

# فصلنامه علمی-ترویجی پرداخت غیرعالم

سال نهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۷، (پیاپی ۳۶): صص ۴۷-۵۶

## شبیه‌سازی استتار هوشمند در ناحیه مرئی طیف با استفاده از الکترووتینگ

جواد خلیل‌زاده<sup>۱\*</sup>، میثم شفیعی<sup>۲</sup>، علی طالبی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۲/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۲۵

### چکیده

استتار از اصول پدافند غیرعامل محسوب می‌شود. مسلم است که با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در زمینه ساخت و تولید انواع حساسه‌ها و سنجنده‌ها روش استتار سنتی کارایی لازم را برای مواجهه با این آشکارسازها نداشته و پا به پای توسعه در زمینه سامانه‌های شناساگر یا آشکارساز باید به فکر گسترش راهکارهای نوین مقابله نیز بود. یکی از این راهکارها، استتار تطبیقی یا هوشمند یا انعطاف پذیر است. در این نوع استتار تلاش بر این است تا هدف در برابر تغییرات محیطی به طور فعال واکنش نشان داده و خود را از دید ناظران مخفی نگاهدارد. در سال‌های اخیر تعدادی از پژوهشگران در قالب طرح‌های تحقیقاتی به امکان سنجی ساخت چنین سامانه‌هایی پرداخته‌اند که این پژوهش‌ها عموماً یا در طیف مرئی نبوده‌اند و یا در طیف مرئی منجر به تولید سیستم استتاری نشده‌اند. در این پژوهش با بهره‌گیری از فناوری جدید الکترووتینگ استتار هوشمند طراحی و شبیه‌سازی شده است. در این طراحی آرایه‌ای از میکرومنشورهای اپتیکی متشکل از مایع با ضریب شکست معین و با شکل قابل تغییر در نظر گرفته می‌شود که با حرکت دادن حجم‌های کوچک مایعات در اثر اعمال پتانسیل الکتریکی، زاویه شکست منشورها برای طول موج‌های مختلف کنترل می‌شود. به منظور پوشش دادن سطح اهداف به کار گرفته و با استفاده از مایعات متفاوت در درون میکرومنشورها، رفتار طول موج‌های مختلف را با نوشتن روابط اپتیکی حاکم در خروجی منشور بررسی و یک الگوی استتاری تطبیقی ارائه شده است.

**کلید واژه‌ها:** استتار، استتار هوشمند، الکترووتینگ، میکرو منشور

۱- دانشیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع) - jkhalil@ihu.ac.ir - نویسنده مسئول

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

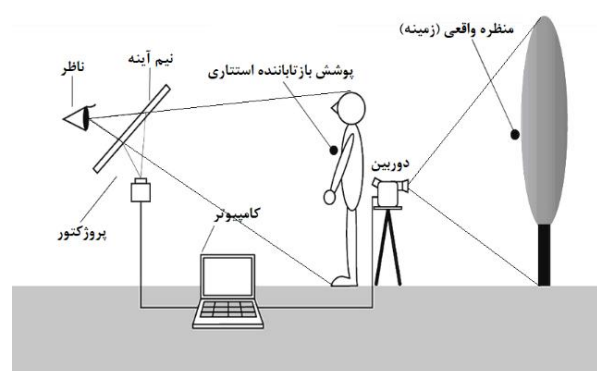
۳- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین(ع)

## ۱- مقدمه

فرامواد<sup>۵</sup>، نامرئی‌سازی به وسیله نظریه اپتیکی، استفاده از نانو ذرات و ژل‌های هوشمند [۲].

مقاله‌ای با عنوان «روش‌های استتار تطبیقی برای یک وسیله نقلیه زرهی سبک» در کنفرانس جنگ زمینی در نوامبر ۲۰۱۰ در کانادا ارائه شد که در بخشی از آن استتار بصری با استفاده از کیت‌های استتار هوشمند یا سلول‌های الکتروکرومیک مورد بررسی قرار گرفته است [۳].

یکی از روش‌های تحقق استتار هوشمند (معروف به رترو رفلکتیو<sup>۶</sup>) این است که مطابق شکل (۱) دوربینی را در پشت شیء استتاری و صفحه نمایشی (معمولاً به صورت ورقه‌ای انعطاف‌پذیر) را در جلوی آن قرار دهیم تا تصویر پشتی گرفته شده با دوربین را در جلوی شیء نمایش دهد. با این روش وقتی از مقابل به شیء نگریسته می‌شود به جای آن، تصویر پشت سرش مشاهده می‌گردد و بدین ترتیب هدف نامرئی به نظر می‌رسد. اما این روش تنها از همین زاویه دید کارآمد است. این رویکرد به آگاهی از محل ناظر به منظور محاسبه اندازه مناسب تصویر نمایش داده شده و اطمینان از این که اجزای صفحه نمایش (ترکیب کننده) روبروی ناظر هستند، نیاز دارد. برای طراحی استتار در محدوده‌ای خارج از ناحیه مرئی، کمپانی دفاعی بی.ای.ای<sup>۷</sup> بریتانیا یک فناوری پوششی که در ناحیه مادون قرمز کاربرد دارد را توسعه داد. اجرای آن روی یک وسیله نقلیه صورت گرفت که مجهز به یک "پیکسل" شش ضلعی به اندازه کف دست است که به منظور تطبیق مادون قرمزی با پس‌زمینه می‌تواند برای مطابقت با دمای محیط گرم یا سرد شود. دانشگاه "داک"<sup>۸</sup> نامرئی‌سازی را در ناحیه امواج میکروموج با استفاده از فرامواد انجام داده است.



شکل (۱): روش رترو رفلکتیو در نامرئی‌سازی [۴]

تابش میکروموج در نزدیکی اشیاء فراماده جریان می‌یابد و با اختلال کمی در طرف دیگر ترکیب شده و شیء را به گونه‌ای می‌سازد که گویی در آنجا وجود ندارد. هرچند، نامرئی‌سازی برای یک سطح دو

۱-۱- اهمیت و ضرورت استتار هوشمند<sup>۱</sup>

بهترین روش برای کاهش آسیب‌پذیری اهداف (سکوها، بناها و نفرات) در برابر آشکارسازی و شناسایی، استتار است. آشکارسازهای مدرن امروزی در صحنه‌ها با توانمندی بالا شانس آشکارسازی به مراتب بیشتری دارند. برای این که سامانه‌های استتار در برابر آشکارسازهای مدرن، که از فواصل دور اهداف را شناسایی می‌کنند مؤثر باشند، اهداف باید به طور چشم‌گیری با پس‌زمینه هماهنگ شوند. باید تمایز<sup>۲</sup> هدف در برابر پس‌زمینه (از هر نظر) در حد بسیار زیادی کاهش یابد. باقی ماندن در تمایز کم با پس‌زمینه برای سیستم‌های استتار سنتی ایستا بسیار سخت است. این بدان جهت است که محیط اطراف هدف دائماً تغییر می‌کند در حالی که خصوصیات مواد استتاری ثابت است. هدف ممکن است از نقطه‌ای به نقطه دیگر حرکت کند. به تبع آن پس‌زمینه نیز تغییر می‌کند. حتی زمانی که هدف حرکت ندارد تغییر شرایط خورشیدی و آب و هوایی تغییرات ثابتی را برای پس‌زمینه ایجاد و تأثیر استتار ایستا را محدود می‌کند. سیستم‌های استتار ایستا قادر به پاسخگویی مناسب به این تغییرات نخواهند بود. بنابراین برای مواجهه با این چالش‌ها سیستم‌های استتار آینده باید هوشمند (تطبیق‌پذیر) باشند تا بتوانند در برابر تغییرات محیطی فعالانه عکس‌العمل نشان دهند. برای این که بتوان در مواجهه با آشکارسازهای معمولی به‌طور مناسبی نامرئی باقی ماند، باید ویژگی‌های ظاهری سطح هدف را به خصوص در ناحیه مرئی تغییر داد. یعنی به سیستم استتار جدیدی نیاز است که در پاسخ به تغییرات محیطی بتواند به طور فعال رنگ خود را تغییر دهد [۱].

## ۱-۲- پیشینه تحقیق

در طبیعت موجودات گوناگونی از استتار هوشمند برای مخفی کردن خود از دید شکارچیان بهره می‌برند. آفتاب‌پرست<sup>۳</sup> نام سوسماری است که در مواجهه با خطر به سرعت رنگ خود را تغییر می‌دهد تا از تهدید شکارچی در امان بماند. خرچنگ آذینگر، نوعی ماهی پهن نیز از همین شیوه استفاده می‌کند.

در مراکز علمی دنیا با الهام گرفتن از طبیعت سعی شده است مدلی برای استتار هوشمند ارائه شود. وس اربسن<sup>۴</sup> در مقاله‌ای با عنوان «استتار تطبیق‌پذیر» پنج روش برای دست‌یابی به این استتار بیان کرد که عبارتند از: تقلید از طبیعت، نامرئی‌سازی به وسیله

5- Metamaterial  
6- Retro Reflective  
7- BAE Systems  
8- Duke University

1- Smart Camouflage  
2- Contrast  
3- Chameleon  
4- Wes Erbsen

الکتروویتینگ برای تشریح یک ویژگی مورد نیاز صفحه نمایش‌های جدید مورد استفاده قرار گرفت. دانشمندان دریافته‌اند که الکتروویتینگ در نتیجه نیروهای مماسی سطحی به دلیل تغییر در نیروی کشش سطحی حاصل شده که اساساً ناشی از اثرات میدان الکتریکی اعمالی است در حالی که اثر "الکتروموئینگی"<sup>۹</sup> ناشی از نیروهای ذاتی سطحی می‌باشد. با این حال، دانشمندان زمان زیادی را صرف توسعه یا استفاده از این پدیده نکردند تا این‌که اخیراً کاربردهای زیادی از الکتروویتینگ در اپتیک و سایر زمینه‌ها کشف شد. برگ<sup>۱۰</sup> در سال ۱۹۹۳ ساختاری را با نام الکتروویتینگ روی الکترودهای با عایق پوشیده شده<sup>۱۱</sup> پیشنهاد داد که قابلیت برگشت‌پذیری و کم‌هزینگی، آن را به گزینه مناسبی برای بسیاری از کاربردها تبدیل کرده است [۶].

با وجود تمام فراز و نشیب‌ها، پژوهش در باب الکتروویتینگ اپتیکی امروزه برای یک جهش بزرگ آماده است. فن‌آوری‌های جدید در بردارنده میکرومنشورهای الکتروویتینگ هدایت پرتوی<sup>۱۲</sup> است که باعث انحراف تمام نور می‌شود. فن‌آوری‌های جدید الکتروویتینگ این قابلیت را دارند تا بسیاری از موانعی را که در گذشته در رادار لیزری، نمایشگرهای سه بعدی، استتار هوشمند، صفحات الکترونیکی<sup>۱۳</sup> و میکروولن‌های آرایه‌ای وجود داشت، پشت سر بگذارند [۷].

### ۱-۳- اهداف

هدف اصلی بررسی این موضوع، ارائه الگوی جدیدی جهت توسعه فناوری استتار است. جلوگیری از دیده شدن هدف به وسیله ادوات مشاهده مرئی و در نتیجه کاهش آسیب‌پذیری و خسارات احتمالی نفرات یا تجهیزات از اهداف اصلی پدافند غیرعامل می‌باشد. در صورت اجرایی شدن، این طرح موجب ارتقای توان کشور در زمینه طراحی استتار تطبیقی<sup>۱۴</sup> خواهد شد.

هدف ضمنی، گام نهادن در مسیری نوین برای ایجاد استتار بصری و گشودن پنجره‌ای جدید در طراحی استتار تطبیقی است. ضمن اینکه آغازگر راهی جدید برای پژوهش‌های آینده در این زمینه باشد.

### ۲- روش و مواد

در بخش ۱-۲ اشاره شد که در تحقیقات صورت گرفته در دنیا برای انجام استتار هوشمند از روش‌های مختلفی مانند استفاده از مواد کرومیک یا روش رترو رفلکتیو استفاده می‌شود. در این مقاله سعی

بعدی و باند بسیار باریکی از فرکانس‌های میکروموج است، هیچ کدام از این دو روش برای ناحیه مرئی مناسب نیست.

نوعی از استتار هوشمند با تکیه بر مواد هوشمند و یا فرامواد صورت می‌گیرد. مواد هوشمند موادی هستند که یک یا برخی از ویژگی‌هایشان می‌تواند به کمک محرک‌های خارجی مانند فشار، حرارت، رطوبت، الکتروسیسته و ... تغییر کند. گروهی از مواد هوشمند سیستم‌های کروموژنیک<sup>۱</sup> هستند که رنگشان در پاسخ به تغییرات دمایی، نوری و یا الکتریکی تغییر می‌کند (به ترتیب ترموکرومیک<sup>۲</sup>، فوتوکرومیک<sup>۳</sup> و الکتروکرومیک<sup>۴</sup> نامیده می‌شوند). فراماده‌ها موادی مصنوعی هستند که طراحی گردیده‌اند تا خصوصیتی داشته باشند که در طبیعت موجود نمی‌باشد [۵].

نیروهای مسلح هلند با همکاری آلمان و کانادا سیستم استتاری هوشمندی را برای ناحیه مرئی طراحی کرده‌اند که چاملون نامیده می‌شود. شبکه‌ای از پلیمرهای ال.ای.دی<sup>۵</sup> با سطح درخشندگی خاص در پشت فیلترهای رنگی ثابت نصب شده است که با کمک دوربین، درخشندگی را به نحو مطلوب تنظیم می‌کند. در این شبکه‌ها از مواد الکتروکرومیک (فیلترهای رنگی قابل تنظیم با الکتروسیسته) استفاده می‌گردد. اما چنین به نظر می‌رسد که توسعه آن هنوز در مرحله تحقیق است. با توجه به اندازه نسبتاً بزرگ پلیمرهای ال.ای.دی و مصرف مداوم برق آن، این فناوری برای مأموریت‌های گسترده ناممکن به نظر می‌رسد.

نامرئی شدن ساده نیست و به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. یک روش موقت عملی‌تر این است که تشخیص شیء استتاری از محیط اطرافش مشکل باشد تا ناظران از وجود آن بی‌اطلاع شوند. از آنجا که هیچ محل از پیش تعیین شده‌ای برای ناظر متصور نیستیم، تلاشی برای ایجاد تصویر پس زمینه در جلوی شیء استتاری انجام نمی‌گردد. در عوض، یک الگوی استتار ترکیبی که از لحاظ بصری شبیه به محیط اطراف جسم استتاری است بر روی سطح بیرونی آن روی پنل‌های صفحه نمایش ارائه می‌شود. در فن‌آوری پنل، ترکیب رنگ‌ها و سطح درخشندگی صفحه نمایش باید طوری باشد که شیء استتاری را کاملاً با محیط اطرافش هماهنگ کند [۱].

پدیده الکتروویتینگ<sup>۶</sup> که پهن شدن مایع را روی سطح با اعمال پتانسیل الکتریکی روی آن کنترل می‌کند، یک پدیده ریزسیال<sup>۷</sup> است که اولین بار توسط لیپمن<sup>۸</sup> در قرن ۱۹ میلادی مورد مطالعه قرار گرفت. پس از تحقیقات گسترده در سال ۱۹۸۱ رسماً اصطلاح

- 1- Chromogenic System
- 2- Thermochromic
- 3- Photochromic
- 4- Electrochromic
- 5- PLED
- 6- Electrowetting
- 7- Micro-fluidic
- 8- Lippmann

9- Electrocapilarity

10- Berge

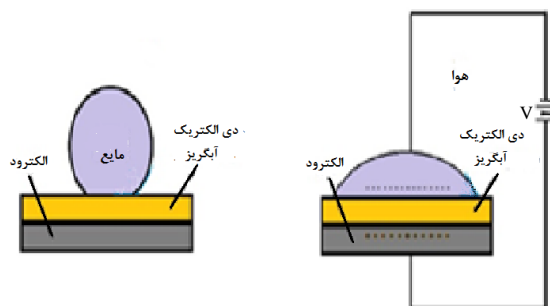
11- Electrowetting on Insulator Coated Electrodes(EICE)

12- Beam Steering

13- E-papers

14- Adaptive Camouflage

قطره و ثابت دی‌الکتریک خلأ و  $d_f$  ضخامت لایه دی‌الکتریک است [۶].



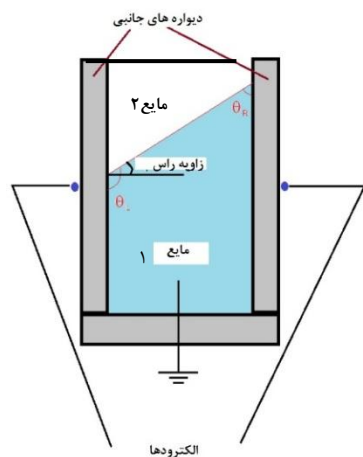
شکل (۳): مقایسه قطره روی الکتروود عایق پوش شده، با و بدون ولتاژ تحریک اعمال شده در اثر پدیده الکترووتینگ [۶]

### ۲-۲- مدل سازی میکرومنشور مبتنی بر الکترووتینگ

همان طور که بیان شد برای این استتار مطابق شکل (۳) از پوششی آرایه‌ای متشکل از میکرومنشورهای مبتنی بر الکترووتینگ بر روی هدف استفاده می‌شود. در شکل (۴) نمای جانبی دو بعدی از یک میکرومنشور نشان داده شده است که در این کار شبیه‌سازی شده و به کل پوشش استتاری تعمیم داده شده است.

در طراحی انجام شده در این مقاله، میکرومنشورها متشکل از دو مایع غیر قابل امتزاج در ابعاد میکرومتر در قسمت‌های پایینی و بالایی میکرومنشور و در تماس با هم هستند. هنگامی که نور محیط به هر یک از این میکرومنشورها می‌رسد، با توجه به خاصیت پاشندگی منشور که حاصل ضریب شکست متفاوت دو مایع است، نور در زوایای مختلف خروجی به تفکیک رنگ‌ها تجزیه می‌شود.

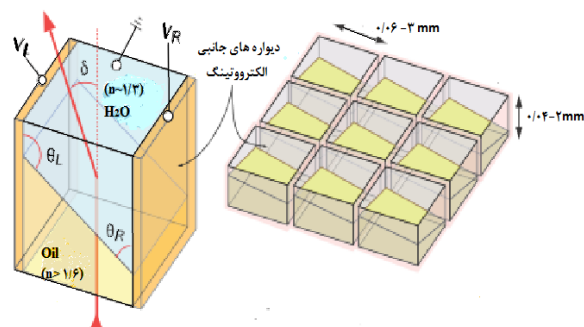
با اعمال ولتاژ نیروی کشش سطحی و زاویه تماس در سطح مشترک دو مایع کاهش پیدا کرده و زاویه رأس منشور نیز تغییر می‌کند و در نتیجه زاویه انحراف جابجا می‌شود. یعنی طول موج‌های مختلف در خروجی منشور به مقدار معلومی جابجا می‌شوند و این موضوع به منزله تحقق نیارمندی استتار است.



شکل (۴): نمای جانبی دو بعدی از یک میکرومنشور مدل سازی شده [۶]

شده است از روش الکترووتینگ به‌عنوان مبنایی برای انجام استتار هوشمند در ناحیه مرئی ( $0.4 \mu\text{m} - 0.7 \mu\text{m}$ )، استفاده شود و پس از معرفی اجزاء و شرح وظایف هر یک از آنها چگونگی انجام این نوع استتار شبیه‌سازی گردد.

ایده اصلی در طراحی چنین استتاری، کشیده شدن یک سطح آرایه‌ای (مشابه LED) متشکل از میکرومنشورهای مبتنی بر الکترووتینگ<sup>۱</sup> (شکل ۲) بر روی هدف است که با توجه به رنگ مورد نیاز برای استتار از زاویه دید ناظر که توسط یک دوربین عکسبرداری از پس‌زمینه گرفته شده و برای پردازش (تعیین رنگ غالب پس‌زمینه) در اختیار کامپیوتر قرار می‌گیرد. مایع و ولتاژ مناسب از بانک اطلاعاتی انتخاب و در اختیار واحد اجرای استتار قرار می‌گیرد. واحد اجرا نیز با اعمال فرمان دریافتی از کامپیوتر طول موج مورد نظر را در زاویه حضور ناظر تولید و رنگ هدف را هم‌رنگ با زمینه می‌سازد.



شکل (۲): آرایه‌ای از میکرومنشورهای مبتنی بر الکترووتینگ [۷]

### ۱-۲- الکترووتینگ

الکترووتینگ که روشی برای تحریک مقادیر کوچک مایعات روی سطوح است، ریشه عمیقی در اپتیک دارد. نزدیک به یک قرن پس از اقدام پیش‌گامانه لیپمن در زمینه الکتروموتینگ، بنی و هکود<sup>۲</sup> اولین بار اصطلاح الکترووتینگ را در سال ۱۹۸۱ در نشریه نمایشگرهای الکترووتینگ ابداع کردند [۷]. در واقع الکترووتینگ یک میدان الکتریکی اعمال شده خارجی را به‌منظور تحریک و جابجایی حجم‌های کوچک مایعات به وسیله تغییر کشش سطحی و همچنین تغییر محسوس زاویه تماس آنها استفاده می‌کند و یا به‌وسیله القاء یک شوک الکتریکی سطحی روی کل حجم مایع، آن را تحریک می‌کند (شکل ۳) [۸].

رابطه اصلی الکترووتینگ، که بین زاویه تماس سطحی و ولتاژ اعمالی به سطح است، به‌صورت معادله (۱) می‌باشد:

$$\cos \theta_v = \cos \theta_0 + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{2\gamma d_f} V^2 \quad (1)$$

که در آن،  $\epsilon_r$  و  $\epsilon_0$  به ترتیب ثابت گذردهی لایه دی‌الکتریک زیر

1- Electrowetting micropism Array  
2- Beni and Hackwood

به‌عنوان مثال در نقطه O طول موج خاصی (مثلاً سبز) را در حالت بدون ولتاژ داشتیم که با اعمال ولتاژی معین، با جابجایی همه طول موج‌ها در خروجی، در نقطه O طول موج جدیدی (مثلاً نارنجی) وجود خواهد داشت.

با جایگزینی متناوب مایعات درون میکرومنشور، هر یک از طول موج‌ها در زاویه معینی در خروجی حضور خواهند داشت. همچنین با تغییر متناوب ولتاژ، زاویه حضور جدید هر یک از طول موج‌ها به دست خواهد آمد که این داده‌ها یک بانک اطلاعاتی جامع را تشکیل خواهند داد. در این بانک اطلاعاتی مشخص است که برای هر مایع چه طول موجی، در چه زاویه‌ای و به‌ازای چه ولتاژی در خروجی وجود خواهد داشت. بسته به این‌که چه رنگی (طول موجی) برای استتار هدف مورد نیاز است، با مراجعه به بانک اطلاعاتی، مایع مورد نیاز و ولتاژ لازم برای تولید آن طول موج در زاویه حضور ناظر، استخراج شده و برای اجرای استتار در اختیار واحد اجرا قرار خواهد گرفت.

### ۲-۳- طراحی استتار هوشمند مبتنی بر الکتروآپتیک

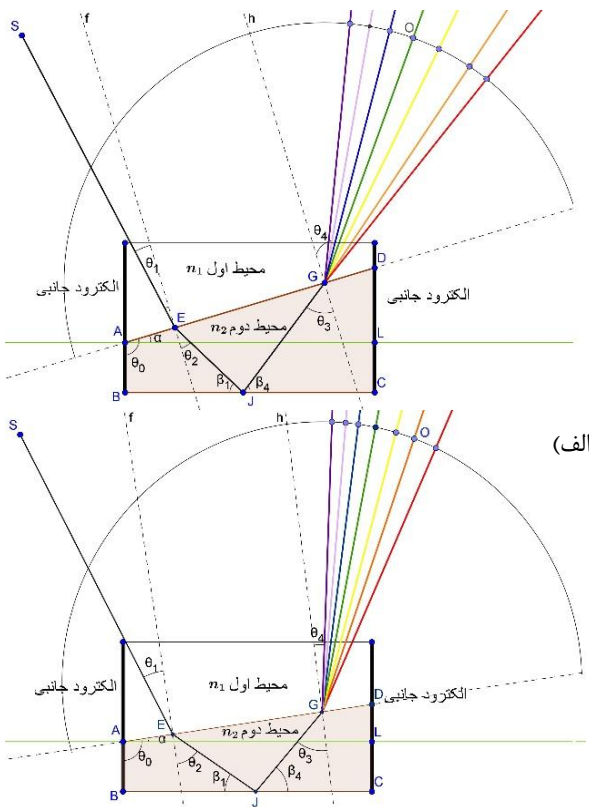
در این نوع استتار، دوربین از زاویه دید ناظر از هدف عکسبرداری نموده و آن را برای پردازش و تشخیص رنگ غالب پس‌زمینه در اختیار کامپیوتر می‌گذارد. کامپیوتر با مراجعه به بانک اطلاعاتی مایع و ولتاژ مناسب را تعیین نموده و برای اجرا به واحد اجرای استتار می‌سپارد.

با توجه به مطالب ذکر شده سیستم استتاری طراحی شده مشتمل بر چهار قسمت خواهد بود:

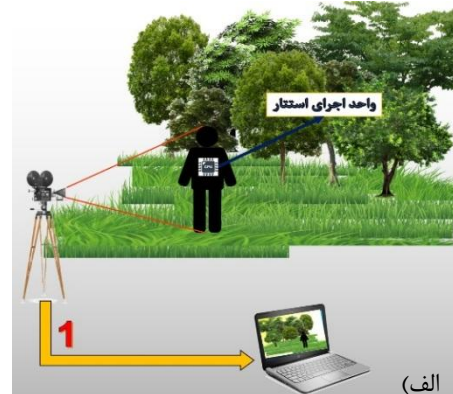
#### الف- پوشش (لباس) استتاری

در این طراحی هدف توسط پوششی آرایه‌ای متشکل از میکرومنشورهای مبتنی بر الکتروآپتیک پوشیده می‌شود. عملکرد این میکرومنشورها به این ترتیب است که با توجه به خصوصیت منشور (محیط دوم در شکل ۶-الف) طول موج‌های تشکیل‌دهنده نور ورودی، در خروجی میکرومنشور واپاشیده می‌شوند.

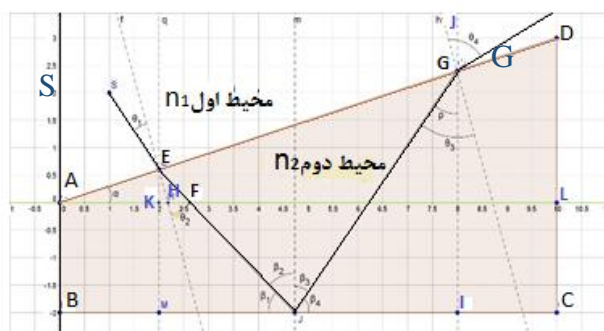
با اعمال پتانسیل الکتریکی به الکترودهای جانبی میکرومنشور، در زوایای خروجی قبلی شاهد حضور طول موج‌های جدیدی خواهیم بود (شکل ۶).



شکل ۶: (الف) پاشندگی طول موج‌ها در خروجی میکرومنشور و قرار گرفتن هر طول موج تحت زاویه‌ای خاص، (ب) تغییر طول موج قابل مشاهده در نقطه O به طول موج جدید (نارنجی) با اعمال ولتاژ الکتریکی و تاثیر پدیده الکتروآپتیک



شکل ۵: (الف) طراحی استتار هوشمند در طیف مرئی الف) عکسبرداری و تحویل عکس به کامپیوتر (ب) تعیین رنگ غالب، مایع و ولتاژ مورد نیاز روی لباس و ارائه به واحد اجرا و اجرای استتار خواسته شده توسط این واحد



شکل (۷): نمای جانبی نمونه‌ای از میکرومنشور شبیه‌سازی شده

۳. زاویه تماس بدون ولتاژ ( $\theta_0$ ) برای تمام چهار مایع با دیواره جانبی  $10.5^\circ$  درجه ( $\alpha = 15^\circ$ ) در نظر گرفته شده است.

۴. نور از نقطه  $E(x=2)$  و  $\tan \alpha y=2$  وارد منشور شده و از نقطه  $G(x=8)$  و  $\tan \alpha y=8$  از منشور خارج می‌شود.

۵. ضخامت لایه دی‌الکتریک  $1 \mu m$  در نظر گرفته شده است.

روابط زوایای مختلف نشان داده شده در شکل (۷) با استفاده از نظریه اپتیک هندسی به ترتیب زیر حاصل می‌شود:

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \left| \frac{\frac{2 \tan \alpha - y_S}{2 - x_S} + \cot \alpha}{1 - \cot \alpha \left( \frac{2 \tan \alpha - y_S}{2 - x_S} \right)} \right| \right) \quad (2)$$

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left( \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} \right) \quad (3)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} \left( \left| \frac{\tan(\theta_2 + \alpha) + \cot \alpha}{1 - \cot \alpha \tan(\theta_2 + \alpha)} \right| \right) \quad (4)$$

$$\theta_4 = \sin^{-1} \left( \frac{n_2 \sin \theta_3}{n_1} \right) \quad (5)$$

با استفاده از ضریب شکست هر یک از طول موج‌ها و با داشتن زوایای ورود، شکست و بازتابش، زاویه خروج هر یک از طول موج‌ها در خروجی میکرومنشور به دست می‌آید. حال با استفاده از معادله (۱)، رابطه الکتروپتینگ هر یک از مایعات به منظور تعیین بیشینه ولتاژ قابل اعمال به آنها با توجه به داده‌های جدول (۱) محاسبه می‌شود. برای مایع تترا کلرید کربن رابطه الکتروپتینگ به صورت رابطه (۶) خواهد شد:

$$\cos \theta_1 = \cos 105^\circ + \frac{\epsilon_0 \epsilon_r V^2}{2 \gamma d_f} \quad (6)$$

$$\cos \theta_1 = -0.259 + 3/671 * 10^{-4} * V^2 \quad (7)$$

از آنجا که کسینوس هر زاویه عددی بین ۱ و -۱ است،

$$-1 < -0.259 + 3/671 * 10^{-4} * V^2 < 1 \quad (8)$$

$$\Rightarrow V < 58/55 \quad (9)$$

بنابراین، بیشینه ولتاژ برای این مایع  $58/55$  ولت به دست می‌آید.

## ب- دوربین عکسبرداری

برای تعیین رنگ مورد نیاز برای پوشش استتاری از دیدگاه ناظر، باید دوربین با کیفیتی از پس‌زمینه هدف در راستای دید ناظر عکسبرداری نموده و عکس را برای پردازش در اختیار کامپیوتر قرار دهد (شکل ۵-الف).

## ج- کامپیوتر

عکس ثبت شده توسط دوربین پس از این‌که در اختیار کامپیوتر قرار گرفت به وسیله نرم‌افزارهای پردازش تصویر بررسی شده و رنگ غالب از دیدگاه ناظر تعیین می‌شود. برای تولید این رنگ روی پوشش استتاری، کامپیوتر به بانک داده جامع خود که در آن اطلاعات مربوط به مایعات قابل استفاده در میکرومنشور مبتنی بر الکتروپتینگ وجود دارد رجوع کرده و با توجه به زاویه حضور ناظر نسبت به هدف، مایع مورد نیاز و ولتاژ اعمالی را جهت تولید رنگ تعیین شده برای تمامی میکرومنشورها از طریق یک ارتباط مناسب به واحد اجرای استتار اعلام می‌کند (شکل ۵-ب).

## د- واحد اجرای استتار

واحد اجرای استتار می‌تواند یک سیستم تعبیه شده در زیر لباس هدف باشد که با دریافت فرمان از کامپیوتر، مایع و ولتاژ تعیین شده را در پوشش میکرومنشوری مبتنی بر الکتروپتینگ اعمال کرده و رنگ مورد نظر را از دیدگاه ناظر در تمام سطح پوشش استتاری تولید می‌کند (شکل ۵-ب).

## ۲-۴- شبیه‌سازی میکرومنشور مبتنی بر الکتروپتینگ

برای انجام شبیه‌سازی، میکرومنشوری به صورت شکل (۷) فرض می‌شود. مایع محیط اول را آب فرض نموده و مایع محیط دوم را به تناوب یکی از چهار مایع تترا کلرید کربن، سیکلو هگزان، پارافین و تولوئن که با آب غیر قابل امتزاج می‌باشند قرار داده و با تغییر ولتاژ، جابجایی هر یک از طول موج‌ها را در خروجی منشور بررسی می‌کنیم. در صورتی که به‌ازای مایعی خاص در زاویه‌ای از خروجی منشور با تغییر ولتاژ شاهد حضور حداقل دو طول موج باشیم، آن مایع برای استفاده استتاری در آن زاویه خاص مفید خواهد بود. ضمناً ضریب شکست چهار مایع مورد استفاده به ازای طول موج‌های مختلف از سایت مرجع [۹] استخراج گردید. فرض‌های صورت گرفته برای انجام شبیه‌سازی عبارتند از:

۱. نقطه A مبدأ مختصات فرض می‌شود.

۲. منبع نور در مختصات (۴) و (۱) در S= در نظر گرفته شده است.

به روش مشابه بیشینه ولتاژ برای سه مایع مورد مطالعه دیگر نیز محاسبه می‌گردد.

جدول (۱): مقادیر ثابت گذردهی، نیروی کشش سطحی و ضریب شکست در شش طول موج برای چهار مایع مورد مطالعه [۹]

ردیف	مایع به کار رفته در محیط دوم	ثابت گذردهی $\epsilon_r$ در محیط	نیروی کشش سطحی $\gamma$ (در $\frac{mN}{m}$ )	ضریب شکست در طول موج (λ) برحسب نانومتر					
				۶۸۵/۱	۶۰۳/۸	۵۷۹	۵۳۳/۱	۴۸۳/۶	۴۷۶/۹
۱	تتراکلرید کربن	۲/۲۴	۲۷	۱/۴۵۳۶	۱/۴۵۶۲	۱/۴۵۷۲	۱/۴۵۹۶	۱/۴۶۳۹	۱/۴۶۴۹
۲	سیکلو هگزان	۲	۲۴/۹۵	۱/۴۲۳۵	۱/۴۲۵۹	۱/۴۲۶۸	۱/۴۲۸۹	۱/۴۳۲۰	۱/۴۳۲۵
۳	روغن پارافین	۲/۱	۴۸	۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۴۸	۱/۴۸
۴	تولوئن	۲/۴	۲۸/۴	۱/۴۸۶۳	۱/۴۹۰۹	۱/۴۹۲۵	۱/۴۹۶۷	۱/۵۰۳۸	۱/۵۰۵۶

به یکی از این رنگ‌ها درآورد و کنتراست آن را با پس زمینه به کمترین مقدار ممکن رساند.

به همین ترتیب برای میکرومنشور متشکل از آب و سیکلو هگزان که در شکل (۹) نشان داده شده است، با تغییر ولتاژ تغییر طول موج در زوایای ۷۲، ۷۳، ۷۶ و ۷۷ درجه رخ می‌دهد.

برای میکرومنشور متشکل از آب و روغن پارافین، که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، در زوایای ۸۰ تا ۸۳ درجه، تغییر ولتاژ موجب تغییر در طول موج خواهد شد.

سرانجام در میکرومنشور متشکل از آب و تولوئن که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، در زوایای ۸۳، ۸۵، ۸۶ و ۸۷ درجه با تغییر در ولتاژ تغییر طول موج اتفاق می‌افتد.

همان طور که در شکل‌های (۸-۱۱) مشخص است، تغییر در طول موج با تغییر ولتاژ برای این چهار مایع در زوایای بعد از ۷۰ درجه صورت می‌گیرد. یعنی این مایعات برای استتار در این بازه زاویه‌ای مناسب می‌باشند. چنانچه بخواهیم در زوایای کوچکتر از ۷۰ درجه نیز این مسأله اتفاق بیفتد باید مایعات دیگری را نیز که با آب ممزوج نمی‌شوند، بررسی نمود. همچنین با دقت در این نمودارها مشخص است که در اثر اعمال پدیده الکتروآنتینگ، به‌ازای بازه‌ای از تغییرات ولتاژی (مثلاً ۱۸ تا ۴۴ ولت برای مایع تتراکلرید کربن در شکل (۹) هیچ طول موجی در خروجی میکرو منشور وجود نخواهد داشت که می‌تواند ناشی از وقوع بازتابش کلی در میکرومنشور باشد.

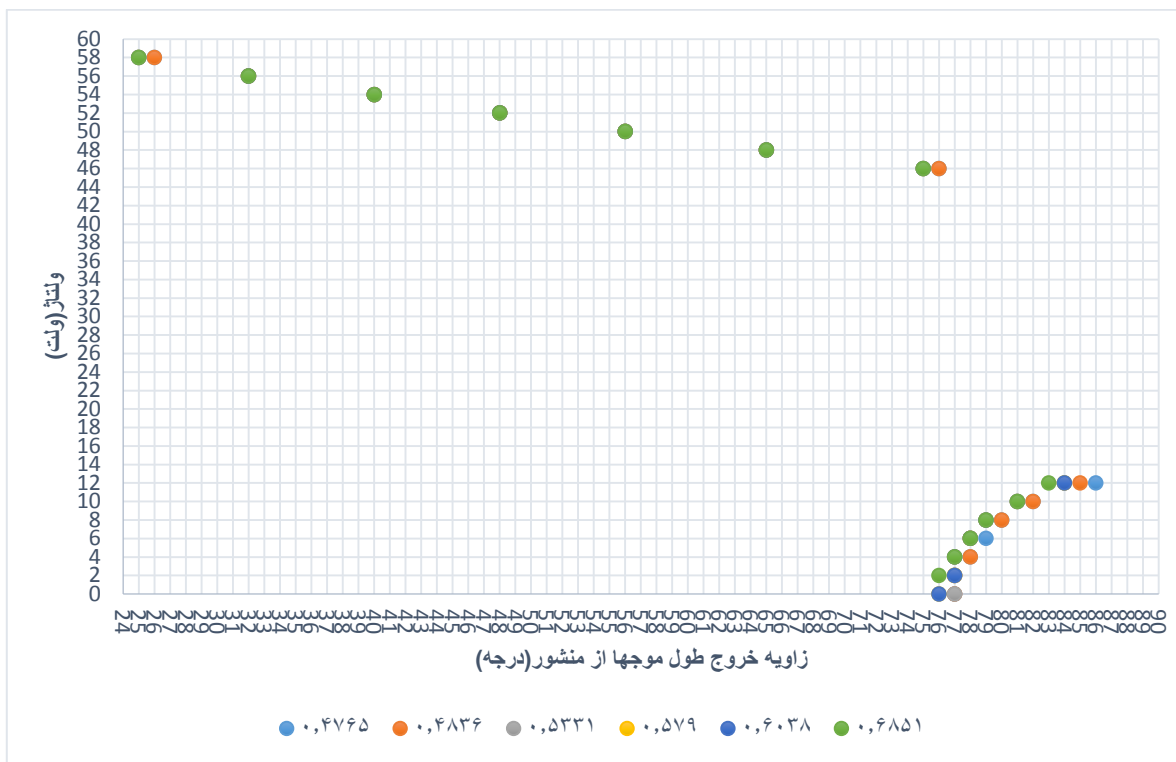
در ولتاژ صفر با محاسبه زوایای مختلف شکست نور، زاویه خروج هر یک از شش طول موج در خروجی میکرومنشور به‌دست می‌آید. با تغییر ولتاژ تا بیشینه مقدار آن با گام دو ولت زاویه خروج هر یک از طول موج‌ها به‌ازای ولتاژهای مختلف و به تبع آن میزان انحراف هر یک از طول موج‌ها در خروجی میکرومنشور حاصل می‌گردد. با رسم نمودار ولتاژ- زاویه خروج هر یک از طول موج‌ها مشخص می‌شود که در هر زاویه چه طول موج‌هایی وجود دارد و برای استتار می‌توان رنگ مورد نظر را در زاویه تعیین شده ایجاد کرد.

از آنجا که در محیط اول از آب استفاده شده است، برای محیط دوم میکرومنشور باید مایعاتی انتخاب گردند که در آب نامحلول باشند. به این منظور چهار مایع تتراکلرید کربن، سیکلو هگزان، روغن پارافین و تولوئن مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

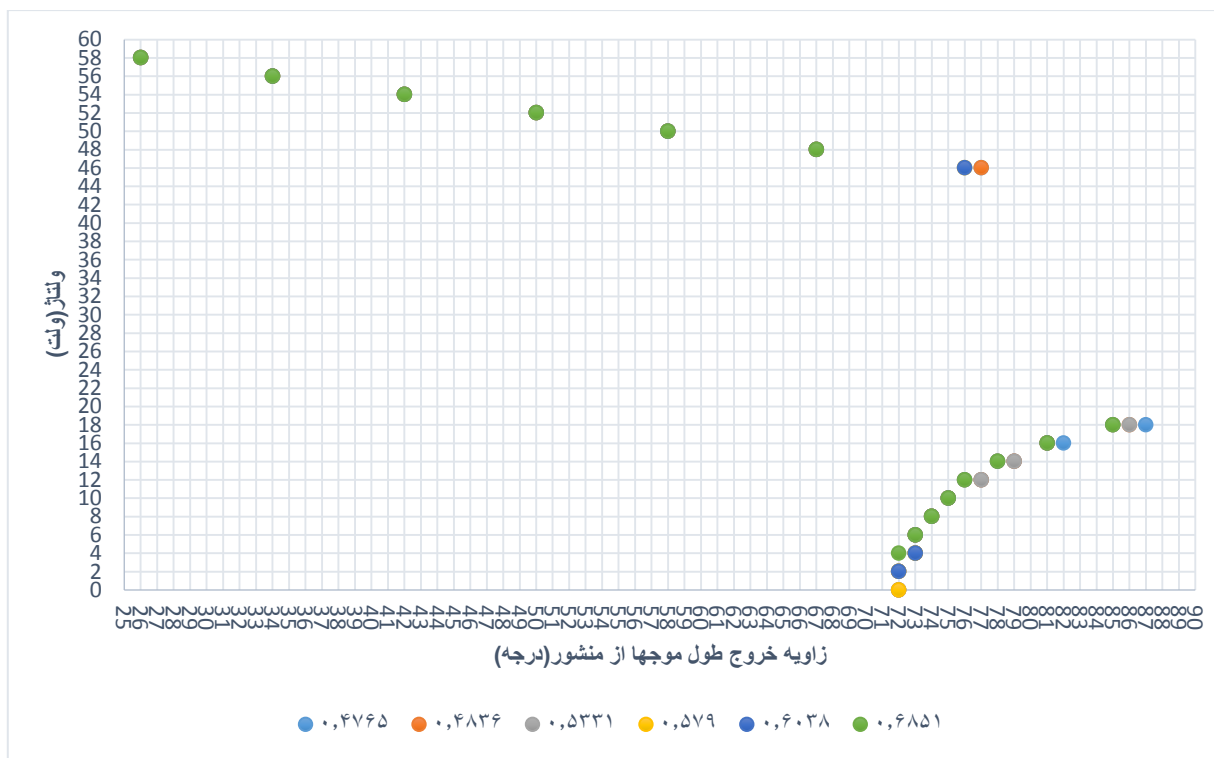
### ۳- نتایج

نمودارهای ولتاژ- زاویه خروج مایعات مورد مطالعه در طول موج‌های مختلف مرئی که در زمینه استتار مورد احتیاج است، به‌صورت شکل‌های (۸-۱۱) حاصل می‌شود.

در شکل (۸) که مربوط به میکرومنشوری متشکل از آب و مایع تتراکلرید کربن است، در زوایای ۷۶ تا ۷۹ درجه با تغییر ولتاژ طول موج خروجی تغییر می‌کند. به‌عنوان مثال در صورت حضور ناظر در زاویه ۷۷ درجه می‌توان طول موج‌های سبز، نارنجی یا قرمز را بنا به نیاز با اعمال ولتاژ مشخص شده تولید نمود. یعنی می‌توان هدف را

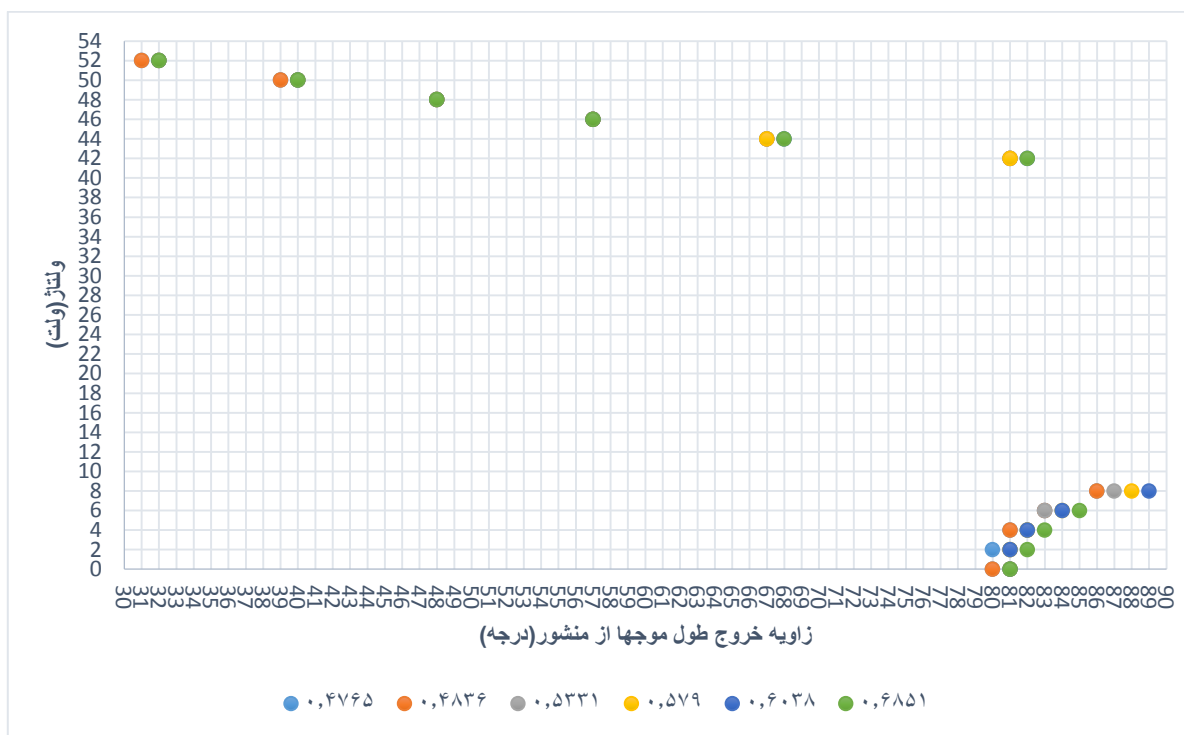


شکل (۸): نمودار ولتاژ- زاویه خروج برای میکرومنشور متشکل از آب و تتراکلرید کربن

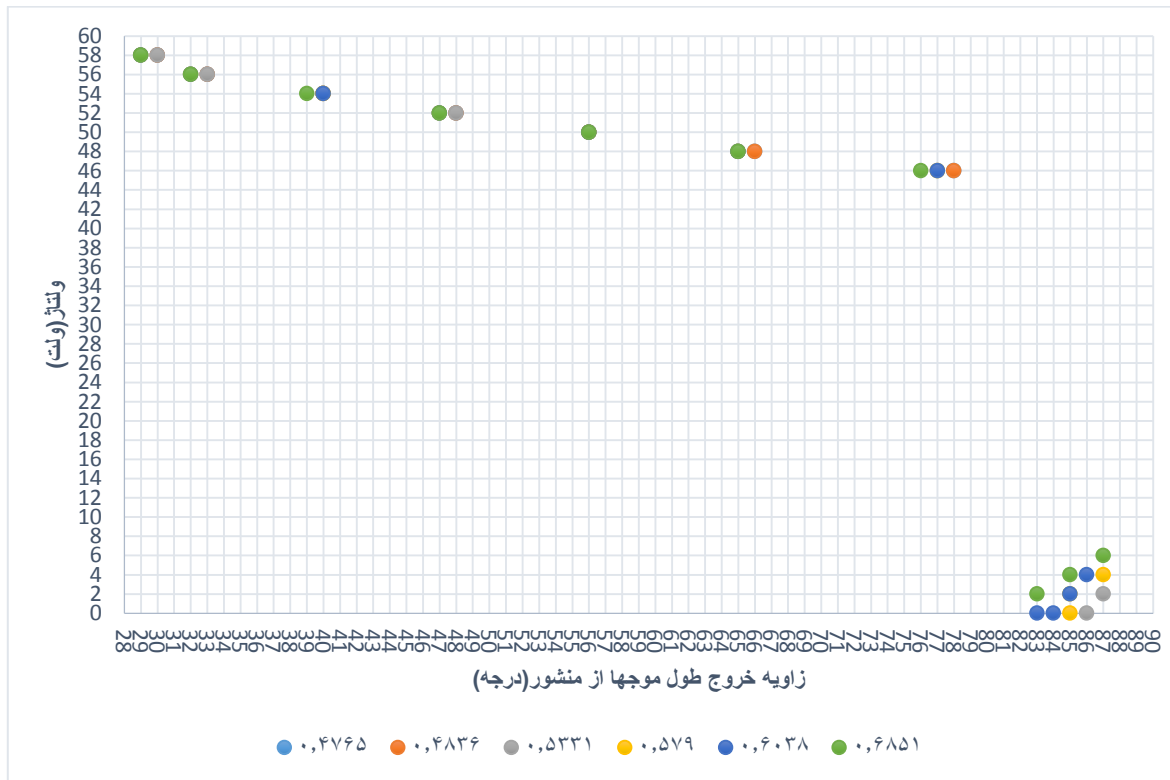


شکل (۹): نمودار ولتاژ- زاویه خروج برای میکرومنشور متشکل از آب و سیکلوهمگزان





شکل (۱۰): نمودار ولتاژ- زاویه خروج برای میکرومنشور متشکل از آب و روغن پارافین



شکل (۱۱): نمودار ولتاژ- زاویه خروج برای میکرومنشور متشکل از آب و تولوئن

خازن در بین دو الکتروود و یا دلایلی نظیر وقوع تبخیر یا یونیزه شدن مایعات امکان‌پذیر نباشد. بنابراین، قبل از اجرایی کردن

بیشینه ولتاژ اعمالی به میکرومنشور صرفاً از جنبه ریاضی بررسی شده و ممکن است در عمل اعمال چنین ولتاژی به جهت تشکیل

روش استتار هوشمند با استفاده از الکترووتینگ در مقایسه با روش رترو رفلکتیو که در بخش ۲-۱ به آن اشاره شد به جهت ثابت بودن ناظر در الکترووتینگ دارای مشکل کمتری است و به نظر می‌رسد می‌توان برای زوایای مختلف، طول موج‌های متناسب با پس زمینه را هدایت نمود. بنابراین به نظر می‌رسد آنچه موضوع بیشترین تحقیقات آینده در زمینه استتار هوشمند می‌باشد، علاوه بر راه کارهای کاهش هزینه در اجرایی شدن چنین سیستم استتاری، روش‌های انجام استتار هوشمند از دیدگاه ناظر متحرک می‌باشد.

## ۵- منابع

1. N. Pezeshkian and J. D. Neff, "Adaptive electronic camouflage using texture synthesis," Space and Naval Warfare Systems Center, Pacific San Diego, pp. 25-32, 2012.
2. W. C. Erbsen, "Adaptive Camouflage," Kansas State University Department of Physics, 2008.
3. V. Wheaton, I. Vincent, and J. Dumas, "Adaptive Camouflage Techniques for a Light Armored Vehicle," Defense Research and Development Canada, Land Warfare Conference, 2010.
4. V. Srikanth and P. Ramesh, "Invisibility system using image processing and optical camouflage technology," International Journal of Engineering Trends and Technology, vol. 4, pp. 1874-1877, 2013.
5. A. Shirzadian, "Metamaterial," Journal of CCD, vol. 1, no.1, p. 35, 2001. In Persian
6. W. Han, "Transmissive beam steering through electrowetting micropillar arrays," Thesis for The Degree of Master of Science in Electro-Optics, University of Dayton Ohio, 2009.
7. J. Heikenfeld, N. Smith, M. Dhindsa, K. Zhou, M. Kilaru, L. Hou, J. Zhang, E. Kreit, and B. Raj, "Electrowetting Optics," OPN January, 2009.
8. L. Yeo and J. Friend, "Electrowetting Applications," Springer, Newyork, 2008.
9. M. N. Polyanskiy, "Refractive index database," <https://refractiveindex.info>, Accessed on, 2018.

استتار، تمام این محاسبات ریاضی باید در محیطی آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده تا بانک اطلاعاتی کامپیوتر حاوی داده‌هایی دقیق و قابل اعمال باشد به طوری که در صحنه نبرد طول موج مورد نظر دقیقاً در زاویه مورد نظر تولید گردد.

ضمناً با توجه به رابطه (۱) هر چه ضخامت لایه دی‌الکتریک بزرگتر فرض شود، مقدار ولتاژ قابل اعمال به الکتروودها جهت اجرای پدیده الکترووتینگ بالاتر خواهد رفت.

## ۴- نتیجه گیری

با بررسی مایعات مختلف انحلال ناپذیر در آب و به دست آمدن زوایای تغییر طول موج آنها یک بانک جامع اطلاعاتی از مایعات و زوایای مربوطه در کامپیوتر تشکیل می‌شود. برای انجام استتار روی هدف یعنی برای تولید طول موجی مشخص در زاویه‌ای خاص، کامپیوتر با مراجعه به بانک اطلاعات خود، مایع و ولتاژ لازم را پس از تعیین در اختیار واحد اجرای استتار می‌گذارد. واحد اجرا مایع درخواست شده را از درون مخزن طراحی شده در لباس استتاری فراخوان کرده و توسط آن درون میکرومنشورها را پر نموده و طول موج را تولید می‌نماید.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که ایجاد استتار با استفاده از الکترووتینگ برای ناحیه مرئی از دیدگاه نظری امری میسر است ولی اجرا کردن این نوع استتار مسلماً نیازمند فناوری پیچیده‌تری است که تحقیقاتی تکمیلی در این زمینه را طلب می‌کند. همچنین با توجه به پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه تولید نمایشگرهای مبتنی بر الکترووتینگ آرایه‌ای، به نظر می‌رسد از جهت فن‌آوری برای تولید و استفاده از پوشش (لباس) استتاری که از نظر عملکردی همان نمایشگر مبتنی بر الکترووتینگ است، گام‌های اولیه برداشته شده است.

ضمناً با اجرایی شدن این نوع از استتار دغدغه واکنش در لحظه و بهنگام یک سیستم استتاری هوشمند در مواجهه با سنجنده‌های طیف مرئی مرتفع می‌شود.

## Simulation of Smart Camouflage in the Visible Region of Spectrum Using Electro-Wetting

J. Khalilzadeh \*, M. Shafiei, A. Talebi

### Abstract

Camouflage is considered to be a passive defense principle. It is clear that, despite dramatic advances in the production of detectors and sensors, traditional camouflage technique does not have the necessary effectiveness to deal with these detectors, and development of detection and detection systems should be considered in the context of developing new solutions to countermeasure. One of these strategies is smart or adaptive camouflage. In this kind of camouflage, the goal is to react actively to environmental changes and to keep itself hidden from the eyes of the observer. In recent years, a number of researchers have made feasibility studies for such systems in research projects. These studies are not generally in the visible spectrum or have not led to production of a camouflaged system. In this research, design and simulation of an intelligent camouflage using electro-wetting technology have been developed. In this design, an array of optical micro-prisms consisting of a refractory liquid with a changeable shape is employed. By applying electric potential, small volumes of liquids are moved; thus, the angle of breakage of the prisms is controlled for different wavelengths. With objective of covering the surface of the targets, different fluids are used within the micro-prisms and behavior of different wavelengths is studied by writing the optical relations governing the prism output rays and a comparative camouflage pattern is presented.

**Key Words:** *Camouflage, Smart Camouflage, Electrowetting, Microprism*

---

\* Imam Hossein Comprehensive University - (jkhilil@ihu.ac.ir) - Writer-in-Charge