

## ارزیابی اثربخشی طرح‌های استتاری از منظر ویژگی ناهنجاری طیفی

احمد زوارتربتی<sup>۱\*</sup>، حمید دهقانی<sup>۲</sup>، علی جبار رشیدی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق - مخابرات ۲- استادیار ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر- تهران

(دریافت: ۹۴/۰۴/۲۰، پذیرش: ۹۴/۰۷/۲۲)

### چکیده

توسعه روز افزون سیستم‌های شناسایی، اثر بخشی روش‌های استتاری متداول را با چالش مواجه ساخته است. پیشرفت در فن‌آوری سنجش از دور ابرطیفی، این تصاویر را به یک منبع اطلاعاتی ویژه برای شناسایی هدف تبدیل کرده است. حوزه پردازشی "آشکارسازی ناهنجاری طیفی"، که با مشخص کردن ناهنجاری‌ها در تصاویر ابرطیفی، محل اشیاء غیر عادی را بر روی تصویر تعیین می‌کند، یک تهدید در انجام طرح‌های استتاری محسوب می‌شود. سنجش میزان موفقیت طرح‌های استتاری در مقابله با این تهدید، موضوع این مقاله است. فرآیند سنجش بایستی به صورت جامع و بر اساس معیارهای کارا انجام شود. در این مقاله، نوع الگوریتم، مشخصات پس‌زمینه و مشخصات هدف، به عنوان پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند آشکارسازی ناهنجاری در نظر گرفته شدند و بر مبنای آن‌ها، معیارهایی برای ارزیابی اثر بخشی طرح‌های استتاری از منظر ویژگی ناهنجاری طیفی ارائه شد. در پیاده‌سازی‌های نرم‌افزاری انجام شده روی دو تصویر ابرطیفی، تنوعی از اهداف واقعی و مصنوعی با سطوح استتاری مختلف ایجاد گردید. ارزیابی میزان اثر بخشی سطوح استتاری شبیه‌سازی شده، با استفاده از معیارهای پیشنهادی و مقایسه و تحلیل نتایج به دست آمده، کارآمدی معیارهای ارائه شده را نشان می‌دهد.

**کلید واژه‌ها:** ارزیابی استتار، ناهنجاری طیفی، اصول استتار، ویژگی‌های طیفی، تصاویر ابرطیفی، کاشت هدف.

## Effectiveness Assessment of Camouflage Designs Based on Spectral Anomaly Feature

A. Zavvartorbati, H. Dehghani\*, A. Jabbar Rashidi

Malek-Ashtar University, Tehran

(Received: 11/07/2015, Accepted: 14/10/2015)

### Abstract

The advances in hyperspectral remote sensing technology, have become these images the specific information source for target identification. "spectral anomaly detection" Processing domain, which determine the location of unusual objects on the image identifying anomalies in hyperspectral images, is a threat in camouflage designs. the subject of this article is success evaluation of camouflage designs deal with this threat. The assessment process should be comprehensive and to be done on the basis of efficient measures. In this paper, the type of algorithm, the background specifications and the target specifications, were considered as the efficient parameters in the anomaly detection process, and on the basis of it, were presented measures for effectiveness evaluation of camouflage designs in terms of Spectral anomaly features. In the software implementations on two hyperspectral images, was created a variety of real and synthetic targets with different camouflage levels. effectiveness Evaluation of simulated camouflage levels using the proposed measures and Comparison and analysis of the received results, shows the The effectiveness of the proposed measures.

**Keywords:** Camouflage Assessment, Spectral Anomaly, Camouflage Principles, Spectral Features, Hyperspectral images, Target Implantation.

\*Corresponding Author E-mail: Hamid\_deh@yahoo.com

## ۱. مقدمه

و شناسایی هدف، یک فاز مهم و اصلی در اغلب الگوریتم‌های ارزیابی استتار است، چرا که استتار و شناسایی دو مفهوم مقابل هم هستند و هر چه شناسایی یک هدف استتاری بهتر انجام شود نشان دهنده آن است که عملیات استتار ناموفق تر بوده است. عناصر شناسایی (نظیر تن، رنگ، بافت، الگو و ...)، که همان ویژگی‌های قابل استخراج از تصویر هستند، مبنای تفسیر تصاویر و در نتیجه شناسایی هدف می‌باشند.

در کاربردهای تصاویر ابرطیفی برای مقاصد شناسایی، به‌طور کلی دو پردازش شناسایی اهداف و آشکارسازی ناهنجاری‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس بایستی ارزیابی اثربخشی طرح‌های استتاری، در این دو حوزه پردازشی صورت گیرد که در این پژوهش، تنها به مقوله آشکارسازی ناهنجاری پرداخته شده است. آشکارسازی ناهنجاری یکی از پردازش‌های اساسی در زمینه شناسایی و پایش اهداف است. هدف این پردازش، تعیین محل اشیاء غیر عادی بر روی تصویر، با تعیین پیکسل‌هایی که نسبت به پس‌زمینه اطرافشان دارای اختلاف طیفی هستند می‌باشد. از نظر دیگر، آشکارسازی ناهنجاری می‌تواند به عنوان مرحله اول تشخیص اتوماتیک هدف در نظر گرفته شود که این کار با مشخص نمودن مناطقی که ممکن است شامل اهداف بالقوه باشند صورت می‌گیرد. در این خصوص می‌توان به کاربرد آشکارسازی ناهنجاری<sup>۱</sup> ORASIS در برنامه شناسایی اهداف ASRP ارتش آمریکا اشاره نمود [۶].

برای رسیدن به هدف این مقاله، یعنی ارزیابی اثربخشی طرح‌های استتاری، بایستی سطوح استتاری مختلف در دسترس باشند تا بتوان میزان مقاومت هر طرح استتاری را با معیارهای ارزیابی مناسب در برابر ابزار تهدید (الگوریتم‌های آشکارسازی ناهنجاری) بررسی کرد. قابل اعتمادترین روش، قرار دادن اهداف استتاری با طیف و سطوح استتاری نسبی مشخص بر روی زمین و سپس ارزیابی اثربخشی طرح‌های استتاری بر اساس تصاویر ابرطیفی و نقشه موقعیت زمینی اهداف مورد نظر است. ولی محدودیت‌هایی برای تحقق این روش وجود دارند. این روش پرهزینه است و تنها می‌توان هدف و طرح استتاری مورد نظر را در پس‌زمینه‌ای مشخص مورد ارزیابی قرار داد. بعلاوه ممکن است ایجاد طرح‌های استتاری و انجام آزمایشات میدانی روی مناطقی که دسترسی فیزیکی به آنجا دشوار است، امکان‌پذیر نباشد. در ضمن ممکن است به علت عدم دسترسی به امکانات تکنولوژیکی و فنی، تهیه تصاویر ابرطیفی با مشخصات رزولوشن طیفی و رزولوشن مکانی مورد نظر امکان‌پذیر نباشند. روش کاشت هدف مصنوعی و ایجاد طرح‌های استتاری با سطوح مشخص، روشی است که نه تنها محدودیت‌های مذکور را ندارد بلکه در محیط شبیه‌سازی دیجیتالی، امکانات بسیاری که در فرآیند ارزیابی کمک‌کننده‌اند ایجاد می‌شوند.

ایجاد طرح‌های استتاری با سطوح استتاری مشخص (قوی تر یا

در میدان نبرد، کسب اطلاعات در مورد دشمن و صحنه جنگ، نقش به‌سزایی در تصمیم‌گیری‌ها دارد. شناسایی، مأموریتی برای کسب اطلاعات در مورد فعالیت‌ها، منابع، توانمندی‌ها و موقعیت دشمن است [۱]. در مقابل شناسایی که زمینه‌ساز اقدامات آفندی است، اقدامات آفا یعنی اختفاء، فریب، استتار قرار دارند که هدف اصلی آن‌ها، جلوگیری از کشف و شناسایی نیروها، تجهیزات، تأسیسات و فعالیت‌های خودی توسط نیروهای بیگانه می‌باشد. استتار در یک تعریف عمومی می‌تواند معانی اختفاء و فریب را هم در بر گیرد. انتخاب روش استتار به عوامل متعددی بستگی دارد که مهم‌ترین عامل، نوع ابزار تهدید در موضوع شناسایی اهداف و دارایی‌ها می‌باشد. امروزه فناوری‌های سنجش از دور (تصویربرداری ابرطیفی و راداری)، به عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای تهدید در موضوع شناسایی اهداف به حساب می‌آیند که کسب اطلاعات با استفاده از این فناوری‌ها بر خلاف روش‌های متعارف نظامی که پیچیده، پرهزینه و اغلب خطرناک هستند، فرآیندی سریع، مطمئن و با قابلیت‌های پردازشی بالا است [۲]. در خصوص سابقه استفاده از فن‌آوری تصویربرداری ابرطیفی در حیطه شناسایی اهداف می‌توان به [۳] و [۴] اشاره کرد.

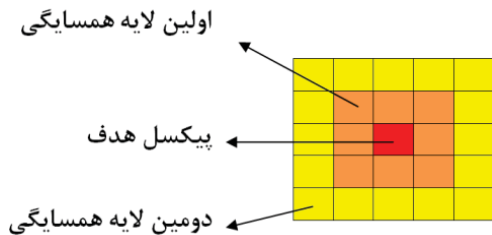
یکی از اقدامات مهم قبل از اجرای عملیات استتار، داشتن ارزیابی از نحوه‌ی عملکرد و میزان اثربخشی عملیات استتار در برابر سامانه‌های مختلف ماهواره‌ای می‌باشد. این فرآیند می‌تواند قبل از انجام یک طرح با هزینه‌ی زیاد، سنجشی از تأثیر و میزان عملکرد طرح را ارائه داده و مفید بودن آن را تا حدود زیادی مشخص نماید. در واقع با توجه به توانایی بالای آشکارسازهای سامانه‌های ماهواره‌ای امروزی، باید به دنبال روش‌های استتار کارآمد بود. ارائه مکانیزمی که بتواند کارایی و اثر بخشی طرح‌های استتاری را (ترجیحاً به صورت کمی) نشان دهد، می‌تواند در درک ماهیت ابزارهای تهدید در موضوع شناسایی برای همه ذینفعان پدافند غیر عامل (هم بهره‌برداران طرح‌های استتاری و هم طراحان چنین طرح‌هایی) مفید باشد. در زمینه ارزیابی اثربخشی طرح‌های استتاری مطالب بسیار اندکی منتشر شده است، شاید علت آن این باشد که ارزیابی خودکار و هوشمند طرح‌های استتاری به کمک الگوریتم‌های رایانه‌ای بحث جدیدی می‌باشد و بیشتر کاربرد و ماهیت نظامی دارد و نتایج تحقیقات انجام گرفته در این زمینه دارای ارزش و طبقه‌بندی اطلاعاتی می‌باشد. مقاله آقای امین صداقت یکی از معدود تلاش‌هایی است که در این زمینه منتشر شده است [۲].

اکثر روش‌های کلاسیک جهت ارزیابی استتار، از اپراتور انسانی استفاده می‌کنند. ولی با توجه به محدودیت روش‌های مبتنی بر اپراتور انسانی و به دلیل سلیقه‌ای بودن آن‌ها، وجود روش‌های اتوماتیک مبتنی بر کمیت‌های تصویری، مستقل از نظرات اپراتور انسانی، یک مسأله اساسی و مهم است. تحقیقات مختلفی برای این منظور انجام پذیرفته و روش‌های متنوعی نیز ارائه شده‌اند [۵]. کشف

<sup>۱</sup> Optical Real-Time Adaptive Spectral Identification System

$$x_i = p_i t + (1 - p_i) b_i \quad (4)$$

که  $x_i$ ، طیف پیکسل لایه همسایگی نام است و  $p_i$  درصد مشارکت طیف هدف در طیف آن پیکسل است. بدیهی است که هر چه فاصله



شکل ۱. نمایی از لایه‌های همسایگی پیرامون پیکسل هدف

پیکسل از هدف بیشتر می‌شود مقدار  $p_i$ ، کمتر است و خواهیم داشت:  $P_0 \gg P_i$ .

ترکیب دو عدد ( $p_i$  و  $p_0$ )، عددی بین آنها را نتیجه خواهد داد که می‌توان این دو عدد را با ضرایب متفاوت ( $a_i$ ) با هم ترکیب کرد و سهم هر یک را تنظیم نموده و سطوح نسبی استتاری را به دست آورد. برای در نظر گرفتن اثر تمام هشت پیکسل اولین لایه همسایگی، باید میانگین طیفی پیکسل‌های اطراف ( $p_1$ )، در ترکیب قرار داده شود. در نتیجه ترکیب طیف پیکسل هدف با طیف پیکسل‌های اولین لایه همسایگی به صورت زیر خواهد بود:

$$x_0 = a_0 x_0 + (1 - a_0) x_1 \quad (5)$$

$$x_0 = a_0 (p_0 t + (1 - p_0) b_0) + (1 - a_0) (p_1 t + (1 - p_1) b_1) \quad (6)$$

اگر مقدار  $a_0$ ، صفر در نظر گرفته شود، با توجه به اینکه  $p_0 \gg p_1$  است، در طیف حاصل، اثر بسیار کمی از طیف هدف وجود دارد و این حالت، بهترین سطح استتار خواهد بود و بالعکس اگر  $a_0$ ، یک در نظر بگیریم، هیچ استتاری رخ نداده است.

در مورد اهداف مصنوعی نیز با همین منطق عمل شد یعنی ترکیب خطی طیف هدف و پس‌زمینه در نظر گرفته شد. با این تفاوت که در مورد اهداف مصنوعی، با تغییر سهم طیف هدف در رابطه (۳)، در واقع با افزودن طیف هدف به طیف پیکسل مورد نظر و پیکسل‌های پیرامونی آن، اهداف با سطوح استتاری مختلف ایجاد و بر روی پس‌زمینه قرار داده شده‌اند، در صورتی که در مورد اهداف واقعی، با افزودن میانگین طیفی پیکسل‌های پیرامونی به طیف هدف، یعنی تغییر سهم طیف پس‌زمینه پیرامونی، بر روی اهداف موجود در تصویر، سطوح استتاری مختلف ایجاد شد. نکته قابل توجه در کاشت هدف مصنوعی این که اگر طیف هدف از طیف پس‌زمینه ناهنجارتر باشد در واقع نتیجه فرآیند کاشت هدف، ایجاد ناهنجاری خواهد کرد که با کاهش سهم طیف هدف، سطح استتاری بهتری ایجاد خواهد شد و اگر طیف پس‌زمینه از طیف هدف ناهنجارتر باشد، با افزایش سهم طیف هدف، سطح استتاری بهتری ایجاد خواهد شد و هدف، خود به عنوان پوشش استتاری تلقی می‌شود. در مواجهه با هدف

ضعیف‌تر) نسبت به هم، می‌تواند مبنای مقایسه در مطالعات قرار گیرد. بنابراین بایستی فرآیند ایجاد طرح‌های استتاری، از یک اصول منطقی تبعیت کند. طبق فرضیه معروف اختلاط خطی طیفی<sup>۱</sup> مواد در پیکسل‌های تصاویر ابرطیفی، می‌توان امضای طیفی یک پیکسل را با ترکیبی خطی از طیف اجسام موجود در موقعیت زمینی مربوط به آن پیکسل جایگزین کرد [۷]. در اینجا نیز به طور کلی فرض شده که هر پیکسل تصویر به عنوان یک ترکیب خطی از طیف پس‌زمینه ( $b$ )، طیف هدف ( $t$ ) و نویز ( $n$ ) مدل می‌شود:

$$x = \alpha b + \beta t + n \quad (1)$$

در رابطه بالا،  $\alpha$  و  $\beta$  اعدادی بین صفر و یک هستند و به ترتیب معرف میزان سهم سطحی پوشش پس‌زمینه و ماده هدف از کل سطح پیکسل هستند. روش کاشت اهداف مصنوعی بدین صورت است که طیف هدف ( $t$ )، به صورت عددی (با درصدهای مختلف) با طیف پیکسل ( $x$ )، مخلوط می‌شود و طیف پیکسل بدین صورت خواهد بود:

$$x_p = pt + (1-p)x \quad (2)$$

در این رابطه از اثر نویز صرف نظر شده است و  $x$  بردار طیفی پیکسلی است که هدف در آن کاشته می‌شود و  $t$  بردار طیفی هدف. تعدادی از عوامل مانند نویز سنسور، اتمسفر و ... مانع جمع‌آوری تصویر رادبانسی ایده‌آل می‌شوند و هنگامی که طیف هدف مشخص به صورت عددی در یک تصویر وارد می‌شود، این عوامل کنار گذاشته می‌شوند و لذا می‌توان ارزیابی ناشی از روش کاشت هدف استتاری را به عنوان یک سناریوی ارزیابی مناسب در نظر گرفت [۷]. در رابطه (۲)، هر چه سهم طیف هدف کمتر و سهم طیف پیکسل (که نقش پس‌زمینه را برای هدف مورد نظر بازی می‌کند)، بیشتر باشد، طیف حاصل به طیف پس‌زمینه شبیه‌تر خواهد بود.

با توجه به اینکه آمیختگی طبیعی کامل هدف با استفاده از مواد طبیعی (مانند پوشش گیاهی زنده در جنگل‌ها) می‌تواند به عنوان مؤثرترین گزینه جهت استتار در نظر گرفته شود، لذا توجه به این نکته که آمیختگی الزاماً با زمینه محلی باید صورت گیرد، بسیار حائز اهمیت است، چرا که در غیر این صورت پردازش‌های آشکارسازی ناهنجاری به آسانی قادر به شناسایی اهداف بالقوه خواهند بود [۵]. بنابر این جهت ایجاد سطوح مختلف استتاری برای اهداف واقعی موجود در تصویر ابرطیفی، می‌توان طیف پیکسل هدف را با طیف پس‌زمینه اطراف آن ترکیب کرد و با افزایش سهم پس‌زمینه، به سطوح استتاری بهتر دست پیدا کرد. اگر طیف هر پیکسل، ترکیبی خطی از طیف هدف مورد نظر ( $t$ )، و طیف پس‌زمینه آن ( $b$ ) (شامل طیف پس‌زمینه پیکسل و طیف پیکسل‌های پیرامونی)، باشد، طیف پیکسل هدف به صورت زیر خواهد بود:

$$x_0 = p_0 t + (1 - p_0) b_0 \quad (3)$$

و طیف پیکسل‌های پیرامونی به صورت رابطه (۴) است:

<sup>1</sup> Spectral linear mixing

به‌طور تقریباً یکنواخت بر روی هدف صورت گرفته باشد، به صورت تقریبی می‌توان در یک سطح کوچک و مشخصی از پیکسل آن را برآورد نمود.

در روش ایجاد سطوح مختلف استتاری برای اهداف واقعی، طیف پیکسل مورد نظر به صورت رابطه  $x_p$  وجود دارد و در فرآیند ایجاد سطوح استتاری، با افزودن میانگین طیفی پیکسل‌های پیرامونی، در واقع سهم طیف هدف را در رابطه  $x_p$  کم می‌کنیم. یعنی خواهیم داشت:

$$x_p = px_0 + (1-p)x_1 \quad (10)$$

در رابطه بالا،  $x_0$  بردار طیفی پیکسل مورد نظر و  $x_1$  بردار میانگین طیفی پیکسل‌های پس‌زمینه پیرامونی است.

داشتن معیارهای منطقی برای ارزیابی اثربخشی طرح‌های با سطوح مختلف استتاری بسیار حائز اهمیت است چرا که این معیارها، مبنایی برای تعیین میزان موفقیت هر طرح استتاری هستند و مشخص می‌کنند که تا چه اندازه اصول اولیه استتار در تحقق اهداف استتاری رعایت شده‌اند.

در حوزه پردازشی آشکارسازی ناهنجاری طیفی، با اعمال الگوریتم آشکارساز ناهنجاری به تصویر ابرطیفی، محل اشیاء غیر عادی در تصویر مشخص می‌شود. خروجی الگوریتم آشکارساز ناهنجاری به صورت یک تصویر با درجه خاکستری است که در این تصویر، مقدار هر پیکسل میزان عدم شباهت پیکسل با پس‌زمینه مشترک را نشان می‌دهد. تصویر با درجه خاکستری که تحت عنوان "نقشه ناهنجاری" در این مقاله از آن نام برده شده است، ورودی بخش ارزیابی است و لاجرم فرآیند سنجش بایستی بر مبنای اطلاعات استخراجی از این تصویر صورت گیرد.

در این مقاله با ایده گرفتن از مباحث مطرح در زمینه بهره‌برداری از تصاویر ابرطیفی، سه پارامتر تأثیرگذار در فرآیند آشکارسازی ناهنجاری در نظر گرفته شدند و بر مبنای هر یک، معیاری برای سنجش میزان موفقیت طرح‌های استتاری بیان شد. این پارامترها عبارتند از ۱- نوع الگوریتم آشکارساز ناهنجاری، ۲- مشخصات پس‌زمینه و ۳- مشخصات هدف.

در نقشه ناهنجاری، مقدار اختصاص داده شده به هر پیکسل، جایگاه آن پیکسل را در بین پیکسل‌های پس‌زمینه مشترک مشخص می‌کند و نقش پیکسل هدف را در فرآیند سنجش میزان موفقیت طرح استتاری لحاظ می‌کند. در سناریوی ایجاد سطوح استتاری برای یک هدف خاص نیز مشخصات پیکسل‌های پس‌زمینه ثابت است و با تغییر مشخصات پیکسل هدف، سطوح استتاری مختلف ایجاد می‌شوند. اگر نقشه ناهنجاری به دست آمده، نسبت به بالاترین عدد ناهنجاری نرمالیزه شود، مشخص می‌شود که هر پیکسل نسبت به ناهنجاری‌ترین پیکسل تصویر در چه سطحی از ناهنجاری قرار دارد. در این مقاله، مقدار پیکسل در نقشه ناهنجاری نرمالیزه شده، به عنوان

واقعی چند پیکسلی، برای ایجاد سطوح مختلف استتاری برای هر پیکسل هدف، میانگین طیف پیکسل‌های پیرامونی (غیر هدف) همان پیکسل به عنوان طیف پس‌زمینه پیکسل در نظر گرفته شدند.

بررسی تصاویر ابرطیفی نشان داده است که طیف هدف، در طیف پیکسل‌های پیرامونی تأثیرگذار است. این تأثیر را با یک تابع گوسی با عرض  $w$  مطابق معادله (۷) در نظر گرفته که در آن  $p_i$  فاصله مکانی بین پیکسل هدف ( $t$ ) و پیکسل پس‌زمینه ( $Z_i$ ) است [۸].

$$Z_i = \exp\left(-\frac{p_i^2}{w^2}\right) \cdot f \cdot t + \left(1 - \exp\left(-\frac{p_i^2}{w^2}\right) \cdot f\right) \cdot b \quad (7)$$

در پیاده‌سازی‌های این تحقیق، برای نزدیک‌تر شدن به واقعیت، بعد از ایجاد طیف اهداف استتاری، طیف پیکسل‌های اطراف، طبق رابطه (۷) تصحیح شده (مقدار  $w$  برابر ۲ در نظر گرفته شد).

در الگوریتم‌های آشکارسازی ناهنجاری طیفی، مشخصات آماری طیف پس‌زمینه (محلی یا کلی) و پیکسل مورد نظر محاسبه شده و با استفاده از فرمول‌های مختلف، از اختلاف این مشخصات آماری، معیاری برای بیان میزان ناهنجاری استخراج می‌شود. امید ریاضی (میانگین) به عنوان ممان آماری مرتبه اول و کواریانس به عنوان ممان آماری مرتبه دوم، دو آماره‌ای هستند که اغلب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. مدل ریاضی که برای طیف پیسیکل در روش کاشت هدف و ایجاد سطوح استتاری ارائه شده است منطبق بر مدل ریاضی الگوریتم‌های آشکارسازی ناهنجاری نیز است. برای مثال، رابطه کلی الگوریتم آشکارساز ناهنجاری  $RX$ ، که به طور گسترده در کاربردهای تصویربرداری ابرطیفی مورد استفاده قرار می‌گیرد، به صورت زیر است

$$Z_{RX}(x) = (x - \mu)^T \Gamma^{-1}(x - \mu) \quad (8)$$

در رابطه بالا،  $\mu$  بردار میانگین طیفی و  $\Gamma$  کواریانس پیکسل‌های زمینه هستند و  $x$  امضای طیفی پیکسل می‌باشد. با روش کاشت هدف مصنوعی، تنها طیف پیکسل تغییر خواهد کرد و بنابراین دو پارامتر دیگر یعنی میانگین و کواریانس که به پس‌زمینه تعلق دارند، تغییر نخواهند کرد. بدیهی است هر چه  $\mu$  و  $x$  به یکدیگر نزدیک باشند، میزان  $Z_{RX}$  به مقدار صفر نزدیک‌تر و در نتیجه، میزان ناهنجاری کمتر خواهد بود. هنگامی که هدف در پیکسل قرار گیرد، در واقع با استفاده از روش کاشت هدف مصنوعی، هدف با طرح‌های مختلف استتاری (سطوح دشواری مختلف)، جایگزین شده است و بایستی در فرمول آشکارساز،  $x$  با  $x_p$  جایگزین شود که  $p$  میزان سهم سطحی هدف از کل سطح پیکسل است [۹]. پس خواهیم داشت:

$$Z_{RX}(x) = (x_p - \mu)^T \Gamma^{-1}(x_p - \mu) \quad (9)$$

که در آن

$$x_p = (1-p)x + pt, \quad p = \frac{A_t}{A_c + A_t}$$

در رابطه بالا،  $A_c$  مقدار سطح پوششی پیکسل از ماده استتاری (پس‌زمینه) و  $A_t$  میزان سطح پوششی پیکسل از هدف مورد نظر است. از آنجایی که  $p$  حاصل یک نسبت است، لذا چنانچه استتار

گیرد، بایستی سطح آشکارسازی پیکسل هدف در مقایسه با دیگر ناهنجاری‌های موجود در تصویر که ناهنجارتر از هدف می‌باشند و هشدار اشتباه محسوب می‌شوند نیز مورد بررسی قرار گیرد.

در برخی از کاربردها، نقشه ناهنجاری‌ها را باینری در نظر می‌گیرند، یعنی همه ناهنجاری‌های بزرگ‌تر از یک سطح آستانه را با عدد یک و بقیه را با صفر نمایش می‌دهند. در این صورت برای در نظر گرفتن اثر پیکسل‌های هشدار اشتباه (n عدد)، چون مقدار عدد ناهنجاری این پیکسل‌ها برابر در نظر گرفته شده، می‌توان احتمال  $\frac{1}{n}$  را به عنوان احتمال شناسایی هدف در نظر گرفت. معیار کمترین نرخ هشدار اشتباه، این مفهوم را نیز در بر می‌گیرد. و اما می‌دانیم که عدد ناهنجاری پیکسل‌های هشدار اشتباه متفاوت است و این که چه تعداد از پیکسل‌های هشدار اشتباه در هر سطحی از ناهنجاری قرار دارند، در تفسیر نقشه ناهنجاری تأثیرگذار است چرا که هر چه اختلاف سطح هشدارهای اشتباه نسبت به پیکسل هدف بیشتر باشد، پیکسل هدف در بین آنها بیشتر محو می‌شود و این نشان دهنده استتار بهتر هدف است. بنابراین بایستی معیاری را در نظر گرفت که اختلاف سطح ناهنجاری پیکسل‌های هشدار اشتباه نسبت به هدف را لحاظ کند. از این رو در این مقاله، پارامتری با اختصار fFPLR (first false positive level rate)، به عنوان سومین معیار ارزیابی در نظر گرفته شد. معادله مربوط به این معیار در رابطه (۱۲) نمایش داده شده است. شمارنده سیگما در این رابطه، تعداد هشدارهای اشتباه به ازای ناهنجارترین پیکسل هدف است. در صورت رابطه (۱۲)، مجموع تفاضل سطح ناهنجاری پیکسل هدف با پیکسل‌های هشدار اشتباه محاسبه شده که با تقسیم به عبارت مخرج نرمالیزه می‌شود. بنابراین عدد به دست آمده از این رابطه، در محدوده [0 1] خواهد بود.

$$fFPLR = \frac{\sum (\text{بیشینه مقدار پیکسل‌های هدف} - \text{مقدار پیکسل هشدار اشتباه})}{(\text{بیشینه مقدار پیکسل هشدار اشتباه}) * (\text{تعداد پیکسل‌های تصویر})} \quad (12)$$

اگر در یک پس‌زمینه یکسان میزان اثر بخشی طرح‌های استتاری مختلف مورد سنجش قرار گیرد به علت ثابت بودن مشخصات پس‌زمینه، با کاهش مقدار یک پیکسل در تصویر با درجه خاکستری، معیار fFPLR افزایش خواهد یافت و یک ارزیابی دقیق‌تری را نسبت به معیار fFPR ارائه خواهد داد. ولی اگر ارزیابی در پس‌زمینه‌های متفاوت صورت گیرد، به علت تفاوت در تراکم پیکسل‌های هشدار اشتباه در سطوح مختلف ناهنجاری ممکن است نتایج متفاوتی برای این دو معیار حاصل شود که با توجه به کاربرد قابل تفسیر است. تا اینجا، سه معیار برای ارزیابی اثربخشی طرح‌های استتاری ارائه شد و نقش پارامترهای تأثیرگذار در شناسایی اهداف استتاری به صورت جداگانه در نظر گرفته شد که بنا به کاربرد می‌توان از ترکیب این معیارها برای ارزیابی استفاده کرد.

در برخی از مقالات، برای ارزیابی کارایی الگوریتم‌های آشکارساز ناهنجاری به صورت دیداری، معیاری با عنوان "حد آستانه تطبیقی"، بکار می‌رود [۱۱] و بیشتر هنگامی که موقعیت زمینی اهداف در اختیار نیست از این معیار استفاده می‌شود. حد آستانه تطبیقی از

اولین معیار ارزیابی در نظر گرفته شد و تحت عنوان "عدد ناهنجاری" نامگذاری گردید. هر چه هدف از سطح استتاری بهتری برخوردار باشد، عدد ناهنجاری کمتری خواهد داشت و شناسایی آن دشوارتر خواهد بود. در مورد اهداف چند پیکسلی، عدد مربوط به ناهنجارترین پیکسل هدف در نقشه ناهنجاری، به عنوان معیار ارزیابی در نظر گرفته شده است.

اصول بکار رفته در الگوریتم‌های مختلف آشکارسازی ناهنجاری، متفاوت هستند و ارزیابی کارایی الگوریتم‌های آشکارسازی ناهنجاری بر مبنای سطح زیر منحنی ROC (AUC<sup>1</sup>) صورت می‌گیرد که امروزه این شاخص به طور گسترده پذیرفته شده است. در منحنی ROC، احتمال شناسایی هدف (TPR<sup>2</sup>) یعنی کسری از پیکسل‌های هدف که بالای یک سطح مشخص توسط الگوریتم آشکارساز نمره‌دهی شده‌اند، در مقابل نرخ هشدار اشتباه (FPR<sup>3</sup>)، یعنی تعداد پیکسل‌هایی از تصویر که بالای آن سطح مشخص نمره‌دهی شده‌اند رسم می‌شود. نقشه ناهنجاری، خروجی الگوریتم آشکارسازی ناهنجاری و ورودی بخش ارزیابی است. بنابراین در فرآیند ارزیابی اثربخشی طرح استتاری بایستی نقش الگوریتم آشکارساز ناهنجاری در فرآیند ارزیابی لحاظ گردد. در مقالاتی نظیر مرجع [۱۰]، کمترین عدد نرخ هشدار اشتباه، که مربوط به ناهنجارترین پیکسل هدف است مبنای تشخیص هدف قرار گرفته است. این به این معنی است که با توجه به تصویر ابرطیفی در دسترس و الگوریتم آشکارسازی ناهنجاری مورد استفاده، کمترین هزینه (تعداد ناهنجاری‌های هشدار اشتباه) برای کشف و شناسایی برجسته‌ترین پیکسل هدف چه مقدار است؟

در نظر گرفتن این پارامتر به عنوان معیار ارزیابی، منطقی به نظر می‌رسد چرا که اولاً نقطه‌ای روی منحنی ROC مربوط به الگوریتم آشکارسازی در نظر گرفته شده است و با در نظر گرفتن این معیار، اثر الگوریتم آشکارساز ناهنجاری در ارزیابی لحاظ می‌شود و ثانیاً چون منحنی ROC یک روند صعودی دارد بنابراین برای کشف دیگر پیکسل‌های هدف، نرخ هشدار اشتباه، بزرگتر یا مساوی این کمترین نرخ هشدار اشتباه خواهد بود.

هر چه طرح استتاری موفق‌تر باشد و آشکارسازی هدف را دشوارتر کند بایستی عدد ناهنجاری کمتر و در نتیجه نرخ هشدار اشتباه بزرگتری را در نقشه ناهنجاری به خود اختصاص دهد. در این مقاله، معیار کمترین نرخ هشدار اشتباه، به عنوان دومین معیار ارزیابی با اختصار fFPR (first false positive rate) نشان داده شده. رابطه (۱۱) معرف این معیار می‌باشد:

$$fFPR = \frac{\text{تعداد های پیکسل هشدار اشتباه به ازای شناسایی ناهنجارترین پیکسل هدف}}{\text{تعداد پیکسل‌های تصویر}} \quad (11)$$

در روند ارزیابی اثربخشی طرح استتاری، علاوه بر این که بایستی میزان تمایز هدف نسبت به پس‌زمینه مشترک مورد ارزیابی قرار

<sup>1</sup> Area under the ROC curve

<sup>2</sup> True Positive Rate

<sup>3</sup> False Positive Rate

### ۳. نتایج و بحث

در این مطالعه از دو تصویر ابرطیفی استفاده شده تا مجموعه‌ای کامل از اهداف واقعی و مصنوعی زیر پیکسلی و با ابعاد کامل داشته باشیم. سطوح استتاری نسبی شبیه‌سازی شده برای این اهداف، ورودی بخش ارزیابی است.

#### ۳-۱. تصویر Hymap

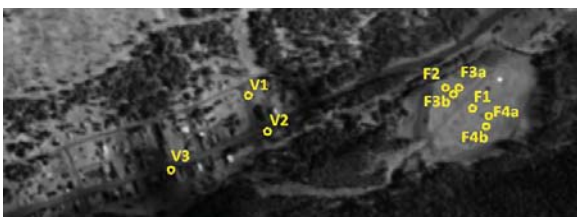
یکی از داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، یک تصویر ابرطیفی مشتمل بر تعدادی هدف واقعی مشخص شده بر روی آن است. تصویر ابرطیفی مربوط به سنجنده هوابرد Hymap (با ۱۲۶ باند طیفی) است که از ارتفاع حدود ۱۲۰۰ متری و با اندازه پیکسل زمینی ۳ متر در تابستان ۲۰۰۶ از شهر Cooke آمریکا گرفته شده است (شکل ۲). در این تصویر دو دسته هدف با موقعیت زمینی مشخص وجود دارند. یک دسته از اهداف شامل شش نوع پارچه یا نایلون رنگی در ابعاد پیکسل کامل و زیر پیکسلی (کمتر از سه متر) است که در یک منطقه علفزار با موقعیت زمینی مشخص در قسمت شرقی شهر قرار داده شده‌اند (جدول ۱)، و دسته دیگر شامل سه خودرو است که در نقاط مختلف شهر قرار دارند. از این تصویر برای ارزیابی اهداف استتاری زیر پیکسلی استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات اهداف در تصویر ابرطیفی Hymap

هدف	نوع (ماده)	اندازه (متر)	کسر استتار شده از پیکسل (درصد)
F1	پارچه قرمز	۳×۳	۰
F2	نایلون زرد	۳×۳	۰
F3a	پارچه آبی	۲×۲	۵۶
F3b	پارچه آبی	۱×۱	۸۶
F4a	نایلون قرمز	۲×۲	۵۶
F4b	نایلون قرمز	۱×۱	۸۶



شکل ۲. تصویر پنکروماتیک ماهواره Quickbird از شهر Cooke



شکل ۳. موقعیت اهداف واقعی موجود در باند ۵۶ تصویر ابرطیفی

رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۱۲].

$$\tau_a = \mu_d + z_a \sigma_d \quad (13)$$

در رابطه بالا،  $\tau_a$  مقدار حد آستانه میزان ناهنجاری در یک سطح آستانه اطمینان معین  $a$  است، به طوری که برای هر پیکسل مشخص می‌سازد که آن پیکسل ناهنجار است یا نرمال.  $\mu_d$  و  $\sigma_d$  نیز به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر ناهنجاری به دست آمده از الگوریتم مورد نظر برای همه پیکسل‌های تصویر می‌باشند.  $z_a > 0$  نیز آماره آزمون  $z$  در سطح اطمینان  $a$  است که کنترل کننده تعداد پیکسل‌هایی است که قرار است به عنوان ناهنجاری مشخص شوند.

با توجه به اینکه این معیار، با در نظر گرفتن مشخصات آماری پیکسل‌ها در نقشه ناهنجاری، به عنوان معیار شهودی برای ارزیابی الگوریتم‌های آشکارساز ناهنجاری مطرح است لذا در این مقاله تفاضل سطح ناهنجاری پیکسل هدف تا حد آستانه تطبیقی در یک سطح اطمینان مشخص، به عنوان چهارمین معیار ارزیابی ارائه شد. این پارامتر با اختصار  $nld$  (normalized level difference with adaptive threshold) و با رابطه (۱۴) نشان داده شده است.

$$nld = \text{حد آستانه تطبیقی} - \text{عدد ناهنجاری پیکسل هدف} \quad (14)$$

هر چه طرح استتاری موفق‌تر باشد، عدد به دست آمده برای این معیار بایستی سیر نزولی داشته باشد. در پیاده‌سازی‌های این مقاله، حد آستانه تطبیقی مشابه مرجع [۱۳]، در سطح اطمینان ۲/۵٪ ( $z_{0.025} = 1.96$ ) در نظر گرفته شده.

یک تعبیر دیگر از این معیار این است که اگر پارامتر  $z_a$  در رابطه (۱۳) متغیر وابسته، و  $\tau_a$ ، یعنی حد آستانه برابر با عدد ناهنجاری پیکسل هدف در نظر گرفته شوند، خواهیم داشت:

$$z_a = (\tau_a - \mu_d) / \sigma_d \quad (15)$$

که در این رابطه با کاهش  $\tau_a$ ،  $z_a$  نیز کاهش می‌یابد. و این یعنی تعداد پیکسل‌های هشدار اشتباه با توجه به مشخصات آماری نقشه ناهنجاری، و مبتنی بر معیاری شهودی، محاسبه شود.

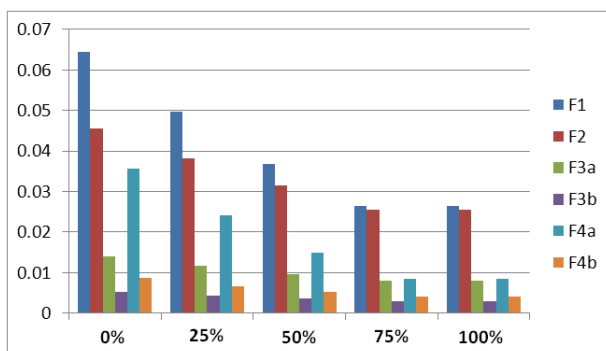
اما انتخاب موقعیت و رعایت انضباط استتار یکی از اصول اولیه استتار است که بایستی در تحقق طرح‌های استتاری رعایت شود. انتخاب موقعیت، شامل انتخاب یک پس‌زمینه محلی مناسب است به طوری که اجزای هدف را در خود محو نماید. با تغییر در محدوده پس‌زمینه، نتایج متفاوتی از الگوریتم‌های آشکارسازی ناهنجاری به دست می‌آید که با تحلیل آنها می‌توان به انتخاب محل مناسب برای استقرار هدف استتاری پرداخت. تراکم و عدد ناهنجاری پیکسل‌های هشدار اشتباه، با توجه به فاصله آنها تا هدف در تصمیم‌گیری‌ها تأثیرگذار است. در این مقاله، محاسبه معیارهای ارزیابی در پس‌زمینه محدود، مبنای سنجش انضباط استتار قرار گرفته است. یعنی بعد از اعمال الگوریتم آشکارساز ناهنجاری، یک برش از تصویر با درجه خاکستری شامل پس‌زمینه محلی اطراف هدف مورد نظر انتخاب و از بقیه پیکسل‌ها صرف نظر شده و سپس معیارهای ارزیابی محاسبه شده‌اند.

جدول ۲. نتایج استخراج شده از نقشه ناهنجاری برای اهداف مختلف (مربوط به شهر Cooke) - پس‌زمینه شامل تمام تصویر

هدف	عدد ناهنجاری	fFPR	ffPLR	nId
F1	۰/۰۸۱۲	۰/۰۰۲۳	۰/۰۷۳۷	۰/۰۵۷۶
F2	۰/۰۵۳۶	۰/۰۰۳۸	۰/۰۹۵۱	۰/۰۲۹۹
F3a	۰/۰۱۶۶	۰/۰۱۶۳	۰/۱۶۱۷	-۰/۰۰۷۰
F3b	۰/۰۰۶۵	۰/۱۴۸۹	۰/۴۰۳۸	-۰/۰۱۷۲
F4a	۰/۰۴۹۴	۰/۰۰۴۳	۰/۰۹۹۵	۰/۰۲۵۸
F4b	۰/۰۱۱۳	۰/۰۳۶۲	۰/۲۱۶۳	-۰/۰۱۲۴
V1	۰/۰۰۴۹	۰/۲۸۹۱	۰/۵۶۵۶	-۰/۰۱۸۷
V2	۰/۰۰۵۶	۰/۲۱۶۶	۰/۴۸۷۴	-۰/۰۱۸۱
V3	۰/۰۰۵۶	۰/۲۱۹۵	۰/۴۹۰۸	-۰/۰۱۸۱

در یک پیاده‌سازی دیگر برای اهداف واقعی موجود در تصویر شهر Cooke، با روشی که در متن توضیح داده شد، سطوح استناری نسبی مشخص ایجاد شد تا بتوان به طور اصولی‌تر با تحلیل نتایج به ارزیابی اثربخشی سطوح استناری پرداخت. شکل (۵)، عدد ناهنجاری و شکل (۶)، پارامتر nId، به دست آمده برای اهداف مختلف با سطوح استناری نسبی را نشان می‌دهد.

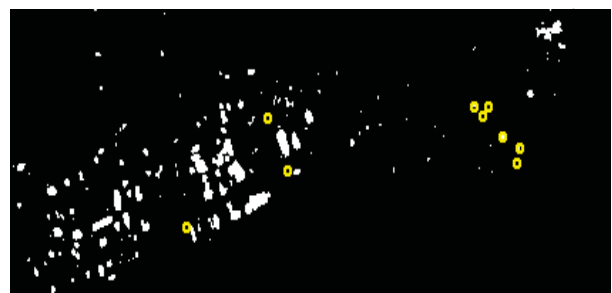
مشاهده می‌شود که برای هر هدف، با افزایش سطح استنار شده (بهبود طرح استناری)، عدد ناهنجاری کاهش یافته و پارامتر nId سیر نزولی داشته. شکل (۷)، نمایشی دو بعدی از پارامتر ffPR و عدد ناهنجاری را برای سطوح نسبی استناری اهداف مختلف نشان می‌دهد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که هر چه نقطه مربوط به یک سطح استناری به گوشه سمت راست-پایین این نمودار نزدیک‌تر باشد یعنی ناهنجاری کمتر و ffPR بزرگ‌تر داشته باشد، هدف با طرح استناری بهتری استنار شده است.



شکل ۵. عدد ناهنجاری (محور عمودی)، در مقابل کسر (درصد) استنار شده از پیکسل هدف (محور افقی)

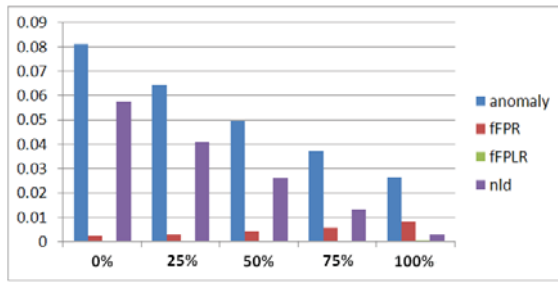
الگوریتم RX، در پیاده‌سازی‌های این مطالعه برای آشکارسازی ناهنجاری به کار گرفته شد. در پیاده‌سازی اول، از تصویر شهر Cooke برای ارزیابی سطوح استناری مربوط به اهداف واقعی زیر پیکسلی استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود یک دسته از اهداف واقعی موجود در تصویر (پارچه یا نایلون)، نزدیک به هم واقع شده‌اند و با توجه به اینکه اهداف مورد نظر در یک پس‌زمینه همگن (چمنزار) قرار داده شده‌اند، می‌توان مشخصات پس‌زمینه اطراف همه اهداف را یکسان فرض کرد و پیکسل‌های شامل اهداف هم‌جنس با ابعاد مختلف را اهداف با سطوح استناری نسبی در نظر گرفت. یعنی تمام سطح پیکسل به عنوان سطح هدف فرضی و سطح استنار نشده آن برابر با سطح هدف واقعی موجود در آن پیکسل در نظر گرفت که با کم شدن مساحت هدف واقعی، در واقع سطح استنار شده پیکسل افزایش یافته و استنار با کیفیت بهتری به دست آمده است. دسته دیگر اهداف که شامل سه خودرو (v1, v2, v3) است، در نقاط مختلف شهر قرار گرفته‌اند. نمایی باینری (با در نظر گرفتن سطح آستانه تطبیقی ۰/۲۵) از نقشه ناهنجاری مربوط به شهر Cooke که با اعمال الگوریتم RX، استخراج شده، در شکل (۴) نشان داده شده.

موقعیت اهداف در این نقشه نیز نشان داده شده است. جدول (۲)، نتایج ارزیابی اثربخشی سطوح استنار را با در نظر گرفتن معیارهای مطرح شده در متن نشان می‌دهد. بررسی نتایج به دست آمده برای اهداف هم‌جنس یعنی هدف F3a با هدف F3b (پارچه آبی) و هدف F4a با F4b (نایلون قرمز) در جدول (۲)، نشان می‌دهد که هر چه طرح استناری بهتر شده (سطح بیشتری از پیکسل استنار شده)، عدد ناهنجاری کوچکتر و به تبع معیارهای ffPR و ffPLR، عدد بزرگتری را به خود نسبت داده‌اند. از آنجایی که پارامتر nId اختلاف سطح با حد آستانه تطبیقی را نشان می‌دهد (عدد صفر، سطح آستانه تطبیقی را مشخص می‌کند)، اعداد منفی نشان می‌دهند که سطح ناهنجاری زیر سطح آستانه است و با بهبود طرح استناری، عدد مربوط به این پارامتر، سیر نزولی خواهد داشت (از سمت مثبت به حد آستانه نزدیک‌تر می‌شود و از سمت منفی از حد آستانه دور‌تر می‌شود).

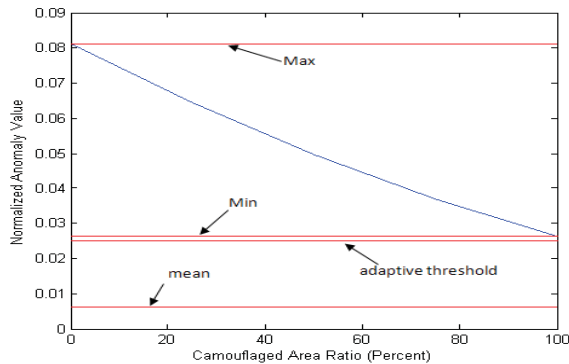


شکل ۴. نقشه ناهنجاری مربوط به شهر Cooke (الگوریتم RX)

مینیمم)، کران‌ها را در ارزیابی مشخص می‌کند.



شکل ۸. نتایج پارامترهای ارزیابی (محور عمودی) مربوط به سطوح مختلف استتاری (محور افقی) هدف FI



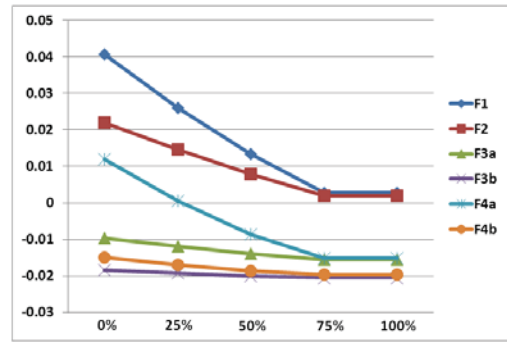
شکل ۹. عدد ناهنجاری (محور عمودی) مربوط به سطوح مختلف استتاری (محور افقی) هدف FI

میانگین ناهنجاری‌ها و سطح آستانه تطبیقی نیز در شکل مشخص شده‌اند تا مقایسه سطح ناهنجاری هدف نسبت به این آستانه‌ها، معیاری شهودی برای ارزیابی باشد.

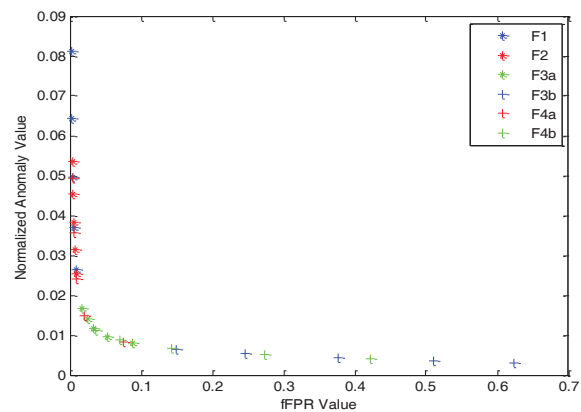
با توجه به سناریوی مطرح شده برای تهیه سطوح مختلف استتاری اهداف زیرپیکسلی واقعی، می‌توان ادعا کرد که تغییرات در سطح اشغال شده توسط طیف هدف مورد نظر، مبنای قرار گرفته است و تغییران عدد ناهنجاری فقط درصد حضور طیف هدف را نشان می‌دهد. حال اگر ناهنجاری پس‌زمینه هدف بیشتر از ناهنجاری هدف باشد با کاهش سهم طیف هدف، درست است که به سطح استتاری بهتری برای هدف می‌رسیم، ولی عدد ناهنجاری بیشتر می‌شود. آنچه که مهم است این که با توجه به سناریوی ایجاد سطوح استتاری، کران‌های تصمیم‌گیری مشخص می‌شوند و دیگر سطوح نسبی استتاری، عددی بین دو کران خواهند داشت.

و اما همان طور که در متن آمده، رعایت انضباط استتار یکی از مواردی است که بایستی در ارزیابی به آن پرداخته شود. ارزیابی محلی (ارزیابی با پس‌زمینه محلی) و مقایسه نتایج، گزینه‌ای است که می‌توان به وسیله آن به تحلیل انضباط استتار پرداخت. با توجه به کاربرد، ممکن است پیش پردازش‌هایی بر روی نقشه ناهنجاری انجام شود و تحلیلی که از معیارهای ارزیابی می‌شود متفاوت باشد.

تعیین شعاع همسایگی برای پس‌زمینه محدود می‌تواند بر حسب رزولوشن مکانی تصویر یا هر قرار داد دیگری انجام شود. در این مقاله برای ارزیابی انضباط استتار، معیارهای ارزیابی با در نظر



شکل ۶. پارامتر nld (محور عمودی)، در مقابل کسر (درصد) استتار شده از پیکسل هدف (محور افقی)



شکل ۷. عدد ناهنجاری (محور عمودی) و پارامتر fFPR محور افقی مربوط به اهداف مختلف موجود در تصویر شهر Cooke

به علت محدودیت‌های مقاله، در اینجا فقط نتایج سطوح استتاری مربوط به هدف FI (پارچه قرمز)، در جدول (۳) آورده شده است. نتایج برای دیگر اهداف نیز مشابه این نتایج است.

جدول ۳. نتایج سطوح استتاری هدف FI

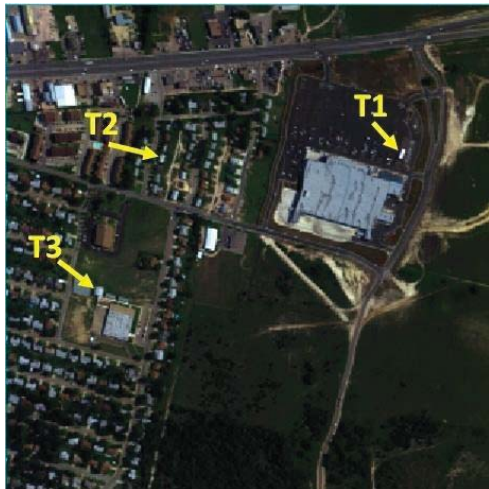
کسر استتار شده (درصد)	عدد ناهنجاری	fFPR	fFPLR	nld
۰	۰/۰۸۱۲	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۵۷۶
۲۵	۰/۰۶۴۴	۰/۰۰۳۰	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۴۰۷
۵۰	۰/۰۴۹۶	۰/۰۰۴۳	۰/۰۰۰۲۷	۰/۰۲۶۰
۷۵	۰/۰۲۶۹	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۱۳۳
۱۰۰	۰/۰۲۶۴	۰/۰۰۸۱	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۰۲۸

در شکل (۸)، معیارهای ارزیابی برای سطوح استتاری هدف FI (پارچه قرمز) نشان داده شده. نتایج به دست آمده در این پیاده‌سازی، نتایجی را که قبل از این در مورد اهداف واقعی بیان شد تأیید می‌کنند. در شکل (۹)، خط آبی رنگ، عدد ناهنجاری را در سطوح مختلف استتاری نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل دیده می‌شود بزرگ‌ترین مقدار (Max)، مربوط به هنگامی است که هدف استتار نشده و کمترین مقدار (Min)، مربوط به هنگامی است که تمام سطح هدف مستتر شده و طیف پیکسل هدف فقط شامل میانگین طیف پیکسل‌های پیرامونی است. این دو عدد (ماکزیمم و

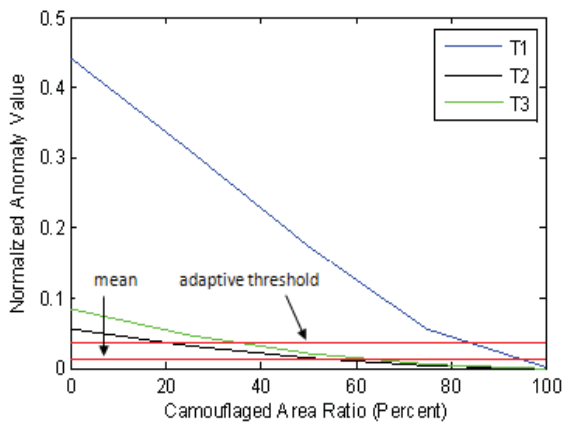


اینکه رزولوشن مکانی این تصویر ابرطیفی ۲ متر است، لذا موقعیت برخی از اهداف به صورت دیداری مشخص است و می‌توان آنها را به عنوان اهداف واقعی با ابعاد کامل (چند پیکسلی) در نظر گرفت. در ضمن می‌توان از طیف پیکسل میانی اهداف چند پیکسلی که اثر پس‌زمینه بر روی آن کمتر است و تا حدود زیادی به طیف هدف مورد نظر نزدیک است، برای کاشت اهداف مصنوعی استفاده کرد.

در یک پیاده‌سازی، برای سه هدف چند پیکسلی (T1, T2, T3) مشخص شده در شکل (۱۰)، سطوح استتاری مختلف ایجاد شد. با توجه به اینکه این اهداف، اهداف واقعی چند پیکسلی موجود در تصویر هستند، بنابر این طیف پیکسل‌های هدف برحسب فاصله تا مرکز هدف، از پس‌زمینه پیرامونی تأثیر متفاوتی می‌پذیرند. برای هر پیکسل، میانگین طیف پیکسل‌های پس‌زمینه اطراف همان پیکسل مبنای استتار ایده‌آل در نظر گرفته شد و طبق فرضیه اختلاط خطی طیفی مواد، با ترکیب میانگین طیفی پس‌زمینه پیرامونی با طیف پیکسل مورد نظر (با درصد‌های مختلف)، سطوح نسبی استتاری ایجاد شدند. برای هر سطح استتاری، ناهنجارترین پیکسل هدف مورد نظر مبنای ارزیابی قرار داده شد. شکل (۱۱) و شکل (۱۲) نتایج به دست آمده را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰. موقعیت اهداف واقعی موجود در تصویر پنکروماتیک از منطقه شهری در تگزاس



شکل ۱۱. عددناهنجاری (محور عمودی) مربوط به سطوح استتاری (محور افقی) اهداف واقعی چند پیکسلی در تصویر منطقه شهری در تگزاس

گرفتن یک پس‌زمینه محدود با شعاع همسایگی ۲۵ پیکسلی برای اهداف موجود در تصویر شهر Cooke محاسبه شدند. جدول (۴) نتایج به دست آمده برای اهداف مختلف را نشان می‌دهد.

یک تفسیر می‌تواند این باشد که اگر در اطراف هدف مورد نظر، هشدارهای اشتباه بیشتر با اختلاف عدد ناهنجاری بالاتر نسبت به هدف قرار داشته باشند، غیر عادی بودن (ناهنجار بودن) هدف، کمتر مشخص خواهد بود و انضباط استتار بهتر رعایت شده است.

همان‌طور که در شکل (۴) مشهود است، تراکم ناهنجاری‌ها در قسمتی که اهداف دسته اول (پارچه و نایلون) قرار دارند نسبت به قسمتی که خودروها قرار دارند کمتر است.

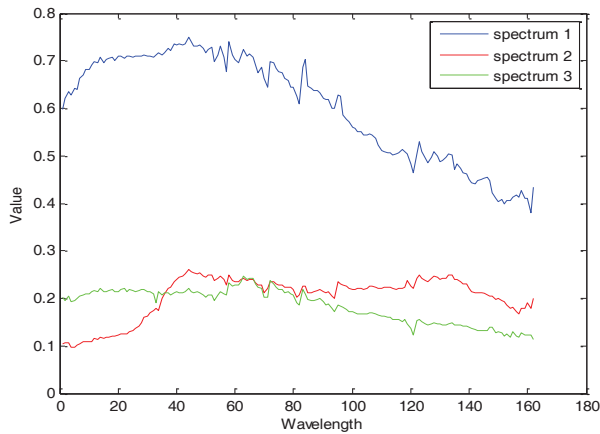
مقایسه نتایج به دست آمده برای دو معیار fFPLR و fFPR در جدول (۲)، نشان می‌دهد که در نگاه کلی یعنی وقتی تمام تصویر به عنوان پس‌زمینه در نظر گرفته شده، این دو معیار برای اهداف خودرویی در مقایسه با اهداف دیگر، مقدار بیشتری را به خود نسبت داده‌اند که این نشان دهنده استتار بهتر اهداف خودرویی است. در جدول (۴) که ارزیابی محلی صورت گرفته، در مقایسه با جدول (۲)، فاصله مقادیر این معیارها برای اهداف خودرویی نسبت به دیگر اهداف، بیشتر است و این تأییدی است به تراکم بیشتر ناهنجاری‌ها در اطراف اهداف خودرویی. در مجموع، با مقایسه نتایج همه معیارهای ارزیابی، می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که به لحاظ انضباط استتار، اهداف خودرویی نسبت به اهداف دسته اول (پارچه و نایلون) در موقعیت مکانی بهتری قرار گرفته‌اند.

جدول ۴. نتایج استخراج شده از نقشه ناهنجاری برای اهداف مختلف - پس‌زمینه محلی شامل همسایگی شعاع ۲۵ پیکسل

هدف	عدد ناهنجاری	fFPR	fFPLR	nld
F1	۰/۳۲۲۲	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۹۲۹	۰/۲۲۳۸
F2	۰/۶۵۳۱	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۴۵	۰/۵۰۳۲
F3a	۰/۱۹۰۱	۰/۰۱۲۳	۰/۰۰۲۱	۰/۰۳۸۷
F3b	۰/۰۶۲۹	۰/۲۶۴۱	۰/۰۱	۰/۰۸۵۷
F4a	۰/۶۰۴۲	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۰۲	۰/۴۵۱۳
F4b	۰/۱۳۱۴	۰/۰۵۵۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۲۶۸
V1	۰/۰۰۸۲	۰/۷۹۳۹	۰/۰۲۲۲	۰/۱۷۱۸
V2	۰/۰۱۱۱	۰/۵۰۲۹	۰/۰۲۲۷	۰/۱۸۶۴
V3	۰/۰۱۲۱	۰/۴۵۰۶	۰/۰۱۲۶	۰/۱۲۴۵

### ۲-۲. تصویر HYDICE

یکی دیگر از داده‌های مورد استفاده، یک تصویر ابرطیفی مربوط به منطقه‌ای شهری در تگزاس است (شکل ۱۰). این تصویر ابرطیفی مربوط به سنجنده هوابرد HYDICE (با ۲۱۰ باند طیفی از ۴۰۰ نانومتر تا ۲۵۰۰ نانومتر) است و اندازه پیکسل زمینی آن ۲ متر است. از تصویر ابرطیفی مربوط به منطقه شهری در تگزاس برای ارزیابی اهداف واقعی با ابعاد کامل و اهداف مصنوعی استفاده شد. با توجه به

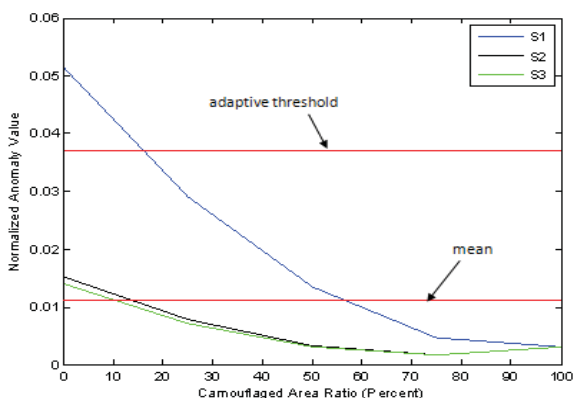


شکل ۱۴. طیف سه هدف انتخابی در طول موج‌های مختلف

شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، معیارهای ارزیابی سطوح استتاری اهداف مصنوعی کاشته شده در محل P1 را نشان می‌دهند (نتایج برای دیگر موقعیت‌های مکانی مشابه هستند).

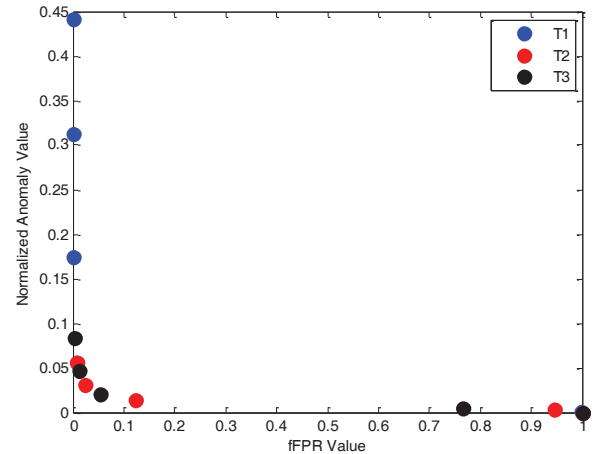
با استفاده از سناریوی کاشت هدف مصنوعی می‌توان دو کاربرد عملی را بررسی کرد: ۱- انتخاب بهترین پوشش از بین پوشش‌های مختلف در اختیار، برای یک مکان خاص، به طوری که کمترین ناهنجاری طیفی (بهترین سطح استتاری) را ایجاد کند. ۲- تعیین بهترین مکان برای استقرار هدفی خاص با طیف مشخص از بین مکان‌های مورد نظر.

از نتایج به‌دست آمده در شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، می‌توان برای کاربرد اول استفاده کرد. در شکل (۱۵) مشخص است که طیف S1، بیشترین ناهنجاری و طیف S3، کمترین ناهنجاری را دارد. بنابراین هدف با طیف S3، در بین سه پوشش مورد نظر، بهترین سطح استتاری را ایجاد کرده است. نتایج نمایش داده شده در شکل (۱۶)، هم نشان می‌دهد که در هر سطح استتاری مشخص، نقاط مربوط به طیف S3، به گوشه سمت راست-پایین نمودار یعنی استتار ایده‌آل، نزدیک‌تر هستند.



شکل ۱۵. عدد ناهنجاری (محور عمودی) مربوط به سطوح مختلف استتاری (محور افقی) برای اهداف مصنوعی در مکان P1

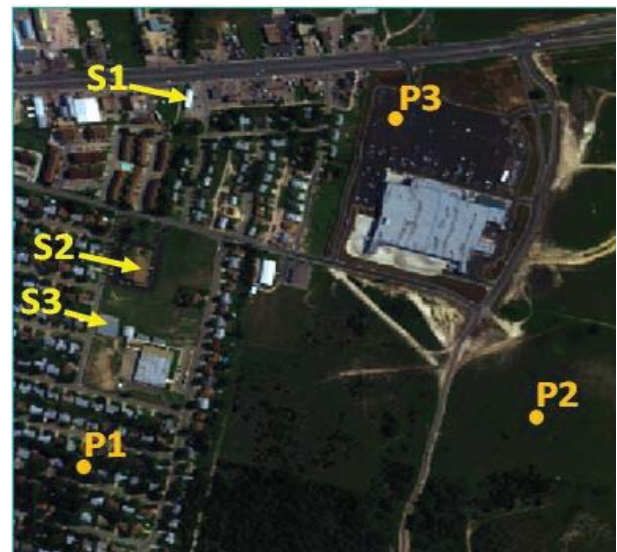
در کاربرد اول، مشخصات طیفی هدف تعیین کننده است و عدد ناهنجاری به‌دست آمده برای اهداف مختلف، مبنای ارزیابی است. در



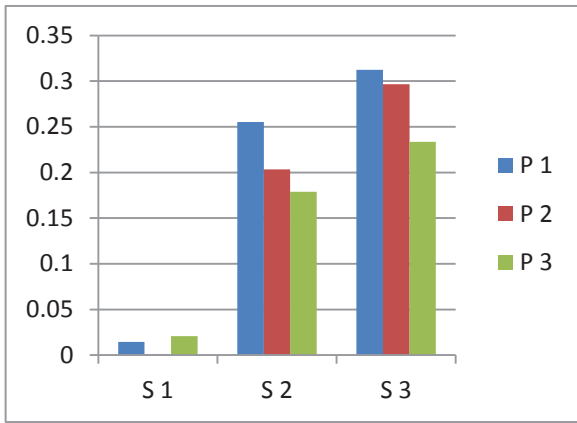
شکل ۱۲. عدد ناهنجاری (محور عمودی) و پارامتر fFPR (محور افقی) مربوط به سطوح مختلف استتاری اهداف واقعی چندپیکسلی در تصویر منطقه شهری در تگزاس

با توجه به نتایج به دست آمده مشخص است که هدف T1 از دو هدف دیگر ناهنجارتر است و هدف T2 در بهترین سطح استتاری قرار دارد. نتایج به دست آمده مشابه آنچه که در مورد اهداف واقعی زیر پیکسلی به دست آمد است.

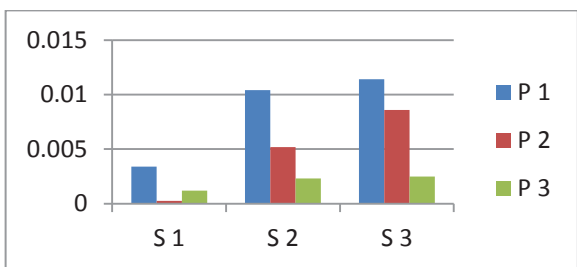
در پیاده‌سازی نهایی این تحقیق، با کاشت اهداف مصنوعی (زیر پیکسلی و ابعاد کامل) به ارزیابی اثربخشی سطوح استتاری پرداخته شد. برای این منظور طیف سه مکان مشخص در تصویر به عنوان طیف اهداف مورد نظر (S1, S2, S3) انتخاب شدند و سه موقعیت برای کاشت سطوح استتاری نسبی مشخص از این اهداف (P1, P2, P3) برگزیده شدند (شکل ۱۳). شکل (۱۴) بردار طیفی طیف‌های برگزیده را نشان می‌دهد. مشخص است که نتایجی که برای طیف S1 به دست خواهد آمد متمایز از دو طیف دیگر خواهد بود چرا که دامنه آن در طول موج‌های مختلف خیلی متفاوت‌تر از دامنه دو طیف دیگر است.



شکل ۱۳. موقعیت اهداف مصنوعی کاشته شده در تصویر پنکروماتیک از منطقه شهری در تگزاس

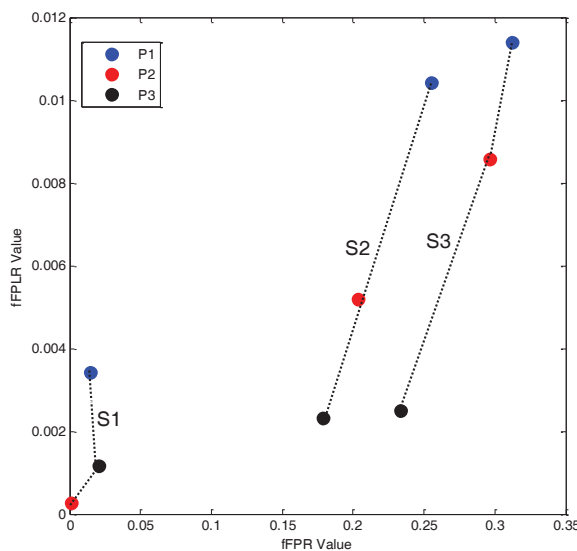


شکل ۱۸. پارامتر fFPR (محور عمودی)، مربوط به اهداف با طیف‌های مختلف در موقعیت‌های مکانی مختلف - پس‌زمینه محلی به شعاع پیرامونی ۲۵ پیکسل



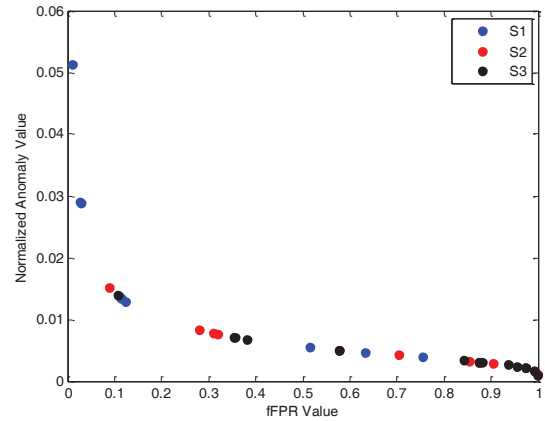
شکل ۱۹. پارامتر fFPLR (محور عمودی)، مربوط به اهداف با طیف‌های مختلف در موقعیت‌های مکانی مختلف - پس‌زمینه محلی به شعاع پیرامونی ۲۵ پیکسل

نکته قابل توجه این‌که، در تصویر ابرطیفی مورد مطالعه، اختلاف تراکم ناهنجاری‌ها خیلی کم است و همین باعث شده که نتایج نزدیک به هم باشند. در خیلی از کاربردهای عملی همانند تصویر ابرطیفی شهر Cooke، اختلاف تراکم و مجموع سطوح ناهنجاری در پس‌زمینه‌های محلی مختلف تفاوت چشمگیر دارند (شکل (۴)).



شکل ۲۰. نمودار ارزیابی انضباط استنار در پس‌زمینه‌های محلی مختلف

کاربر دوم بایستی مشخصات طیفی پس‌زمینه محلی و منطقه‌ای که هدف در آن قرار می‌گیرد مورد ارزیابی قرار بگیرد و در واقع، انضباط استنار بررسی می‌شود. برای این منظور در یک پس‌زمینه محلی (با شعاع ۲۵ پیکسل به مرکزیت هدف)، معیارهای ارزیابی استخراج شدند.



شکل ۱۶. عدد ناهنجاری (محور عمودی) و پارامتر fFPR (محور افقی) مربوط به سطوح استناری اهداف مصنوعی در مکان P1

شکل (۱۷) محدوده پس‌زمینه محلی را برای اهداف مختلف نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده از ارزیابی محلی (شعاع همسایگی ۲۵ پیکسل) در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نمایش داده شده در نمودار شکل (۲۰) نیز نتایج ارزیابی به صورت دو بعدی ترسیم شده. نتایج نشان می‌دهند که طیف‌های S1 و S2، در موقعیت P1، که بیشترین تراکم (معیار fFPR) و مجموع سطوح هشدار اشتباه (معیار fFPLR) را در بین پس‌زمینه‌های مورد مطالعه دارند، از بیشترین سطح انضباط استنار برخوردار هستند و به تبع در موقعیت P3، کمترین سطح استنار را دارند. طیف S1 نیز مشخص است که در موقعیت P2 کمترین انضباط استنار را دارد ولی بسته به این که کدام یک از دو معیار fFPR و fFPLR مهم‌تر است، یکی از موقعیت‌های P3 یا P1، بهترین مکان برای استقرار هدف استناری خواهد بود.



شکل ۱۷. محدوده پس‌زمینه محلی برای اهداف مختلف در تصویر مربوط به منطقه‌ای در شهر تگزاس

## ۴. نتیجه گیری

در این مقاله با ایجاد سطوح استتاری نسبی برای اهداف واقعی و مصنوعی در تصاویر ابرطیفی و معرفی معیارهای کارا برای تفکیک این سطوح استتاری، امکان ارزیابی اثربخشی طرح‌های استتاری از منظر ویژگی ناهنجاری طیفی فراهم شد. روش ایجاد سطوح استتاری مبتنی بر مدل ریاضی الگوریتم‌های آشکارساز ناهنجاری است. بنابراین سطوح استتاری ایجاد شده می‌تواند مبنایی برای مقایسه نتایج فرآیند ارزیابی قرار گیرد. در اختیار داشتن معیارهای ارزیابی کارآمد، در فرآیند ارزیابی بسیار تعیین کننده است. در این مقاله چهار معیار برای ارزیابی سطوح استتاری پیشنهاد شدند. معیار اول، عدد ناهنجاری (نرمالیزه شده) پیکسل است که معیار ارزیابی اهداف در مقایسه با پس‌زمینه مشترک است. معیار دوم، کمترین نرخ هشدار اشتباه (fFPR)، برای لحاظ کردن نقش الگوریتم آشکارساز ناهنجاری ارائه شده است. معیار سوم، با عنوان کمترین نرخ مجموع سطوح هشدار اشتباه (fFPLR)، معیاری برای در نظر گرفتن نقش هشدارهای اشتباه موجود در پس‌زمینه (درهم برهمی‌ها) پیشنهاد شده است. معیار چهارم، فاصله سطوح ناهنجاری تا حد آستانه تطبیقی (nld) است که معیار شهودی برای سنجش سطوح استتار را در اختیار می‌گذارد.

در پیاده‌سازی نرم افزاری، با استفاده از دو تصویر ابرطیفی، سطوح استتاری برای اهداف واقعی و مصنوعی شبیه‌سازی شد. ارزیابی این سطوح دشواری، نشان داد که با افزایش میزان استتار هدف، عدد ناهنجاری کاهش یافته، فاصله این عدد تا حد آستانه تطبیقی (معیار nld) سیر نزولی داشته و در مقابل، دو معیار fFPR و fFPLR افزایش یافته‌اند. مقایسه نتایج به دست آمده در پیاده‌سازی‌های انجام شده کارآمدی معیارهای پیشنهادی را تأیید می‌کند.

در این مقاله از تصاویر ابرطیفی استفاده شد و چون این تصاویر توان تفکیک طیفی بالایی دارند، ارزیابی اثربخشی طرح استتاری از منظر ویژگی ناهنجاری طیفی صورت گرفت اما اگر تصاویر با رزولوشن مکانی مناسب در دسترس باشند می‌توان اقدامات استتاری را از منظر ویژگی‌های مکانی نظیر بافت مورد سنجش قرار داد و با تلفیق نتایج به دست آمده از منظر ویژگی‌های مختلف به نتایج بهتری رسید. در تحقیق بعدی ارزیابی اثربخشی طرح‌های استتاری از منظر ویژگی‌های مکانی انجام خواهد شد.

## ۶. مراجع

- Review"; Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform. 2012,14, 112-128.
- [5] Khazai, S.; Homayouni, S.; Safari, A. "Hyperspectral Imagery and CC&D Considerations Against its Threats."; J. Adv. Defence Sci. & Tech. 2010, 2, 63-74 (In Persian).
- [6] Soliman, N. A.; "Hyperspectral-Augmented Target Tracking"; Air Force Inst. of Tech. Wright-Patterson AFB OH School of Engineering and Management; 2008.
- [7] Basener, W. F.; Nance, E.; Kerekes, J. "The Target Implant Method for Predicting Target Difficulty and Detector Performance in Hyperspectral Imagery"; SPIE, 2011, 8048-80481H.
- [8] Khazai, S.; Homayouni, S.; Safari, A.; Mojaradi, B. " Anomaly detection in hyperspectral images based on an adaptive support vector method"; IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 2011, 8, 646-650.
- [9] Plaza, A.; Benediktsson, J. A.; Boardman, J. W.; Brazile, J.; Bruzzone, L.; Camps-Valls, G.; ... & Trianni, G.; " Recent advances in techniques for hyperspectral image processing"; Remote sensing of environment; 2009.; 113; S110-S122.
- [10] Ientilucci, Emmett J.; Stefania Matteoli, S.; Kerekes, J. P. "Tracking of Vehicles Across Multiple Radiance and Reflectance Hyperspectral Datasets"; In SPIE Defense, Security, and Sensing, pp. 73340A-73340A. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [11] Baghbidi, M. Z.; Jamshidi, K.; Naghsh Nilchi, A. R.; Homayouni, S "Improvement of Anomoly Detection Algorithms in Hyperspectral Images Using FFT"; Modeling and Simulation in Electrical and Electronics Engineering 2015, 1, 89-95.
- [12] Rosario, D. S. "Algorithm Development for Hyperspectral Anomaly Detection"; Ph.D. Dissertation, University of Maryland; 2008.
- [13] Khazai, S.; Homayouni, S.; Safari, A. "Detection of Difficult Anomalies in Hyperspectral Images"; J. Geomatics Sci. Tech. 2011, 1, 103-111 (In Persian).
- [1] Khazai, S. "Fundamentals of Remote Sensing with a View to Identifying and Care"; Imam Hossein University, 2009.
- [2] Sedaghat, A.; Dehghani, H. "An Efficient Camouflage Assessment Approach for Remote Sensing Images"; J. Advanced Defence Sci. & Tech. 2011; 4, 295-306 (In Persian).
- [3] Chang, C. I. "Hyperspectral data exploitation: theory and applications"; John Wiley & Sons; 2007.
- [4] Van der Meer, F. D.; Van der Werff, H. M.; Van Ruitenbeek, F. J.; Hecker, C. A.; Bakker, W. H.; Noomen, M. F.; Woldai, T. "Multi-and Hyperspectral Geologic Remote Sensing: A