

## بررسی پارامترهای تأثیرگذار لیزر دوم برای فریب جستجوگر لیزری آشیانه یاب

عبدالله اسلامی مجد<sup>۱\*</sup>، احمد ناصری<sup>۲</sup>، حسن آدمی نژاد<sup>۳</sup>

۱- استادیار، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۲- دانشجوی دکتری فیزیک، موسسه آموزشی و تحقیقاتی صنایع دفاعی (دریافت: ۹۷/۰۳/۲۳، پذیرش: ۹۷/۰۸/۰۹)

### چکیده

هدایت لیزری، یکی از روش‌های متداول در هدایت تسلیحات است. این روش به دلیل دقت بالا و امکان نقطه‌زنی، به‌طور وسیعی در جنگ‌های نوین مورد استفاده قرار می‌گیرد. قسمت اصلی این تسلیحات، جستجوگر لیزری آن هست که با توجه به باریکه‌های بازتابی از هدف، هدایت تسلیحات تا اصابت به هدف را بر عهده می‌گیرد. در پدافند این نوع از تسلیحات، لیزر بازتابی دومی برای فریب به‌طرف جستجوگر ارسال می‌شود تا باعث انحراف مسیر تسلیحات از مسیر اصلی به سمت هدف کاذب گردد. در این مقاله برای به‌دست‌آوردن مشخصات لیزر فریب، ابتدا رفتار آشکارساز تسلیحات جستجوگر لیزری شبیه‌سازی شد. سپس سامانه آزمونگر آشکارساز، طراحی و پیاده‌سازی گردید. بر اساس شبیه‌سازی و آزمون‌های انجام‌شده، اطلاعاتی در مورد ابعاد توان و زمان ارسال باریکه لیزر فریب به‌دست آمد و مشخص شد که تغییر ابعاد باریکه لیزر فریب نسبت به باریکه اصلی هیچ تأثیری بر عملکرد آشکارساز ندارد و برای فریب آشکارساز تسلیحات هدایت‌شونده لیزری، تنها توان باریکه لیزر فریب را نسبت به باریکه لیزر اصلی باید افزایش داد. از طرف دیگر هرچه ارسال باریکه لیزر فریب در مراحل ابتدایی حمله صورت گیرد، احتمال موفقیت عملیات فریب بیشتر است. در حالتی که توان باریکه اصلی و فریب برابر باشد، انحراف کلی آشکارساز به‌اندازه متوسط انحراف هر یک از باریکه‌ها بستگی دارد. اگر نسبت توان باریکه فریب به باریکه اصلی از سه برابر بیشتر باشد، آشکارساز بیشتر تحت تأثیر باریکه فریب عمل می‌کند.

**کلیدواژه‌ها:** پدافند لیزری، تسلیحات جستجوگر لیزری، جستجوگر لیزری، آشکارساز چهارقسمتی، آزمونگر آشکارساز چهارقسمتی

## Investigation of the Effective Parameters of the Second Laser for Deception of Homing Laser Seeker

A. Eslami Majd<sup>\*</sup>, A. Naseri, H. Adami Nejad

Maleke Ashtar University of Technology  
(Received: 13/06/2018; Accepted: 31/10/2018)

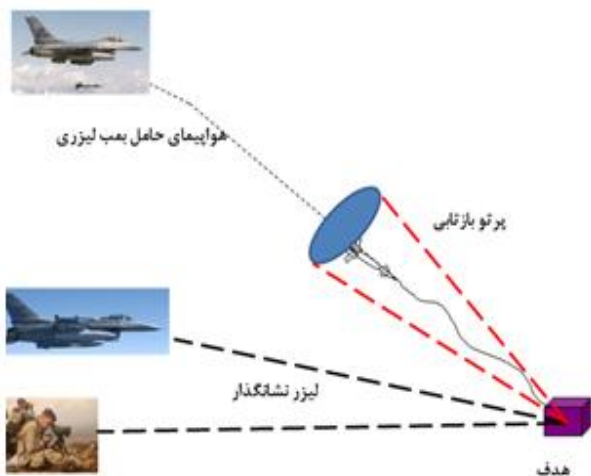
### Abstract

Laser guidance, is one of the most common methods in guided weapons. Due to the high precision of this method and its spot-shaped collision ability, it is widely used in modern warfare. The main part of these weapons is laser seeker, which can guide the weapons to hit the target, based on the beams reflected from it. As a defensive action toward these weapons, and in order to deceive and distract the weapons route from its main paths and orientation toward the false target, a second reflective laser can be used. In this article, in order to achieve the specifications of the deceptive laser, first, the behavior of laser-guided weapons detector is simulated, then the detector testing system is designed and implemented. Based on simulations and tests, information on the dimensions, power, and time of laser beam decoding was obtained as follows. Changing the laser beam's dimensions of deception relative to the main beam has no effect on the detector's performance. To deceive the laser-guided weapon detector, only the laser beam power should increase the deception to the original laser beam. The more the laser beam decrypts in the early stages of the attack, the more likely it is to deception the operation. In the case where the power of the main beam and the deception beam is equal, the total deviation of the detector depends on the average deviation of each of the beams. If the laser beam's ratio of deception to the original laser beam is tripled, the detector will be more affected by the deception laser.

**Keywords:** Laser Defense, Laser-Guided Weapons, Laser Seeker, Quadrant Detector, Quadrant Detector Tester

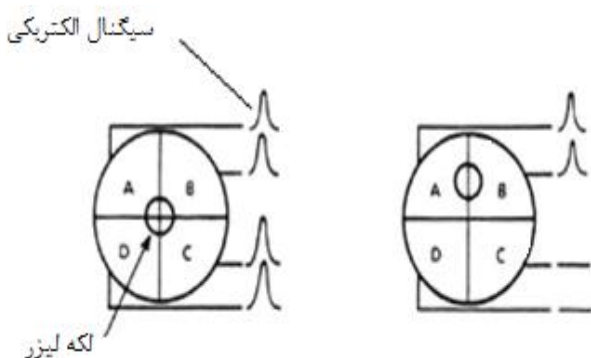
\*Corresponding Author E-mail: a\_eslamimajd@mut-es.ac.ir

به خود را دارد و با قسمت دیگر در ارتباط هست. سامانه جستجوگر به وسیله لیزر بازتابی از هدف، موقعیت هدف را شناسایی کرده و فرمان‌های لازم را به قسمت کنترل پرواز ارسال می‌کند، قسمت کنترل پرواز هم هدایت مسیر تسلیحات تا اصابت به هدف را بر عهده دارد [۳ و ۴].



شکل ۱. ساختار کلی هدایت لیزری تسلیحات [۲].

جستجوگر لیزری مهم‌ترین قسمت تسلیحات هدایت‌شونده لیزری هست که از دو بخش آشکارساز چهارقسمتی<sup>۸</sup> و اپتیک تشکیل شده است [۵]. آشکارساز جستجوگر لیزری معمولاً از نوع آشکارساز چهارقسمتی است که پیام‌های مکانی هدف را پیدا می‌کند. شیوه کار به این صورت است که نور بازتابی از هدف، پس از عبور از سامانه اپتیکی، روی آشکارساز متمرکز می‌شود. هر قسمت از آشکارساز چهارقسمتی بر اساس لکه‌ای که روی آن تشکیل می‌شود، همانند شکل (۲)، سیگنال الکتریکی ایجاد می‌کند.



شکل ۲. سیگنال الکتریکی هر قسمت آشکارساز چهارقسمتی متناسب با موقعیت لکه [۵].

## ۱. مقدمه

یکی از روش‌های هدایت تسلیحات، روش هدایت سرخود نیمه فعال (آشپانه یاب)<sup>۱</sup> لیزری هست. در این نوع هدایت از نشان‌گذارهای لیزری همراه با مهمات هدایت‌شونده لیزری (LGW)<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. باریکه‌های لیزری توسط نشان‌گذار مستقر در یک ایستگاه زمینی (LDO)<sup>۳</sup> یا هواپیما (ALD)<sup>۴</sup> به هدف تابانده می‌شوند؛ این عمل را اصطلاحاً روشن‌شدن هدف توسط باریکه لیزری می‌گویند [۱]. جستجوگر لیزری تسلیحات با توجه به پرتوهای بازتابی از هدف، عمل ردیابی را انجام می‌دهد، ساختار کلی جستجوگر لیزری تسلیحات در شکل (۱) نشان داده شده است [۲]. اگر جستجوگر در میدان دید پرتوهای بازتابی از هدف قرار گیرد، توسط زیرسامانه کنترلی که در داخل تسلیحات قرار دارد، جهت خود را به طرف مرکز پراکندگی که همان هدف است، هدایت می‌کند. از آنجاکه واگرایی لیزر بسیار کم هست، قطر لکه روشن‌شده که مرکز پراکندگی هست بسیار کوچک بوده و تسلیحات با دقت بسیار بالایی به هدف برخورد خواهد کرد. پس از شلیک تسلیحات نیز تابش لیزر بر روی هدف باعث می‌شود تا آشکارساز جستجوگر لیزری<sup>۵</sup>، باریکه بازتاب‌شده از هدف را جستجو کرده و مسیر تسلیحات را جهت اصابت به هدف تصحیح نماید. معمولاً باریکه‌های لیزری ارسال در محدوده نزدیک مادون‌قرمز بوده و به صورت پالسی ارسال می‌شود. برای آنکه که در میدان نبرد سلاح‌ها بتوانند اهدافی که برای آن‌ها مشخص شده‌اند را تشخیص دهند، باریکه‌های لیزری ارسال شده به سمت هدف دارای رمز مشخصی می‌باشند. این رمزبندی<sup>۶</sup> معمولاً به صورت فرکانس تکرار (PRF)<sup>۷</sup> انجام می‌شود و سلاح نیز از این رمز مطلع بوده و آن را جستجو می‌کند [۱]. یکی از روش‌های جدید در پدافند مقابل این نوع از تسلیحات استفاده از یک لیزر دوم جهت فریب و انحراف آن‌ها از مسیر اصلی به سمت یک هدف کاذب هست. در این پژوهش، هدف به دست آوردن پارامترهای لیزر دوم برای فریب جستجوگر تسلیحات لیزری سرخود نیمه فعال هست.

### ۱-۱. اجزاء تسلیحات جستجوگر لیزری

هدایت این نوع از تسلیحات از دو قسمت اصلی جستجوگر و کنترل پرواز تشکیل شده است. هرکدام از آن‌ها وظیفه مخصوص

<sup>1</sup> Homing

<sup>2</sup> Laser Guided Weapon

<sup>3</sup> Laser Designator Operator

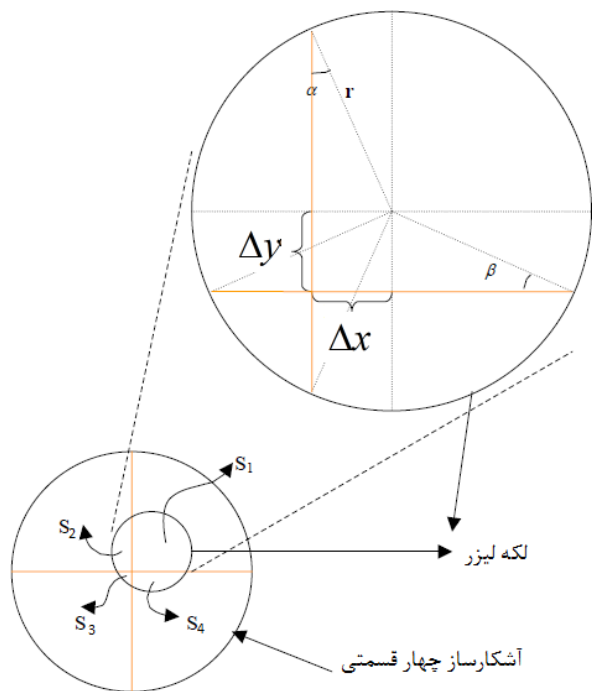
<sup>4</sup> Airborne Laser Designator

<sup>5</sup> Laser Seeker Detector

<sup>6</sup> Coding

<sup>7</sup> Pulse Repetition Frequency

<sup>8</sup> Quadrant Detector



شکل ۴. طرحواره قرارگیری لکه لیزر بر روی آشکارساز [۱۲].

$$S_1 = \pi \frac{r^2}{4} + \frac{r^2}{2} \arcsin(\Delta x / r) + \frac{\Delta x}{2} \sqrt{r^2 - \Delta x^2} + \frac{r^2}{2} \arcsin(\Delta y / r) + \frac{\Delta y}{2} \sqrt{r^2 - \Delta y^2} + \Delta x \Delta y \quad (3)$$

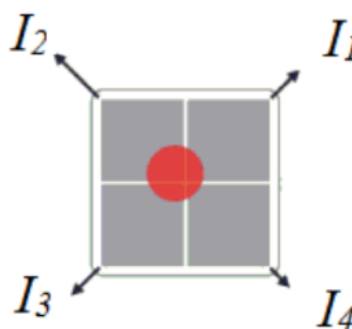
$$S_2 = \pi \frac{r^2}{4} - \frac{r^2}{2} \arcsin(\Delta x / r) - \frac{\Delta x}{2} \sqrt{r^2 - \Delta x^2} + \frac{r^2}{2} \arcsin(\Delta y / r) + \frac{\Delta y}{2} \sqrt{r^2 - \Delta y^2} - \Delta x \Delta y \quad (4)$$

$$S_3 = \pi \frac{r^2}{4} - \frac{r^2}{2} \arcsin(\Delta x / r) - \frac{\Delta x}{2} \sqrt{r^2 - \Delta x^2} - \frac{r^2}{2} \arcsin(\Delta y / r) - \frac{\Delta y}{2} \sqrt{r^2 - \Delta y^2} + \Delta x \Delta y \quad (5)$$

$$S_4 = \pi \frac{r^2}{4} + \frac{r^2}{2} \arcsin(\Delta x / r) + \frac{\Delta x}{2} \sqrt{r^2 - \Delta x^2} - \frac{r^2}{2} \arcsin(\Delta y / r) - \frac{\Delta y}{2} \sqrt{r^2 - \Delta y^2} - \Delta x \Delta y \quad (6)$$

در این روابط،  $r$  شعاع لکه لیزری،  $\Delta x$  موقعیت مرکز لکه در محور  $x$ ،  $\Delta y$  موقعیت مرکز لکه در محور  $y$ ،  $S_1$  مساحت لکه در قسمت اول،  $S_2$  مساحت لکه در قسمت دوم،  $S_3$  مساحت لکه در قسمت سوم و  $S_4$  مساحت لکه در قسمت چهارم است. مساحت‌های

با مقایسه خروجی هر چهار قسمت آشکارساز، محل قرارگیری لکه روی آرایه مشخص می‌شود و بر اساس آن سیگنال هدایت ارسال می‌گردد [۶]. حال اگر الگوریتم پردازشی مناسب روی چهار سیگنال خروجی صورت گیرد، می‌توان میزان انحراف باریکه در دو جهت افقی و عمودی را با دقت خوبی به دست آورد. اگر آشکارساز به صورت شکل (۳) در نظر گرفته شود، مقدار انحراف مرکز آشکارساز در جهت  $x$  و  $y$  به ترتیب از روابط زیر به دست می‌آید [۷-۹]:



شکل ۳. جریان خروجی آشکارساز چهار قسمتی.

$$\Delta x = K \frac{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (1)$$

$$\Delta y = K \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (2)$$

در این روابط،  $\Delta x$  و  $\Delta y$  انحراف مرکز آشکارساز در محور  $x$  و  $y$ ،  $I_1$  تا  $I_4$  به ترتیب جریان‌های خروجی از هر چهار قسمت و  $K$  که به ضریب شیب موسوم است، متناسب با شعاع لکه  $r$  و برابر با  $\frac{4}{\pi}$  هست [۸-۱۰]. با توجه به شکل (۴)، در هر یک از قسمت‌های چهارگانه آشکارساز، همپوشانی متفاوتی بین لکه لیزر دایره‌ای با سطح آشکارساز ایجاد می‌شود. مقدار این همپوشانی به موقعیت مکانی مرکز لکه لیزر نسبت به مرکز آشکارساز بستگی داشته و می‌توان با فرض یکنواخت بودن توزیع شدت لکه روی آشکارساز، مساحت هر بخش از لکه را که در هر قسمت آشکارساز قرار دارد، با سیگنال الکتریکی آن قسمت معادل در نظر گرفت. لذا می‌توان مساحت هر یک از این بخش‌ها را به کمک رابطه‌های (۳-۶) به دست آورد. لازم به ذکر است این روابط با توجه به شکل (۴) با محاسبه مساحت هر بخش از لکه روی هر قسمت آشکارساز به دست آمده است [۱۱].

از روابط (۹) و (۱۰) می توان نتیجه گرفت که رابطه میان سیگنال  $u_x$  و  $u_y$  با موقعیت لکه یعنی  $\Delta x$  و  $\Delta y$ ، رابطه ای غیرخطی است، بیشینه محدوده تغییرات  $\Delta x$  و  $\Delta y$  برابر با شعاع لکه لیزر است (بر این اساس آشکارساز را در فاصله معینی از عدسی سامانه اپتیکی قرار می دهند تا شعاع لکه ایجاد شده روی آشکارساز نصف شعاع خود آشکارساز باشد)، اگر جابجایی های  $\Delta x$  و  $\Delta y$  نسبت به شعاع لکه لیزر  $r$  خیلی کوچک باشند، می توان روابط فوق را با تقریب خوبی خطی فرض کرد و برای محاسبه ضریب شیب در این نوع از آشکارساز چهارقسمتی کافی است از رابطه اصلی نسبت به  $\Delta x$  مشتق گرفته و مقدار آن را در نقطه  $\Delta x=0$  به دست آورد. این مقدار برابر شیب رابطه ای است که با معکوس کردن آن، می توان به کمیت ضریب شیب رسید [۱۱]:

$$\frac{du_x}{d(\Delta x)} = \frac{4}{\pi r} \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta x}{r}\right)^2} \quad (11)$$

$$\frac{du_x}{d(\Delta x)} (\Delta x = 0) = \frac{4}{\pi r} = \frac{8}{\pi d} \quad (d = 2r) \quad (12)$$

$$K = \frac{8}{\pi d} \quad (13)$$

با توجه به مطالب فوق، می توان به این نتیجه رسید که چون کمیت ضریب شیب مقدار ثابتی است، با توجه به رابطه (۹) و (۱۰)،  $\Delta x$  و  $\Delta y$  فقط در محدوده ای که در آن  $u_x$  و  $u_y$  خطی هستند، مقدار دقیقی از مختصات لکه روی آشکارساز را مشخص می کنند و در خارج این محدوده این مقدار با خطا همراه است. در تسلیحات جستجوگر لیزری، شیب ناحیه خطی را در ضریب شیب در نظر می گیرند تا هدایت در نزدیکی هدف با دقت بالایی صورت گیرد؛ بنابراین در شبیه سازی صورت گرفته مقدار  $K$  برابر با رابطه (۱۳) در نظر گرفته می شود.

## ۲-۱. مبانی سامانه های هشداردهنده و فریب

تسلیحات لیزری به دلیل دقت بالا و امکان نقطه زنی، به طور وسیعی در جنگ های نوین مورد استفاده قرار می گیرند. توسعه این تسلیحات نیز باعث شده است که پدافند در مقابل این تسلیحات نیز روز به روز اهمیت پیدا کند. بر این اساس سامانه های هشداردهنده جهت کشف تهدیدات لیزری در محل هدف مستقر و در سطوح مختلف اقدام به پدافند در مقابل این تهدیدات می نمایند. یکی از سطوح پدافندی اختلال در هدایت این تسلیحات با قطع مسیر لیزر روشن کننده هدف به وسیله ایجاد پرده دود و در نتیجه سرگردان ماندن تسلیحات هدایت شونده است. در سطح بعدی با روشن سازی یک هدف کاذب توسط لیزر فریب یا

به دست آمده از هر قسمت معادل جریان الکتریکی آن قسمت در نظر گرفته می شود. در ادامه  $u_x$  را سیگنال پردازشی به دست آمده در محور  $x$  و  $u_y$  را سیگنال پردازشی به دست آمده در محور  $y$  در نظر گرفته و با روابط (۷) و (۸) به دست خواهند آمد [۱۱]:

$$u_x = \frac{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (7)$$

$$u_y = \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (8)$$

پس از طی چند مرحله محاسبه، روابط نهایی بین مرکز لکه و سیگنال پردازشی به دست آمده در دو بعد مختلف به صورت (۹) و (۱۰) به دست می آید [۱۳]:

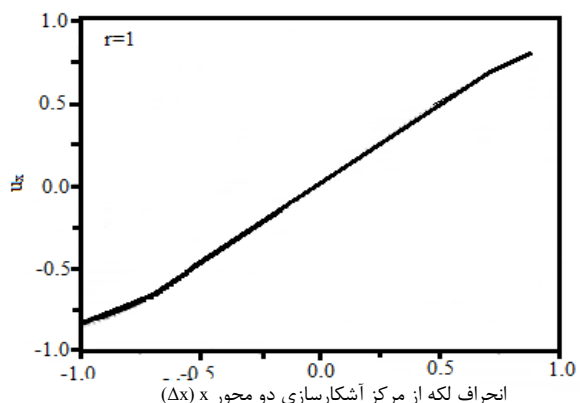
$$u_x = \frac{(I_1 + I_4) - (I_2 + I_3)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = \frac{(S_1 + S_4) - (S_2 + S_3)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (9)$$

$$= \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{\Delta x}{r}\right) + \frac{2}{\pi} \left(\frac{\Delta x}{r}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta x}{r}\right)^2}$$

$$u_y = \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} = \frac{(S_1 + S_2) - (S_4 + S_3)}{S_1 + S_2 + S_3 + S_4} \quad (10)$$

$$= \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{\Delta y}{r}\right) + \frac{2}{\pi} \left(\frac{\Delta y}{r}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta y}{r}\right)^2}$$

از سیگنال های پردازشی در جهت به دست آوردن رابطه  $K$  استفاده می شود. نمودار نشان داده شده در شکل ۵ نحوه تغییرات  $u_x$  بر حسب  $\Delta x$  را نشان می دهد [۱۴]. همان طور که از شکل (۵) مشخص است، اگر محدوده تغییرات  $\Delta x$  نسبت به شعاع لکه لیزری کوچک باشد  $\frac{\Delta x}{r} \rightarrow 0$  رابطه با تقریب خوبی خطی است. این نشان می دهد که هر چه لکه لیزری از مرکز آشکارساز فاصله می گیرد، حالت غیرخطی سیگنال خروجی افزایش می یابد و این باعث پایین آمدن دقت اندازه گیری در این محدوده ها می شود.



شکل ۵. نمودار تغییرات  $u_x$  بر حسب جابجایی  $x$  [۱۴].

صورت گرفته، با وارد کردن دو لکه در مختصات دلخواه روی آشکارساز چهار قسمت، میزان انحراف مرکز آشکارساز به دست می‌آید. همچنین می‌توان با تغییر دادن توان و ابعاد دو لکه نسبت به هم تغییرات انحراف مرکز آشکارساز را در حالت‌های مختلف بررسی کرد و حالت‌هایی را که لکه دوم باعث انحراف مرکز آشکارساز از مرکز لکه اصلی می‌شود را به دست آورد.

## ۲-۱. حالت‌های مختلف بین لکه‌ها

با شبیه‌سازی انجام شده می‌توان میزان انحراف مرکز آشکارساز را در حالت لکه واحد و دو لکه، با اعمال تغییرات در انرژی لکه‌ها و ابعاد لکه‌ها نسبت به هم به دست آورد؛ بنابراین، می‌توان حالت‌هایی را که امکان غالب شدن اثر لکه فریب به لکه اصلی را فراهم می‌کند، در نظر گرفت. فرض می‌شود که روابط (۱۵) و (۱۶)، بین ابعاد و انرژی لکه اصلی و فریب برقرار باشد:

$$A_j = mA_t \quad (15)$$

$$P_j = nP_t \quad (16)$$

که در این روابط  $A_t$  و  $A_j$  به ترتیب ابعاد لکه اصلی و فریب،  $P_t$  و  $P_j$  نیز به ترتیب توان لکه اصلی و فریب رسیده به آشکارساز می‌باشند،  $m$  و  $n$  هم نسبت ابعاد و توان لکه‌ها هستند. چهار حالت مختلف بین دو لکه با توجه به جدول (۱) در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱. چهار حالت مختلف بین لکه اصلی و لکه فریب.

حالت	نسبت توان	نسبت ابعاد	نسبت شدت
حالت اول ( $m=n=1$ )	$P_t = P_j$	$A_t = A_j$	$I_t = I_j$
حالت دوم ( $m=1, n=2$ )	$P_j = 2P_t$	$A_t = A_j$	$I_t \neq I_j$
حالت سوم ( $m=1/2, n=1$ )	$P_t = P_j$	$A_t = 2A_j$	$I_t \neq I_j$
حالت چهارم ( $m=1/2, n=2$ )	$P_t = \frac{1}{2} P_j$	$A_t = 2A_j$	$I_t \neq I_j$

## ۲-۲. موقعیت قرار گرفتن لکه‌ها نسبت به هم در حالت‌های مختلف با توجه به نتایج شبیه‌سازی

در شبیه‌سازی انجام شده، دو لکه را در موقعیت‌های مختلف نسبت به هم قرار داده و میزان تغییر انحراف مرکز آشکارساز، در اثر اضافه شدن لکه دوم، بررسی می‌گردد. شکل (۶)، موقعیت لکه اصلی و فریب را بروی آشکارساز چهار قسمت و تغییرات مرکز آشکارساز در اثر اعمال هم‌زمان دو لکه در حالت‌ها مختلف نشان می‌دهد.

ثانویه، هدایت این تسلیحات را می‌توان بر عهده گرفت. شیوه کار به این صورت است که با تابانده شدن باریکه لیزری بر روی موقعیت حفاظت‌شده، قسمت هشدار آن را شناسایی می‌نماید و مشخصات تهدید لیزری مانند رمز و جهت تابش را استخراج می‌کند و بر اساس آن اقدام لازم برای فریب انجام می‌شود [۱۵]. در بیشتر موارد آشکارساز سامانه هشداردهنده به خاطر ابعاد بزرگ هدف در مسیر اصلی لیزر قرار نمی‌گیرد و در مواردی لیزر بعد از برخورد به هدف به آشکارساز می‌رسد و این تعیین جهت ورودی لیزر را با مشکل روبه‌رو می‌کند و باعث می‌شود که قطع مسیر لیزر با پرده دود با دقت و سرعت بالایی صورت نپذیرد. برای رفع این مشکل می‌توان تعداد هشداردهنده‌ها را افزایش داد تا شاید یکی در مسیر اصلی قرار بگیرد که این هم پیچیدگی‌ها و هزینه خودش را دارد. یکی دیگر از مشکلات هشداردهنده با دود این است که دشمن می‌تواند به راحتی عملیات ضد فریب را انجام دهد، به این صورت که هدف را بدون پرتاب تسلیحات، نشان‌گذاری می‌کند تا سامانه هشداردهنده شروع به کار کند و پرده دودی را ایجاد نماید، در حالی که تسلیحاتی به سمت هدف رها نشده است، در ادامه حمله لیزری اصلی را انجام می‌دهد، در این وضعیت با توجه به زمان بین حمله فریب و حمله اصلی ایجاد دوباره پرده دود برای سامانه به راحتی و با سرعت انجام نخواهد گرفت. در نوع دیگری از سامانه‌های هشدار و فریب، بدون نیاز به قطع مسیر لیزر اصلی با پرده دود، مسیر تسلیحات را با ارسال لیزر دوم به سمت هدف کاذب تغییر می‌دهند. با ارسال لیزر ثانویه از هدف کاذب به سمت تسلیحات، دو لکه لیزر روی آشکارساز چهارقسمتی جستجوگر پدید می‌آید. لکه ثانویه باعث بروز خطا در پیدا کردن خط دید هدف برای جستجوگر می‌شود و اگر شدت لکه لیزر افتاده بروی آشکارساز معادل با رابطه (۱۴) در نظر گرفته شود:

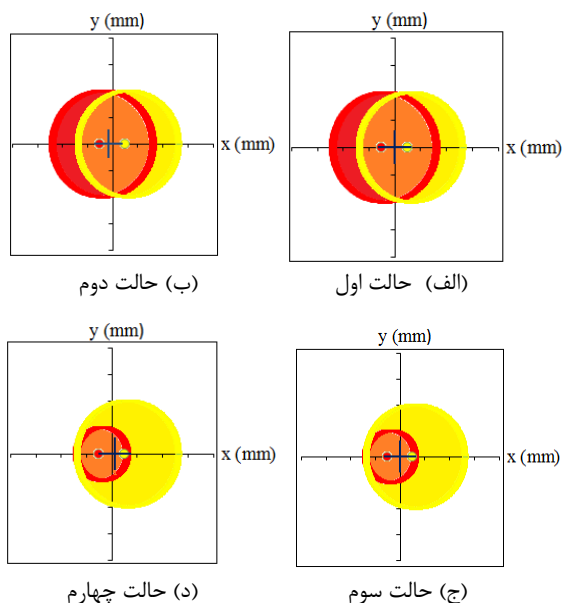
$$I = \frac{P}{A} \quad (14)$$

که در رابطه بالا  $I$  شدت،  $P$  توان و  $A$  ابعاد لکه لیزر ایجاد شده در سطح آشکارساز باشد، می‌توان شدت هر لکه را متناسب با توان و ابعاد لکه در نظر گرفت.

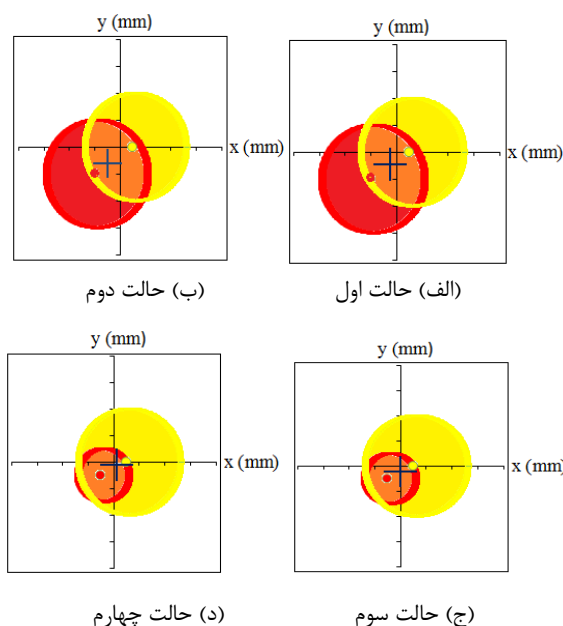
## ۲. شبیه‌سازی پاسخ آشکارساز چهارقسمتی در حضور دو لکه

با استفاده از نرم‌افزار MATLAB، عملکرد آشکارساز چهارقسمتی بر حسب روابط (۱) و (۲) شبیه‌سازی می‌شود. در شبیه‌سازی

ابعادی معادل با لکه اصلی است و طبیعتاً هرچقدر این توان و ابعاد افزایش پیدا کند، انحراف آشکارساز به سمت لکه دوم بیشتر خواهد بود. همچنین هرچقدر مرکز لکه اصلی به مرکز آشکارساز نزدیک نشده باشد، احتمال غالب شدن و در مرکز آشکارساز قرار گرفتن لکه دوم بیشتر است.



شکل ۶. شکل دو لکه روی آشکارساز در حالات مختلف. لکه بارنگ زرد (خاکستری) لکه اصلی و رنگ قرمز رنگ (مشکی) لکه فریب. علامت + میزان انحراف مرکز آشکارساز را نشان می‌دهد.



شکل ۷. شکل دو لکه روی آشکارساز در حالات مختلف لکه رنگ زرد (خاکستری) لکه اصلی و لکه رنگ قرمز (مشکی): لکه فریب. علامت + میزان انحراف مرکز آشکارساز را نشان می‌دهد.

موقعیت لکه اصلی در مختصات (۰ و ۰/۵) و لکه فریب در مختصات (۰ و -۰/۵) قرار دارد. در حالت اول که ابعاد و توان هر دو لکه یکسان هست، انحراف مرکز آشکارساز به اندازه متوسط مرکز هر دو لکه هست که در شکل (۶-الف) نشان داده شده است. در حالت دوم که ابعاد دو لکه یکسان ولی توان لکه فریب دو برابر لکه اصلی هست، همانند شکل (۶-ب)، مرکز آشکارساز به سمت لکه فریب انحراف پیدا می‌کند. در حالت سوم که ابعاد لکه اصلی دو برابر لکه فریب و توان هر دو لکه باهم یکسان است، هنگام اعمال هم‌زمان دو لکه، انحراف مرکز آشکارساز به سمت لکه اصلی همانند (شکل ۶-ج) هست و در حالت چهارم که ابعاد لکه اصلی دو برابر لکه فریب و توان لکه فریب دو برابر لکه اصلی هست، انحراف مرکز آشکارساز به اندازه متوسط مرکز هر دو لکه هست که در شکل (۶-د) نشان داده شده است. با توجه به موقعیت اولیه لکه‌ها در هر چهار حالت، انحراف مرکز آشکارساز از مرکز لکه اصلی، علاوه بر اینکه در هر چهار حالت رخ می‌دهد، در حالت دوم بیشتر از حالت اول و در حالت چهارم بیشتر از حالت سوم صورت می‌گیرد. در شکل (۷)، حالت دیگری از وضعیت لکه‌ها نسبت به هم و انحراف ایجاد شده در مرکز آشکارساز چهار قسمت بررسی شده است. موقعیت لکه اصلی در مختصات (۰ و ۰/۵) و لکه فریب در (-۱ و -۱) قرار دارد، در حالت اول که ابعاد و توان هر دو لکه یکسان هست، انحراف مرکز آشکارساز به اندازه متوسط مرکز هر دو لکه هست که در شکل (۷-الف) نشان داده شده است. در حالت دوم که ابعاد دو لکه یکسان ولی توان لکه فریب دو برابر لکه اصلی هست، همانند شکل (۷-ب)، مرکز آشکارساز بیشتر به سمت لکه فریب انحراف پیدا می‌کند. در حالت سوم که ابعاد لکه اصلی دو برابر لکه فریب و توان هر دو لکه باهم یکسان است، هنگام اعمال هم‌زمان دو لکه، انحراف مرکز آشکارساز در محور x به سمت لکه اصلی و محور y مقداری به سمت لکه فریب همانند شکل (۷-ج) هست و در حالت چهارم که ابعاد لکه اصلی دو برابر لکه فریب و توان لکه فریب دو برابر لکه اصلی هست، انحراف مرکز آشکارساز به اندازه متوسط مرکز هر دو لکه هست که در شکل (۷-د) نشان داده شده است. با توجه به موقعیت اولیه لکه‌ها در هر چهار حالت، انحراف مرکز آشکارساز از مرکز لکه اصلی، علاوه بر اینکه در هر چهار حالت رخ می‌دهد، در حالت دوم بیشتر از حالت اول و در حالت چهارم بیشتر از حالت سوم صورت می‌گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی، می‌توان به این نکته اشاره کرد که حداقل توان و ابعادی که لکه دومی باید داشته باشد تا آشکارساز از مرکز لکه اصلی منحرف نشود، توان و



### ۳. چیدمان آزمایش



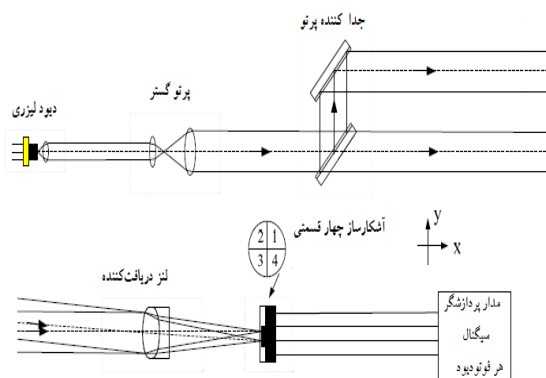
شکل ۱۰. محل قرارگیری لکه‌های نوری بر روی آشکارساز تستر.

با تغییر فاصله بین عدسی دریافت‌کننده و آشکارساز، می‌توان ابعاد دو پرتو لیزر را بر روی آشکارساز تغییر داد؛ اما حالت سوم و چهارم بین لکه‌ها، در عمل رخ نمی‌دهد، زیرا لیزری که از هدف اصلی و هدف کاذب بازتاب می‌گردد، دارای واگرایی هست که این باعث می‌شود پرتوهای رسیده به تسلیحات، همه دماغه تسلیحات را احاطه کند، بنابراین لکه‌هایی با ابعاد یکسان روی آشکارساز چهارقسمتی تشکیل می‌گردد.

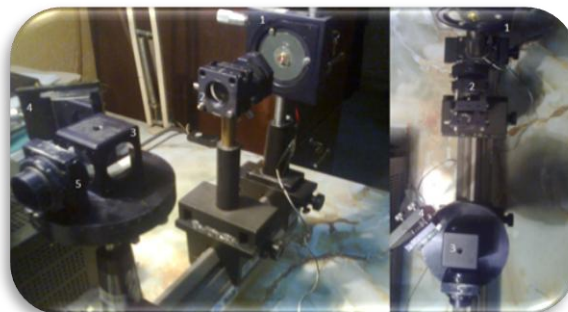
### ۳-۱. صحت‌سنجی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی

در شکل (۱۱)، مقایسه میزان انحراف به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و تستر بر روی دو محور  $x$  و  $y$  در دو حالت اول و دوم مطابق جدول (۱) نمایش داده‌شده است. در این شکل، محور عمودی  $dx$  و محور افقی وضعیت لکه در ۸ حالت مختلف طبق جدول (۲) و (۳) هست. در شکل (۱۲)، میزان انحراف مرکز آشکارساز به‌دست‌آمده در محوره‌های  $x$  و  $y$  از شبیه‌سازی با مقدار به‌دست‌آمده از تستر در حالت اول و دوم مقایسه شده است. در این شکل نیز، محور عمودی درصد اختلاف شبیه‌سازی و تستر و محور افقی وضعیت لکه‌ها در ۸ حالت مختلف طبق جدول‌های (۲) و (۳) است. با توجه به نمودارها اختلاف کمی بین نتایج شبیه‌سازی و نتایج تستر وجود دارد که می‌توان صحت نتایج شبیه‌سازی را نتیجه گرفت. همان‌طور که در نمودارها نشان داده‌شده است، در حالت اول در محور  $x$ ، ۱۲٪، در محور  $y$ ، ۷٪، در حالت دوم در محور  $x$ ، ۱۴٪ و در محور  $y$ ، ۵٪ خطا بین نتایج شبیه‌سازی و تستر وجود دارد که می‌تواند ناشی از چند دلیل باشد. یکی از دلایل خطاهای دیده‌شده از نتایج تستر و شبیه‌سازی، این است که در هنگام ثبت نتایج تستر، لکه‌ها به‌طور دقیق در مختصات موردنظر بر روی آشکارساز قرار نمی‌گیرند.

برای اینکه بتوان نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی را به‌صورت عملی آزمون کرد، نیاز به ساخت تستر فریب آشکارساز چهارقسمتی هست. این تستر باید قابلیت این را داشته باشد که بتوان دو لکه لیزر را هم‌زمان بر روی آشکارساز انداخته و با تغییر موقعیت دو لکه روی آشکارساز و نسبت انرژی این دو لکه نسبت به هم انحراف آشکارساز را مشاهده کرد. برای این کار چیدمان مناسب را با در نظر گرفتن امکانات و قطعات اپتیکی در دسترس، مطابق با شکل‌های (۸) و (۹) برپا شد. با توجه به شکل‌های (۸) و (۹)، پرتو خروجی از لیزر نیمه‌هادی با طول‌موج  $(\lambda=650nm)$ ، توسط پرتو گستر<sup>۱</sup> گسترده می‌شود. بعدازآن توسط مقسم پرتو<sup>۲</sup>، دو پرتو مشابه به دست می‌آید. زاویه بین دو پرتو لیزر را می‌توان با قرار دادن آینه در مقابل یکی از خروجی‌های مقسم پرتو تغییر داد. شدت این دو پرتو را نیز می‌توان با قرار دادن قطبش‌گر در مسیر یکی از پرتوهای لیزر کنترل کرد. دو پرتو لیزر بعد از طی مسیری وارد عدسی دریافت‌کننده می‌شوند. عدسی دریافت‌کننده، دو پرتو لیزر را روی آشکارساز متمرکز می‌کند. شکل (۱۰)، نمایشی از شکل دو لکه اصلی و فریب بر روی آشکارساز را نشان می‌دهد.

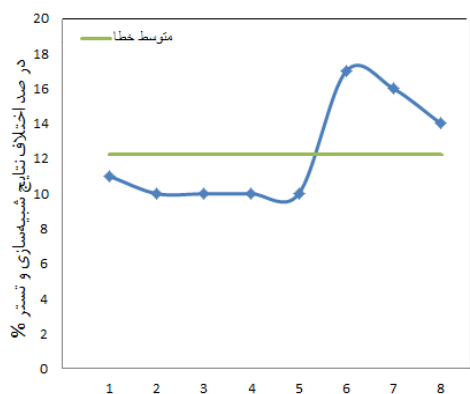


شکل ۸. طرح‌واره چیدمان آزمایشگاهی تستر ساخته‌شده.

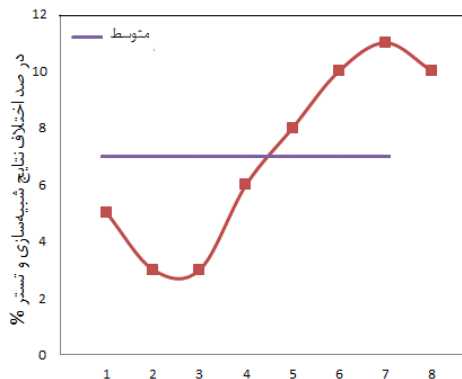


شکل ۹. شکل چیدمان به‌کاررفته، ۱- لیزر دیود ۲- پرتو گستر ۳- جداکننده ۴- آینه ۵- قطبش‌گر.

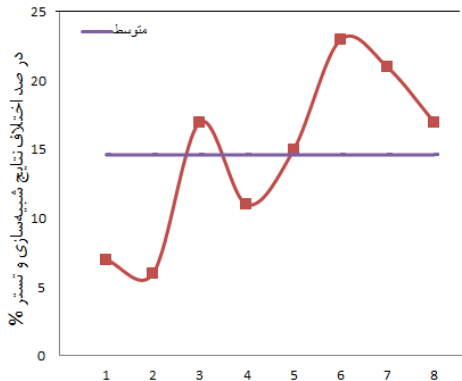
<sup>1</sup>Beam Expander  
<sup>2</sup>Beam Splitter



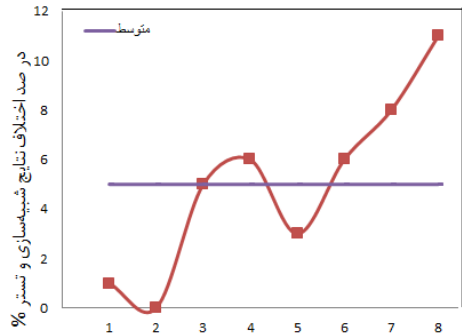
(الف): وضعیت لکه‌ها در حالت اول محور x.



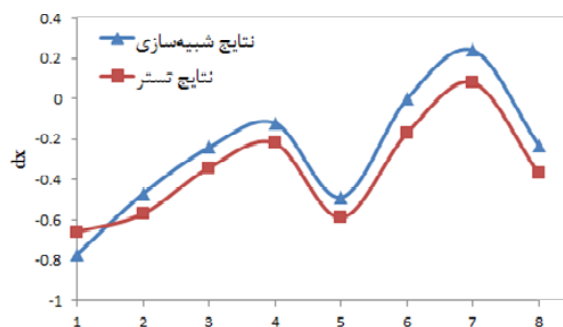
(ب): وضعیت لکه‌ها در حالت اول محور y.



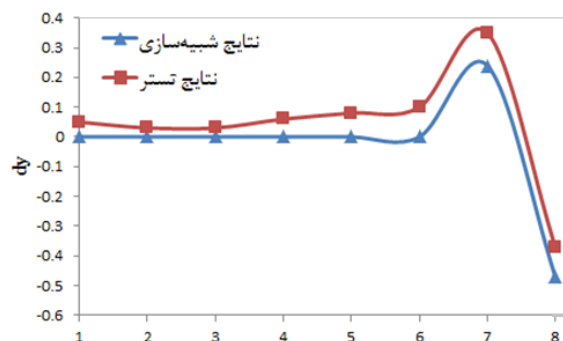
(الف): وضعیت لکه‌ها در حالت دوم محور x.



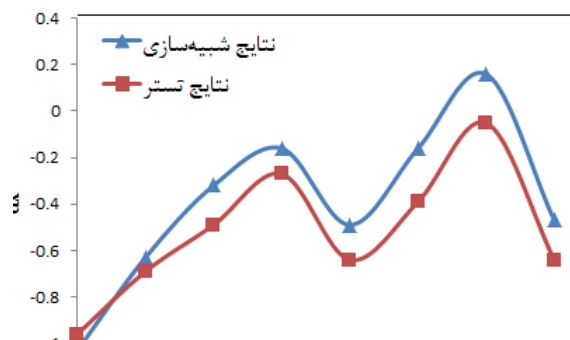
(ب): وضعیت لکه‌ها در حالت دوم محور y.



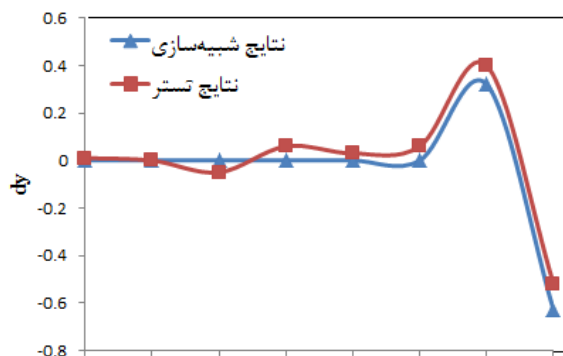
(الف): وضعیت لکه‌ها در حالت اول محور x.



(ب): وضعیت لکه‌ها در حالت اول محور y.



(الف): وضعیت لکه‌ها در حالت دوم محور x.



(ب): وضعیت لکه‌ها در حالت دوم محور y.

شکل ۱۱. مقایسه میزان انحراف به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و تست بر روی محور x و y حالت اول ( $A_t=A_j, P_t=P_j$ ) و بر روی محور x و y در حالت دوم ( $A_t=A_j, P_t=2P_j$ ).

شکل ۱۲. اختلاف نتایج به‌دست‌آمده بر روی محور x و y در حالت اول ( $A_t=A_j, P_t=P_j$ ) و بر روی محور x و y در حالت دوم ( $A_t=A_j, P_t=2P_j$ )



#### ۴. نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در سامانه‌های پدافند و فریب جستجوگرهای لیزری باید به دست بیاید، مشخصات لکه فریب نسبت به لکه اصلی هست. در این مقاله برای به دست آوردن این مشخصات، رفتار آشکارساز جستجوگر لیزری تسلیحات ابتدا شبیه‌سازی شد و سپس سامانه تستر آشکارساز، طراحی و پیاده‌سازی شده است. بر اساس آزمون‌های انجام‌شده در شبیه‌سازی و تستر مشخص شد که در عمل روی آشکارساز چهار قسمت، تغییر ابعاد لکه فریب نسبت به لکه اصلی هیچ تأثیری بر عملکرد آشکارساز تسلیحات ندارد. از طرف دیگر برای فریب آشکارساز تسلیحات هدایت‌شونده لیزری، تنها توان لکه فریب را نسبت به لکه اصلی باید افزایش داد و هرچه ارسال لکه فریب در مراحل ابتدایی حمله صورت گیرد، (مرکز لکه اصلی به مرکز آشکارساز زیاد نزدیک نشده باشد) احتمال موفقیت عملیات فریب بیشتر است. در حالتی که توان لکه اصلی و فریب برابر باشد، انحراف کلی آشکارساز به اندازه متوسط انحراف هر یک از لکه‌ها بستگی دارد. اگر نسبت توان لکه فریب به لکه اصلی از سه برابر بیشتر باشد، آشکارساز بیشتر تحت تأثیر لکه فریب عمل می‌کند.

#### ۸. مراجعها

- [1] McCarthy, P. L. "Projectile Guidance System Including a Compact Semi-Active Laser Seeker With Immersed Filter Stack and Field Lens"; US Patent 20110089286, 2010.
- [2] Jenkins, D. G.; Taylor, B. B. "Methods and Apparatus for Guidance Systems"; US Patent 7530528, 2008.
- [3] Wotton, J. R. "Laser Warning System and Methods"; US Patent 234349, 2003.
- [4] Williams, D. S. "Absolute Time Encoded Semi-Active Laser Designation"; US Patent 78817, 2009.
- [5] Yanhai, Y. "The Design of Echo Spot and Optical Focusing in Automatic Laser Tracking"; Optics and Laser Technol. 1986, 18, 75-79.
- [6] Mohammadi, M. M.; Ghanei, H. "Laser Weapon Disruption Techniques"; [http:// www.Military.ir](http://www.Military.ir) (In Persian).
- [7] Jin-Hua Chai Ning Liu "New Twelve-Quadrant Photoelectric Detection Scheme of Eliminating the Influence of Jamming Spot on Laser Guidance"; Proc. of SPIE, 2009, 7382.
- [8] Makynen, A. J.; Kostamovaara, R. M. "Displacement Sensing Resolution of Position-Sensitive Detector Atmospheric Turbulence Using Retro Reflected Beam"; IEEE Trans. Instrumentation and Measurement 1997, 46, 1133-1136.
- [9] Salmanpour, A.; Mohammad Nejad, Sh. "The Performance Improvement of the Target Position Determining System in Laser Tracking Based on 4Q Detector Using Neural Network"; World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 56, 8-29.
- [10] Amakynen, J.; Kostamovaara Myllyla, R. "Positioning Resolution of Position-Sensitive Detectors in High Background Illumination"; IEEE Trans. Instrumentation and Measurement 1996, 45, 324 – 326.

جدول ۲. موقعیت لکه اصلی و فریب در حالت اول ( $A_i=A_j, P_i=P_j$ ).

ردیف	موقعیت لکه اصلی	انحراف ناشی از لکه اصلی	موقعیت لکه فریب
	$(x_i, y_i)$	$dx_i, dy_i$	$(x_j, y_j)$
۱	(۰)	(۰/۱۵ و ۰/۱۳)	(۰ و ۰/۱۹)
۲	(۰)	(۰/۱ و ۰/۱۵)	(۰ و ۰/۱)
۳	(۰)	(۰/۱ و ۰/۱۵)	(۰ و ۰/۰۵)
۴	(۰)	(۰/۱ و ۰/۱۵)	(۰ و ۰/۰۲۵)
۵	(۰/۰۵ و ۰)	(۰/۱۷ و ۰/۰۵۱)	(۰ و ۰/۰۵)
۶	(۰/۰۵ و ۰)	(۰/۱۷ و ۰/۰۵۴)	(۰ و ۰/۰۵)
۷	(۰/۰۵ و ۰)	(۰/۱۷ و ۰/۰۵۴)	(۰ و ۰/۰۵)
۸	(۰/۰۵ و ۰)	(۰/۱۷ و ۰/۰۵۴)	(۰/۰۱ و ۰/۰۱)

دلیل دیگر این‌که شدت لکه لیزری ایجادشده روی سطح آشکارساز در تستر، کاملاً یکنواخت نیست. همچنین در مدار پردازشگر سیگنال‌های آشکارساز که از مجموع مدارهای جمع‌کننده، تقسیم‌کننده، مبدل آنالوگ به دیجیتال استفاده‌شده است، ممکن است در هر مرحله خطایی ایجاد کند، البته تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال بیشتر برای اینکه تغییرات ثبت شود، استفاده شده است که در جستجوگر تسلیحات این مدار وجود ندارد. البته این خطاها سعی شده است که تا حد امکان کاهش پیدا کنند، با مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و تستر، با در نظر گرفتن خطاهای موجود، می‌توان رفتار آشکارساز در شبیه‌سازی را با رفتار آن در تستر یکسان در نظر گرفت.

جدول ۳. موقعیت لکه اصلی و فریب در حالت دوم ( $A_i=A_j, P_j=2P_i$ ).

ردیف	موقعیت لکه اصلی	انحراف ناشی از لکه اصلی	موقعیت لکه فریب
	$(x_i, y_i)$	$dx_i, dy_i$	$(x_j, y_j)$
۱	(۰)	(۰/۱۵ و ۰/۱۳)	(۰ و ۰/۱۹)
۲	(۰)	(۰/۱ و ۰/۱۵)	(۰ و ۰/۰۱)
۳	(۰)	(۰/۱ و ۰/۱۵)	(۰ و ۰/۰۵)
۴	(۰)	(۰/۱ و ۰/۱۵)	(۰ و ۰/۰۲۵)
۵	(۰/۰۵ و ۰)	(۰/۱۷ و ۰/۰۵۱)	(۰ و ۰/۰۵)
۶	(۰/۰۵ و ۰)	(۰/۱۷ و ۰/۰۵۴)	(۰ و ۰/۰۵)
۷	(۰/۰۵ و ۰)	(۰/۱۷ و ۰/۰۵۴)	(۰ و ۰/۰۵)
۸	(۰/۰۵ و ۰)	(۰/۱۷ و ۰/۰۵۴)	(۰/۰۱ و ۰/۰۱)

- [11] Oliyaei, S.; Rezazade, M. "Optical Detector Linearization of Four-Part Positioning Using RBF and MLP Neural Networks"; Electronics Industries 2010, 65-76 (In Persian).
- [12] Akkal, E. "Control Actuation Systems and Seeker Units of an Air-to-Surface Guided Munitions"; M.S. Thesis, Department of Electrical and Electronics Engineering, Middle East Technical University, 2003.
- [13] Liu, N.; Chai J. H. "Dual Spots Detection Algorithm of Four-Quadrant Laser Guidance"; Infrared and Laser Engineering, 2010, 4, 013.
- [14] Luciana P. S.; Davies W. L. M. "Designing the Response of an Optical Quad-Cell as Position-Sensitive Detector"; IEEE Sensors Journal 2010, 10, 286 - 293.
- [15] Eslami Majd, A.; Naseri, A.; Masoumian, A.; Nasrollahi, M. R. "Design and Implementation of a Tester System for Laser Warning System "; Adv. Defence Sci. & Technol. 2016, 6, 107-117 (In Persian).