
شکل ۱ الگوی فیلتر رنگی پیشنهادی را نشان می‌دهد. این فیلتر حاوی آرایه‌ای از نانومکعب‌های  $\text{TiO}_2$  است که بر روی زیرلایه‌ای از جنس  $\text{TiO}_2$  قرار دارند. در بالای نانومکعب‌ها پچ‌های آلومینیومی قرار دارد. همچنین روی زیرلایه و در فضای بین نانومکعب‌ها از یک لایه آلومینیوم پوشانده شده است.

ارتفاع پچ بالا، نانومکعب  $\text{TiO}_2$  و پچ پایین به ترتیب با  $h_1$ ،  $h_2$  و  $h_3$ ، اندازه ضلع مکعب‌ها با  $d$  و تناوب ساختار با  $p$  مشخص شده است. در طیف مرئی، هر قله یا dip به عنوان یک رنگ واحد ظاهر می‌شود و اگر هم‌زمان دو یا چند قله ایجاد شود، ترکیب رنگ‌های متناظر با قله‌های ایجادشده، رنگ دیگری را تولید می‌کند. رابطه بین پارامترهای هندسی و طول موج تشدید پلاسمون سطحی در یک آرایه مربعی با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود [۲۸]

$$\lambda_r = \frac{p}{\sqrt{i^2 + j^2}} \operatorname{Re} \left( \sqrt{\frac{\varepsilon_m(\lambda) \varepsilon_d(\lambda)}{\varepsilon_m(\lambda) + \varepsilon_d(\lambda)}} \right) \quad (1)$$

که  $p$  تناوب شبکه و  $\varepsilon_m(\lambda)$  و  $\varepsilon_d(\lambda)$  به ترتیب ثابت دی‌الکتریک عایق و فلز هستند.  $i$  و  $j$  اعداد صحیحی از مرتبه پراکندگی آرایه‌ها هستند که طول موج تشدید مرتبه اول ( $\lambda_1$ ) با مد  $(\pm 1, 0)$  و طول موج تشدید مرتبه دوم ( $\lambda_2$ ) با مد  $(\pm 1, \pm 1)$  تعیین می‌شود. با افزایش تناوب شبکه از ۲۰۰ تا ۴۰۰ نانومتر، تشدید پلاسمون سطحی مرتبه اول برای فصل مشترک آلومینیوم- هوا و آلومینیوم- دی‌اکسید تیتانیوم به ترتیب متعلق به ناحیه فرابنفش و مادون قرمز است. با توجه به این که تشدید در طیف مرئی در فیلتر پیشنهادی به طور غالب به تشدید دوقطبی مغناطیسی ناشی از پدیده پراکندگی می‌نسبت داده می‌شود، تناوب شبکه ۲۴۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. همچنین برای انتخاب ارتفاع مناسب آینه‌های آلومینیومی، ابتدا با بررسی طیف بازتاب فیلتر در  $d$  ثابت و با افزایش ارتفاع پچ آلومینیومی بالایی از ۱۰ تا ۶۰ نانومتر تغییر چندانی در مکان و بازده تشدید مشاهده نشد. سپس با بررسی طیف بازتاب در  $d$  ثابت و با افزایش پچ آلومینیومی پایین از ۱۰ تا ۳۰ نانومتر، مشاهده شد که بیشترین تزویج بین تشدید پلاسمون سطحی محلی در آینه‌های آلومینیومی در  $h_1 = 10 \text{ nm}$  و  $h_2 = 60 \text{ nm}$  رخ می‌دهد.

طبق توضیحات بالا، در شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی،  $h_1 = 60 \text{ nm}$ ،  $h_2 = 180 \text{ nm}$ ،  $h_3 = 10 \text{ nm}$  و  $p = 240 \text{ nm}$  در نظر گرفته شده است، به طوری که به واسطه رخ‌دادن پدیده پراکندگی می‌در نانومکعب‌ها، نور تابشی تشدیدشده به ساختار تزویج شود و اطمینان حاصل شود که تنها یک تشدید در طیف مرئی رخ می‌دهد. در شکل ۲- الف طیف بازتاب فیلتر



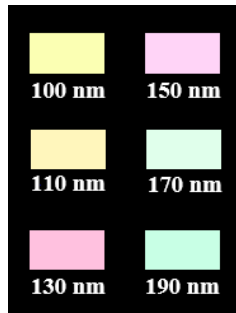
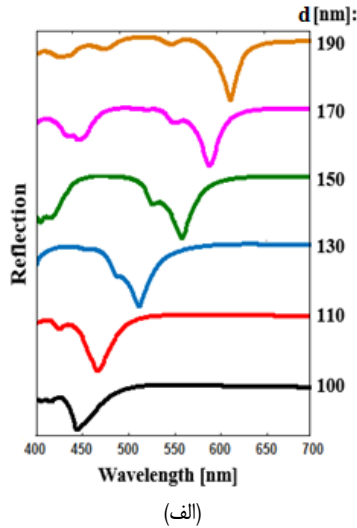
شکل ۱: شماتیک فیلتر رنگی کاهشی پیشنهادی. در پایین شکل، نمای جانبی فیلتر نشان داده شده است.

شده‌اند، بسیار به زاویه تابش حساس هستند [۱۹] تا [۲۱]. وو<sup>۱</sup> و همکارانش یک طرح جدید برای فیلتر رنگی پلاسمونیک با شبکه‌ای یک‌بعدی را که تا حدودی به زاویه تابش غیر حساس بود پیشنهاد دادند، اما در این فیلتر، به دلیل یک‌بعدی بودن ساختار، فقط قطبش TM در نظر گرفته شده است [۲۲]. برای کاربردهایی مانند تصویربرداری و پرینت رنگی که تحت زاویه تابش مایل هستند، فیلتر رنگی نیازمند حفظ رنگ دریافتی برای بازه گسترده‌ای از زاویه‌های تابش است. بنابراین تحقق فیلترهای رنگی غیر حساس به زاویه تابش، ضروری است.

قبل از طراحی، تعیین مواد ساختار برای دستیابی به پاسخی بهتر ضروری است. فلزات رایجی که برای ساخت فیلترهای رنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند، طلا، نقره و آلومینیوم هستند و مواد دی‌الکتریک رایج مورد استفاده، سیلیکون، گالیم آرسناید، سیلیکا، پلیمر و دی‌اکسید تیتانیوم هستند. طلا و نقره گران‌تر از فلزات دیگرند و علاوه بر این، در طول موج‌های کمتر از ۵۰۰ نانومتر، تلفات بالایی دارد و نقره به راحتی اکسید می‌شود [۲۳]. آلومینیوم ارزان‌تر از سایر فلزات است و به دلیل تلفات کم، می‌تواند رنگ‌های واضح‌تری را ارائه دهد. سیلیکون و گالیم آرسناید تلفات بالاتر و سیلیکا و پلیمر ضریب شکست پایین‌تری نسبت به مواد دی‌الکتریک دیگر دارند و با فناوری CMOS ناسازگارند. دی‌اکسید تیتانیوم دارای ضریب شکست نسبتاً بالا و تلفات کم است [۲۴] و [۲۵]. بنابراین آلومینیوم و دی‌اکسید تیتانیوم انتخاب مناسبی برای طراحی و ساخت فیلتر رنگی در طیف مرئی محسوب می‌شوند.

در این مقاله، یک فیلتر رنگی کاهشی بازتابنده، با بازده و کنتراست رنگی عالی پیشنهاد داده شده است. کنتراست رنگ معیاری برای تشخیص شفافیت و وضوح تصویر است و هرچه کنتراست بیشتر باشد، صفحه نمایش توانایی ایجاد تصاویر واضح‌تری را دارد [۲۶]. این فیلتر از آرایه‌ای دوبعدی از نانومکعب‌های دی‌اکسید تیتانیوم ( $\text{TiO}_2$ ) همراه با دو پچ آلومینیومی در پایین و بالای نانومکعب‌ها تشکیل شده است.  $\text{TiO}_2$  باعث برانگیختگی دوقطبی مغناطیسی (MD)<sup>۳</sup> می‌شود که این موضوع با تئوری پراکندگی می<sup>۴</sup> اثبات می‌شود [۲۷]. مد مربوط به تشدید دوقطبی مغناطیسی می‌تواند به طور مؤثری به زیرلایه تزویج شود و باعث بازتاب نزدیک به صفر شود. طول موج تشدید با تغییر اندازه ضلع نانومکعب‌ها در تمام طول ناحیه مرئی تنظیم می‌شود. همچنین دو پچ آلومینیومی با

1. Wu
2. Complementary Metal Oxide Semiconductor
3. Magnetic Dipole
4. Mie Scattering



(ب)

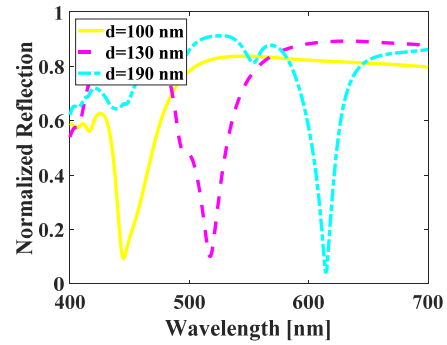
شکل ۳: (الف) طیف بازتاب فیلتر با افزایش اندازه ضلع نانومکعبها از  $d = 100 \text{ nm}$  تا  $d = 190 \text{ nm}$  در تناوب ثابت  $p = 240 \text{ nm}$  و (ب) پالتی از رنگهای طیف بازتاب در دیاگرام کروماتیسیته.

در طیف بازتاب، رنگهای کاهشی مطلوب زرد، ارغوانی و فیروزه‌ای به ترتیب در طول موجهای  $\lambda = 445 \text{ nm}$ ،  $\lambda = 517 \text{ nm}$  و  $\lambda = 614 \text{ nm}$  ایجاد شده است. طیف بازتاب، بازده بیش از ۷۰٪ و پهنای باند کمتر از ۳۵ نانومتر دارد (بازده تشدید به صورت نسبت دامنه انتقال یا بازتاب موج خروجی به دامنه موج تابشی ورودی در طول موج تشدید تعریف می‌شود). در شکل ۲-ب با توجه به تغییرات مختصات رنگی به عنوان یک تابع از اندازه  $d$ ، همان طور که با فلش سیاه مشخص شده است، متوجه می‌شویم رنگ ظاهرشده از هر کدام از فیلترها می‌تواند با تغییر  $d$  تنظیم شود، به طوری که رنگ به دست آمده از زرد به ارغوانی و از رنگ ارغوانی به فیروزه‌ای تغییر کند. از این رو، فیلتر پیشنهادی قادر به ایجاد رنگهای واضح با کنتراست بالا در طیف مرئی است.

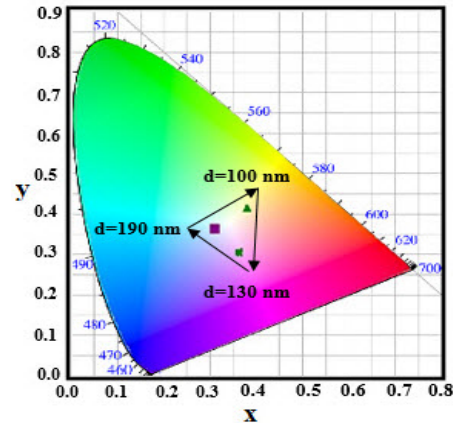
برای ارزیابی بهتر اثر اندازه  $d$  بر روی پاسخ ساختار، در شکل ۳-الف طیف بازتاب فیلتر با افزایش اندازه ضلع نانومکعبها از  $d = 100 \text{ nm}$  تا  $d = 190 \text{ nm}$  در تناوب ثابت  $p = 240 \text{ nm}$  رسم شده است. همچنین در شکل ۳-ب پالتی از رنگهای طیف بازتاب شکل ۳-الف به وسیله مختصات رنگها در دیاگرام کروماتیسیته نشان داده شده است.

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، یک مجموعه رنگهای کاهشی با افزایش اندازه ضلع نانومکعبهای  $\text{TiO}_2$  از  $d = 110 \text{ nm}$  تا  $d = 190 \text{ nm}$  که سبب افزایش طول موج تشدید طیف بازتاب از ۴۴۵ تا ۶۱۴ نانومتر می‌شود، به دست می‌آید. از این رو فیلتر پیشنهادی قادر به ایجاد رنگهای واضح در محدوده رنگی وسیعی است.

در شکل ۴ طیف بازتاب فیلتر ارغوانی برای قطبش TE با افزایش زاویه تابش  $(\theta)$  از ۰ تا ۶۰ درجه با گامهای ۱۰ درجه، نشان داده شده است. با افزایش زاویه تابش از ۰ تا ۶۰ درجه، شکل طیف بازتاب از نظر

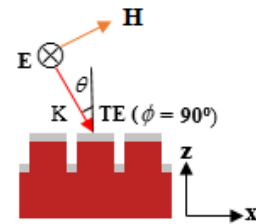


(الف)

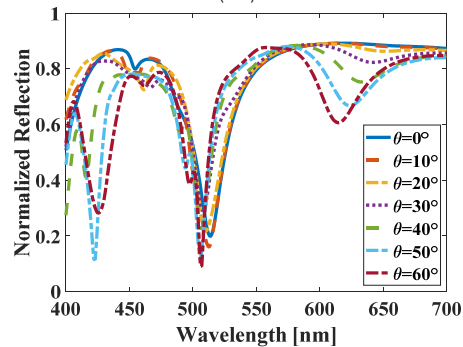


(ب)

شکل ۴: (الف) طیف بازتاب فیلتر در سه رنگ زرد، ارغوانی و فیروزه‌ای به ازای مقادیر  $d = 100 \text{ nm}$ ،  $d = 130 \text{ nm}$  و  $d = 190 \text{ nm}$  و (ب) نمایش مختصات رنگهای متناظر با طیفهای بازتاب رسم شده در دیاگرام کروماتیسیته.



(الف)

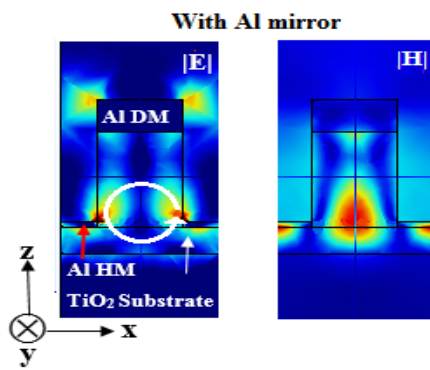


(ب)

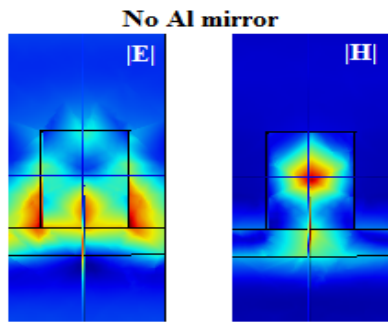
شکل ۴: (الف) نمای جانبی ساختار و نحوه تابش مایل به آن و (ب) طیف بازتاب فیلتر ارغوانی با افزایش زاویه تابش  $(\theta)$  از ۰ تا ۶۰ درجه.

پیشنهادی در سه رنگ زرد، ارغوانی و فیروزه‌ای برای سه مقدار مختلف  $d$  رسم شده است. برای درک بهتر رنگهای دریافتی در طیف بازتاب شکل ۲-الف، مختصات متناظر با این طیفها در دیاگرام استاندارد کروماتیسیته<sup>۱</sup> در شکل ۲-ب مشخص شده است.

1. CIE (International Commission on Illumination) 1931 Chromaticity Diagram



(الف)



(ب)

شکل ۶: توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، (الف) با و (ب) بدون آینه‌های آلومینیومی در طول موج تشدید رنگ ارغوانی ( $\lambda = 517 \text{ nm}$ ).

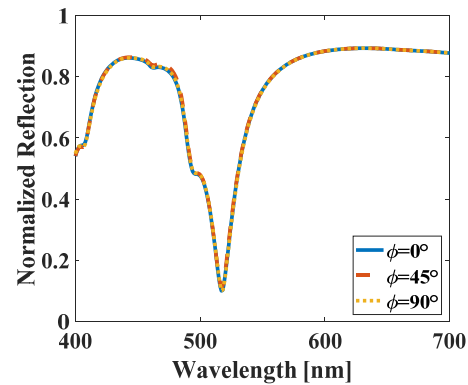
نقش آینه‌های آلومینیومی در عملکرد ساختار، توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی فیلتر بدون آینه‌های آلومینیومی، در شکل ۶-ب رسم شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که حتی در صورت عدم وجود آینه‌های نانو ساختار فلزی، حلقه جریان جابه‌جایی الکتریکی و مد تشدید دوقطبی مغناطیسی در نانومکعب  $\text{TiO}_2$  وجود دارد. بنابراین نتیجه می‌شود که میدان الکتریکی تقویت شده اطراف دیسک آلومینیومی، به جای تشدید پلاسمون سطحی به تشدید دوقطبی مغناطیسی ناشی از پراکندگی می‌در نانومکعب‌ها مربوط است و تشدید پلاسمون سطحی نقش قابل توجهی در پاسخ این فیلتر ندارد.

با مقایسه توزیع میدان‌های الکترومغناطیسی در شکل‌های ۶-الف و ۶-ب مشاهده می‌شود که در شکل ۶-الف به دلیل وجود دو دیسک آلومینیومی در دو طرف نانومکعب‌های  $\text{TiO}_2$  میدان به صورت قوی‌تری نسبت به شکل ۶-ب محبوس شده است که به دنبال آن افزایش بازده و کنتراست را سبب می‌شود.

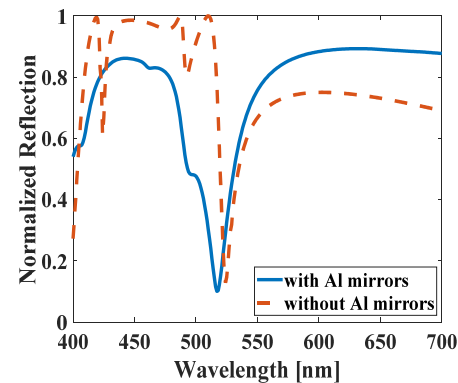
برای درک بهتر این موضوع طیف بازتاب فیلتر ارغوانی با و بدون حضور آینه‌های آلومینیومی در شکل ۷ رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود در هر دو حالت، یک تشدید در طیف بازتاب رخ داده است، با این تفاوت که تشدید در حضور آینه‌های آلومینیومی دارای منحنی صاف‌تر با بازده و کنتراست بالاتری است.

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک فیلتر رنگی کاهشی غیر حساس به قطبش موج تابشی و زاویه تابش، با بازده بیش از ۷۰٪ و پهنای باند کمتر از ۳۵ نانومتر معرفی شد. بنابراین در فیلتر پیشنهادی، رنگ‌های بازتابی با کنتراست عالی ایجاد می‌شود و غیر حساس بودن پاسخ فیلتر نسبت به زاویه تابش باعث می‌شود که منحنی بازتاب در زاویه‌های مختلف، تفاوت رنگ بسیار کمی داشته باشد. این ویژگی فیلتر برای کاربردهایی مانند



شکل ۵: طیف بازتاب برای فیلتر ارغوانی در سه زاویه قطبش.



شکل ۷: طیف بازتاب فیلتر در دو حالت با و بدون حضور آینه‌های آلومینیومی.

پهنای باند و طول موج تشدید، تغییر بسیار ناچیزی دارد. بنابراین این فیلتر می‌تواند تا زاویه ۶۰ درجه، ظاهر رنگ یکسانی داشته باشد که در مقایسه با فیلتر مبتنی بر ساختار فلز-دی‌الکتریک-فلز که قبلاً گزارش شده است [۲۹]، حساسیت زاویه‌ای بسیار بهتر با پهنای باند پایدارتری دارد.

در شکل ۵ طیف بازتاب فیلتر ارغوانی در تابش نرمال ( $\theta = 0$ ) به ازای سه زاویه قطبش  $\phi = 0^\circ$ ،  $\phi = 45^\circ$  و  $\phi = 90^\circ$  بررسی شده است. طیف بازتاب در این سه زاویه قطبش بر هم منطبق شده است، بنابراین این فیلتر به دلیل هندسه متقارن نسبت به قطبش موج ورودی وابسته نیست. عدم وابستگی فیلتر پیشنهادی به قطبش و زاویه تابش باعث می‌شود که بتوان از این فیلتر برای کاربردهایی همچون تصویربرداری، نمایشگرها و چاپگرهای رنگی استفاده کرد.

### ۳- بررسی نقش آینه‌های آلومینیومی بر روی عملکرد فیلتر و طول موج تشدید آن

برای توضیح عملکرد فیلتر در طول موج تشدید، در شکل ۶ توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در طول موج تشدید رنگ ارغوانی ( $\lambda = 517 \text{ nm}$ ) رسم شده است. در آرایه‌ای از نانومکعب‌ها، هر کدام از نانومکعب‌ها به عنوان یک تشدیدگر عمل می‌کنند و تحریک دوقطبی مغناطیسی را در ناحیه طول موج مرئی باعث می‌شوند. تشدید دوقطبی مغناطیسی با تغییر قطر نانومکعب‌ها تنظیم می‌شود. با اتصال آرایه‌ای از نانومکعب‌ها به زیرلایه‌ای از همان جنس، نور ذخیره شده در مدی که در تشدیدگر محبوس شده، به زیرلایه تزویج می‌شود و سبب ایجاد dip در طول موج خاصی در طیف بازتاب می‌شود.

همان طور که مشاهده می‌شود یک تشدید دوقطبی مغناطیسی قوی در طول موج مؤثر  $\text{TiO}_2$  با حلقه جریان جابه‌جایی مشخص شده و هم‌زمان میدان مغناطیسی در جهت بیرون صفحه متمرکز شده است. برای بررسی

- [15] C. S. Park, V. R. Shrestha, S. S. Lee, E. S. Kim, and D. Y. Choi, "Omnidirectional color filters capitalizing on a nano-resonator of Ag-TiO<sub>2</sub>-Ag integrated with a phase compensating dielectric overlay," *Sci. Rep.*, vol. 5, Article no. 8467, 8 pp., 16 Feb. 2015.
- [16] Z. Ren, Y. Sun, Z. Lin, C. Wang, W. Huang, and X. Zhi, "Tunable guided-mode resonance filters for multi-primary colors based on polarization rotatin," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 30, no. 21, pp. 1858-1861, 17 Sept. 2018.
- [17] Y. Ye, R. Shao, Y. Zhou, and L. Chen, "Wide-angle transmissive filter based on a guided-mode resonant grating," *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 24, pp. 5785-5790, 20 Aug. 2012.
- [18] M. J. Uddin, T. Khaleque, and R. Magnusson, "Guided-mode resonant polarization-controlled tunable color filters," *Opt. Express*, vol. 22, no. 10, pp. 12307-12315, 19 May 2014.
- [19] K. Kumar, H. Duan, R. S. Hegde, S. C. Koh, J. N. Wei, and J. K. Yang, "Printing colour at the optical diffraction limit," *Nature Nanotechnol.*, vol. 7, no. 1, pp. 557-561, Sept. 2012.
- [20] T. Xu, Y. K. Wu, X. Luo, and L. J. Guo, "Plasmonic nanoresonators for high-resolution colour filtering and spectral imaging," *Nature Commun.*, vol. 1, Article no. 59, 5 pp., 24 Aug. 2010.
- [21] Y. T. Yoon, C. H. Park, S. S. Lee, Y. T. Yoon, C. H. Park, and S. S. Lee, "Highly efficient color filter incorporating a thin metal-dielectric resonant structure," *Appl. Phys. Express*, vol. 5, Article no. 022501, 4 pp., 8 Feb. 2012.
- [22] Y. R. Wu, A. Hollowell, C. Zhang, and L. J. Guo, "Angle-insensitive structural colours based on metallic nanocavities and coloured pixels beyond the diffraction limit," *Sci. Rep.*, vol. 3, Article no. 1194, 6 pp., 1 Feb. 2013.
- [23] G. V. Naik, V. M. Shalaev, and A. Boltasseva, "Alternative plasmonic materials: beyond gold and silver," *Adv. Mat.*, vol. 25, no. 24, pp. 3264-3294, 25 Jun. 2013.
- [24] D. Lin, P. Fan, E. Hasman, and M. L. Brongersma, "Dielectric gradient metasurface optical elements," *Science*, vol. 345, no. 6194, pp. 298-302, 18 Jul. 2014.
- [25] S. Person, M. Jain, Z. Lapin, J. J. Saenz, G. Wicks, and L. Novotny, "Demonstration of zero optical backscattering from single nanoparticles," *Nano Lett.*, vol. 13, no. 4, pp. 1806-1809, 5 Mar. 2013.
- [26] N. W. Daw, "Goldfish retina: organization for simultaneous color contrast," *Science*, vol. 158, no. no. 3803, pp. 942-944, 17 Nov. 1976.
- [27] S. Sun, Z. Zhou, C. Zhang, Y. Gao, Z. Duan, S. Xiao, and Q. Song, "All-dielectric full-color printing with TiO<sub>2</sub> metasurfaces," *ACS Nano*, vol. 11, no. 5, pp. 4445-4452, 19 Mar. 2017.
- [28] S. U. Lee and B. K. Ju, "Wide-gamut plasmonic color filters using a complementary design method," *Sci. Rep.*, vol. 7, Article no. 40649, 5 pp., 13 Jan. 2017.
- [29] C. Yang, W. Shen, Y. Zhang, H. Peng, X. Zhang, and X. Liu, "Design and simulation of omnidirectional reflective color filters based on metal-dielectric-metal structure," *Opt. Express*, vol. 22, no. 9, pp. 11384-11391, 5 May. 2014.

**زهرا ناصحی** در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی مهندسی برق، گرایش الکترونیک را از دانشگاه هرمزگان و در سال ۱۳۹۷ مدرک کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق، گرایش مخابرات میدان را از دانشگاه صنعتی شیراز دریافت نمود. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل مخابرات نوری، ادوات پلاسمونیک و کریستال فوتونی است.

**نجمه نزهت** مدرک کارشناسی در رشته مهندسی برق، گرایش مخابرات را در سال ۱۳۸۳ از دانشگاه شیراز دریافت کرد. ایشان مدارک کارشناسی ارشد و دکترای خود در رشته مهندسی برق، گرایش مخابرات میدان را به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۹۰ از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت نمود. وی همچنین دوره کوتاه‌مدت فرصت مطالعاتی را در دانشگاه سیدنی استرالیا گذراند. دکتر نجمه نزهت هم‌اکنون دانشیار و عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی شیراز هستند. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه نامبرده شامل نانواپتیک و نانوفوتونیک، ادوات پلاسمونیک، نور غیر خطی، کریستال فوتونی و فراماده است.

تصویبررداری و پرینت رنگی که نیازمند حفظ رنگ دریافتی در بازه گسترده‌ای از زاویه‌های تابش هستند، مفید است. در این فیلتر هر تشدیدگر TiO<sub>2</sub> باعث برانگیختگی دوقطبی مغناطیسی و ایجاد یک تشدید در طیف بازتاب ساختار در بازه طول موج مرئی می‌شود، به طوری که طول موج تشدید با تغییر اندازه ضلع نانومکعب‌های TiO<sub>2</sub> در تمام طول ناحیه مرئی تنظیم می‌شود. وجود پیچ‌های آلومینیومی، باعث حبس بیشتر و کارآمدتر دوقطبی مغناطیسی در نانومکعب‌های TiO<sub>2</sub> و افزایش بازده و کنتراست فیلتر می‌شود. این قابلیت‌ها باعث می‌شود که بتوان از این فیلتر در ادوات تصویبررداری و نمایشگرهای با کیفیت و وضوح بالا استفاده کرد.

## مراجع

- [1] P. Vukusic, J. R. Sambles, and C. R. Lawrence, "Structural colour: now you see it-now you don't," *Nature*, vol. 410, no. no.303, p. 36, 1 Mar. 2001.
- [2] M. A. Kats, R. Blanchard, P. Genevet, and F. Capasso, "Nanometre optical coatings based on strong on strong interference effects in highly absorbing media," *Nature Mat.*, vol. 12, no. 1, pp. 20-24, Jan. 2013.
- [3] T. Xu, H. Shi, Y. K. Wu, A. F. Kaplan, J. G. Ok, and L. J. Guo, "Structural colors: from plasmonic to carbon nanostructures," *Small*, vol. 7, no. 22, pp. 3128-3136, 18 Nov. 2011.
- [4] B. Zeng, Y. Gao, and F. J. Bartoli, "Ultra-thin nanostructured metals for highly transmissive plasmonic subtractive color filters," *Sci. Rep.*, vol. 3, Article no. 2840, 9 pp., 8 Oct. 2013.
- [5] Y. Qiu, L. Zhan, X. Hu, S. Luo, and Y. Xia, "Demonstration of color filters for OLED display based on extraordinary optical transmission through periodic hole array on metallic film," *Displays*, vol. 32, no. 5, pp. 308-312, Dec. 2011.
- [6] J. Y. Lee, K. T. Lee, S. Y. Seo, and L. J. Guo, "Decorative power generation panels creating angle insensitive transmissive colors," *Sci. Rep.*, vol. 4, Article no. 4192, 6 pp., 28 Feb. 2014.
- [7] J. S. Clausen, E. Hojlund-Nielsen, A. B. Christiansen, S. Yazdi, M. Grajower, H. Taha, U. Levy, A. Kristensen, and N. A. Mortensen, "Plasmonic metasurfaces for coloration of plastic consumer products," *Nano Lett.*, vol. 14, no. no. 8, pp. 4499-4504, 8 Jul. 2014.
- [8] V. R. Shrestha, C. S. Park, and S. S. Lee, "Enhancement of color saturation and color gamut enabled by a dual-band color filter exhibiting an adjustable spectral response," *Opt. Express*, vol. 22, no. 3, pp. 3691-3704, 10 Feb. 2014.
- [9] Y. W. Huang, W. T. Chen, W. Y. Tsai, P. C. Wu, C. M. Wang, G. Sun, and D. P. Tsai, "Aluminum plasmonic multicolor meta-hologram," *Nano Lett.*, vol. 15, no. no. 5, pp. 3122-3127, 6 Apr. 2015.
- [10] H. Hu, *et al.*, "Photonic anti-counterfeiting using structural colors derived from magnetic-responsive photonic crystals with double photonic bandgap hetero structures," *J. Mat. Chem.*, vol. 22, no. 1, pp. 11048-11053, 2 Apr. 2012.
- [11] Q. Chen and D. R. Cumming, "High transmission and low color cross-talk plasmonic color filters using triangular-lattice hole arrays in aluminum films," *Opt. Express*, vol. 18, no. 13, pp. 14056-14062, 21 Jun. 2010.
- [12] G. Y. Si, E. S. P. Leong, A. J. Danner, and J. H. Teng, "Plasmonic coaxial Fabry-Pérot nanocavity color filter," *Int. Soc. Opt. Photon.*, vol. 7757, Article no. 77573F, 5 pp., 10 Sept. 2010.
- [13] M. Aalizadeh, A. E. Serebryannikov, A. Khavasi, G. A. E. Vandenbosch, and E. Ozbay, "Toward electrically tunable, lithography-free, ultra-thin color filters covering the whole visible spectrum," *Sci. Rep.*, vol. 8, Article no. 11316, 11 pp., 27 Jul. 2018.
- [14] Z. Li, S. Butun, and K. Aydin, "Large-area, lithography-free super absorbers and color filters at visible frequencies using ultrathin metallic films," *ACS Photonics*, vol. 2, no. no. 2, pp. 183-188, 28 Jan. 2015.