

# تشخیص بقایای اشیاء خارجی (فعال و غیرفعال) و ترک بر روی باند فرودگاه با استفاده از تکنیک‌های بینایی ماشین

مهدی سبزه پرور<sup>\*</sup>، مصطفی عباسی ازنداریانی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا

۲- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی هوافضا

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹)

## چکیده

هدف از این مقاله استفاده از تکنیک‌های بینایی ماشین، و پردازش تصاویر ارسالی گرفته شده توسط دوربین برای شناسایی و تشخیص بقایای اشیاء خارجی (فعال و غیرفعال) و ترک‌ها بر روی باند فرودگاه‌ها می‌باشد. تشخیص دادن بقایای اشیاء خارجی و ترک بر روی باند فرودگاه‌ها مسئله قابل توجهی است که می‌تواند سبب وارد شدن آسیب‌های جدی به هواپیما گردد. راه حل پیشنهادی مبتنی بر سیستم بینایی ماشین و پردازش ویدئو است. هدف اصلی الگوریتم پیشنهادی، تشخیص بقایای اشیاء خارجی می‌باشد. بنابراین مطمئن‌ترین روش برای تشخیص مبتنی بر بینایی ماشین در باند فرودگاه‌ها نظارت ناحیه‌ای به صورت فریم به فریم و استفاده از الگوریتم‌های تفریق پس‌زمینه است. با استفاده از داده‌های نزدیک به واقعیت به صورت ویدئو از قبیل (تراشه‌های فلزی، پیچ و واشرها، ابزارآلات، لاشه پرندگان و حیوانات و غیره) و اعمال آنها به الگوریتم تشخیص، خروجی با کارایی بالا و دقیق را بدست آمده است، به طوری که الگوریتم قادر به تشخیص بقایای اشیاء خارجی فعال و غیرفعال (واشرها) با مساحت بسیار کوچک  $0.0023$  (متر مربع) و کارایی  $79\%$ ، قطعاتی در ابعاد متوسط با مساحت  $0.2201$  (متر مربع) و کارایی  $98\%$ ، آتش‌سوزی، حرکت پرندگان و ترک‌ها را با دقت بالا تشخیص داده و هشدارهای (سطح بالا و پایین) لازم (به صورت صوتی (آزیر) و نمایش در نمایشگر کاربر برج مراقبت را جهت توقف پروازها می‌دهد. تا کاربر برج مراقبت با بهره‌گیری از نمایشگر کاملاً گرافیکی و کاربرپسند خود، ابعاد و اندازه و محل دقیق بقایای اشیاء خارجی را در اختیار تیم‌های بازرسی و آتش‌نشانی فرودگاه قرار دهد.

**واژه های کلیدی:** دوربین، بینایی ماشین، الگوریتم تفریق پس‌زمینه، تشخیص بقایای اشیاء خارجی، باند فرودگاه.

## Detection of Foreign Object Debris (Active and Inactive) and Cracks on the Runway Using Machine Vision Techniques

Mehdi Sabzehparvar<sup>\*</sup>, Mostafa Abbasi Azandaryani

### Abstract

The purpose of this article is to use machine vision techniques, and to process images by the camera to identify and detect the remains of foreign objects on the runway. Recognizing the remains of foreign objects on the runway of airports is a significant issue that can cause serious damage to the aircraft and delays in the air transport system and many financial and human losses. The proposed solution is based on machine vision system and video processing. The main purpose of the proposed algorithm is to detect the remains of foreign objects and a large number of unknown objects that cannot be categorized. The safest way to diagnose based on machine vision in the runway of airports is to monitor the area on a frame-by-frame basis and use background subtraction algorithms. Using near-realistic data in the form of video and their application to the detection algorithm, the algorithm is able to detect the remains of active and inactive foreign objects with a very small size of  $0.0023$  (square meters) and  $79\%$  efficiency, parts in medium dimensions with an area of  $0.2201$  (square meters), and  $98\%$  efficiency, detects fire, bird movements and cracks with high accuracy and the necessary warnings (high and low level) (audible siren) and display on the air traffic controller. Fully graphical and user-friendly display provide the exact dimensions, size, and location of the foreign objects (active and inactive) to the airport inspection and firefighting teams.

**Key words:** Camera, Machine vision, Foreign object debris, Cracks, Airport runway

\* نویسنده پاسخگو: مهدی سبزه پرور، پست الکترونیک: [sabzeh@aut.ac.ir](mailto:sabzeh@aut.ac.ir)

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



## مقدمه

نصب نرده‌های امنیتی مناسب و نرده‌های شکسته نیز موجب آسیب زدن به هواپیما می‌گردد. متأسفانه در طی یک حادثه، یک گوزن منجر به آسیب زدن به هواپیما در باند سیتکاس گردید [7]. و در سال ۲۰۱۵ یک کانگرو موجب سقوط یک هواپیما شد [8]. در بسیاری از فرودگاه‌ها برخورد حیوانات با هواپیما در حال افزایش است. بر اساس آمارهای اداره هواپیمایی فدرال (FAA) تعداد اعتصاب‌های مطرح شده از (۱۸۰۰ تا) در سال ۱۹۹۰ به (۱۶۰۰۰ تا) در سال ۲۰۱۸ افزایش پیدا کرده است [9]. علاوه بر این با توجه به فراوانی حیوانات و پرندگان بیشتر به آسیب‌های وارده توجه گردیده است [10]. بنابراین نگهداری ایمنی باند فرودگاه اهمیت بسیار زیادی دارد.

بقایای اشیاء خارجی جامانده بر روی باند فرودگاه از عوامل بسیاری ناشی می‌شود و می‌تواند از هر ماده‌ای تشکیل شده و دارای هر ابعاد و اندازه‌ای باشد و همچنین از نظر نوع و منبع به انواع بسیاری تقسیم می‌شود [11]. طبیعت، فناوری و انسان متداول‌ترین دلایل وقوع بقایای اشیاء خارجی هستند. در جدول ۱ بطور خلاصه منابع، انواع و دلایل وقوع بقایای اشیاء خارجی را بیان می‌گردد.

جدول ۱- انواع بقایای اشیاء خارجی (فعال و غیرفعال)، منبع و

دلایل ایجاد [11,17]

منبع	نوع	دلایل ایجاد
طبیعت	حیات وحش، شاخ و برگ گیاهان، شاخه-های شکسته، سنگ، برف، یخ.	*حیوانات: نامناسب بودن حصار امنیتی. *پرندگان: از طریق هوا. *اشیاء متفرقه: از طریق باد.
	مصنوعات	*به دلیل خرد شدن و یا شل شدن قطعات هواپیما در هنگام برخاستن و یا فرود آمدن.
فناوری	واشرها، ورقه‌های فلزی، تراشه‌های رنگ، اتصالات لاستیکی، تکه‌های آسفالت و بتن.	*به دلیل خرد شدن و یا شل شدن قطعات هواپیما در هنگام برخاستن و یا فرود آمدن. *به دلیل کنده شدن بر اثر قدرت باد.
	مصنوعات انسانی	ابزارهای مکانیکی، برچسب و دسته چمدان، قوطی، تجهیزات کترینگ و دیگر بقایای آن، نشان‌های پرسنل، تعمیر و نگهداری و

صنعت هوانوردی یکی از سریع‌ترین زمینه‌های در حال رشد در جهان است که بیشتر از ۱۰۰ سال است که از آن می‌گذرد، فرایندهایی که برای ادامه فعالیت در این بخش لازم است، به سطح بالایی از ایمنی و امنیت نیاز دارند زیرا یک خطای ناچیز یا ناآگاهی در ایمنی می‌تواند به راحتی منجر به یک حادثه مرگبار شود [1]. با افزایش جمعیت جهان و افزایش تعداد پروازها در سال، هر ساله مشکلات بوجود آمده توسط بقایای اجسام خارجی بر روی باند فرودگاه به سرعت افزایش یافته است. اکثر حوادث ناشی از بقایای اشیاء خارجی در باند اصلی فرودگاه‌ها و رمپ‌های تاکسی اتفاق می‌افتد [2,3]. که در شرایط نامساعد می‌تواند موجب خرابی تیرها و یا موتورهای هواپیما و وارد آمدن آسیب‌های جدی به آن شود. وضعیت بوجود آمده همچنین باعث تاخیر قابل توجه چندین هواپیما و در موارد حاد موجب تلفات و صدمات جدی گردد. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط فرانسوی‌ها در مورد سیستم‌های تشخیص خودکار، بیش از ۶۰٪ از مجموعه بقایای اشیاء خارجی شناسایی شده از فلز و به دنبال آن ۱۸٪ از اشیاء لاستیکی ساخته شده است [4]. به عبارت دیگر بقایای اشیاء خارجی در صنعت هواپیمایی برای امنیت هواپیما مشکلات بسیاری ایجاد می‌کند، به همین دلیل در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی جهت توسعه یک سیستم تشخیص بقایای اشیاء خارجی انجام گرفته است. زبان مالی صنعت هواپیمایی ناشی از بقایای اجسام خارجی سالانه ۴ میلیارد دلار برآورد شده است [5]. علاوه بر ضررهای اقتصادی برای نمونه در سال ۲۰۰۰ میلادی که در پرواز ۴۵۹۰ هواپیمایی فرانسسه به دلیل وجود یک نوار فلزی کوچک اتفاق افتاد موجب آتش سوزی و از دست رفتن کنترل هواپیما و بوجود آمدن ضررهای جبران ناپذیری گردید، نوار فلزی که لحظاتی پیش از پرواز قبلی در رمپ باقی مانده بود متأسفانه منجر به کشته شدن ۱۱۳ نفر شد [6]. تشخیص پرندگان و سایر حیوانات در باند فرودگاه‌ها بهمراه نظارت بر منطقه وسیع اطراف باند بسیار چالش برانگیز است که یکی از راهکارها استفاده از تعدادی دوربین به فواصلی که با توجه طول و پهنای باند فرودگاه تمامی سطح باند تحت نظارت قرار گرفته و دوربین‌ها همدیگر را پوشش دهند. خسارت وارده بر هواپیما بیشتر ناشی از فرو رفتن پرندگان در موتور می‌باشد. علاوه بر پرندگان دلایل بسیاری مانند ورود حیوانات به باند به دلیل عدم

## تجهیزات ساخت و

ساز.

عیوب سطحی و زیر سطحی یک کار حیاتی برای حفظ سلامتی و قابل اطمینان بودن سازه باند فرودگاه است. بنابراین علاوه بر ارائه الگوریتمی جهت تشخیص بقایای اشیاء خارجی، از تصاویر ارسالی استفاده شده است تا با توسعه الگوریتم، ترک‌های روی باند فرودگاه نیز با دقت بالایی تشخیص داده شود [15].

کارهای تحقیقاتی بسیاری با تمرکز بر توسعه سیستم مناسب تشخیص بقایای اشیاء خارجی در حال انجام است، که قسمت حیاتی هر یک از این سیستم‌های تشخیص الگوریتم و پیاده‌سازی آن در زمان واقعی می‌باشد. که خلاصه‌ای از این کارهای تحقیقاتی به‌طور خلاصه توضیح داده می‌شود. شرکت بایوسکو لهستان [16] در حال تحقیق و توسعه بر روی سیستمی بسیار ضروری جهت نظارت خودکار بر باند فرودگاه (AFMS) است، تا تعداد برخورد هواپیماها، پرندگان و پستانداران را کاهش دهد. هدف از این پروژه ساخت نمونه اولیه سیستم نظارت خودکار بر باند فرودگاه می‌باشد [17]. برای توسعه سیستم و الگوریتمی جهت تشخیص بقایای اشیاء خارجی همانطور که در جدول ۲ نشان داده شده است می‌توان از فناوری‌های رادار، لیدار و بینایی ماشین بهره برد. در مرجع [20] با استفاده از امواج میلی‌متری رادار آزمایشاتی از قبیل پیچ، پرچ، مهره، بازوی ارباب فرود جلو با استفاده از باند فرکانسی میلی‌متری امواج از ۳۲ تا ۳۶ گیگا هرتز و ۹۰ تا ۹۵ گیگا هرتز برای تشخیص بقایای اشیاء خارجی انجام گرفته است و همچنین از الگوریتم‌های فیلترینگ با استفاده از بازسازی تصویر جهت افزایش عملکرد تشخیص بقایای اشیاء خارجی استفاده گردیده است که در نتیجه این سیستم می‌تواند پیچ‌ها را با فاصله ۲ متری با ابعاد و اندازه  $(۴۰ \times ۱۲)$  میلی‌متر با موفقیت تشخیص دهد. چندین کار تحقیقاتی دیگر مانند رادار میلی‌متری امواج جهت تشخیص بقایای اشیاء خارجی در باند فرودگاه [21] و تصویربرداری امواج میلی‌متری بقایای اشیاء خارجی بر پایه رویکرد دو بعدی [22] نیز در این زمینه صورت گرفته است. اما نصب چنین سیستم‌هایی نیازمند مجوزاتی از مدیریت فرودگاه دارد زیرا می‌تواند با سیگنال‌های هواپیما تداخل پیدا کرده و کارایی خود را از دست دهد و علاوه بر این هزینه پیاده‌سازی و نگهداری چنین سیستم‌هایی بالا بوده و در نتیجه نصب آن در فرودگاه‌های کوچک و متوسط از لحاظ اقتصادی مقرون بصره نیست. در مرجع [18] و [19] جهت تشخیص بقایای اشیاء خارجی از فناوری لیدار استفاده شده است در مرجع [19] جهت تشخیص بقایای اشیاء

موتورها در معرض جدی خرابی ناشی از بقایای اشیاء خارجی (نرم یا سخت صرف نظر از اندازه و شکل) هستند. که این بقایای اشیاء خارجی می‌توانند به کارکرد موتور شامل (پره-های چرخان، پره‌های استاتیک و یا سایر قسمت‌های موتور باشند) آسیب جدی وارد سازند. تیغه‌های چرخشی براحتی توسط چنین اشیائی خم می‌شوند و در نتیجه موجب عملکرد پایین موتور و در موارد نادر به کل ساختار موتور آسیب می‌زنند [12]. که در نهایت منجر به سقوط هواپیما می‌گردد. یکی از این حوادث سال ۲۰۰۹ در شهر هادسون، که در آن هواپیمای ایرباس (A320-214)، نیروی محرکه هر دو موتور خود را به علت بلعیدن پرندگان بزرگ در موقع برخاستن از دست داد [13]. و هواپیما بدون هیچگونه خسارت جانبی در رودخانه هادسون به زمین نشست. در موارد دیگر بقایای اشیاء خارجی می‌توانند با نفوذ در داخل لاستیک در بازرسی‌ها قابل تشخیص نباشد و موجب ترکیدگی تایلر و آسیب جدی به تایلرها و همچنین به هواپیما وارد ساخته و باعث جدا شدن آج لاستیک شده که به سایر قسمت‌های هواپیما آسیب زده و نشستن و برخاستن سایر هواپیماها را با مشکل جدی روبرو می‌کند [12]. نمونه این مورد در سال ۲۰۰۰ که نوار فلزی ۴۳ اینچی باقی‌مانده در باند، به لاستیک هواپیمای کنکوردر در فرودگاه نفوذ کرده و باعث ترکیدگی لاستیک و منفجر شدن مخزن سوخت و در ادامه سقوط هواپیما گردید [14].

قسمت‌هایی مانند بدنه (قسمت اصلی هواپیما)، بال‌ها، دماغه، شیشه جلو کابین بسیار در معرض آسیب توسط بقایای اشیاء خارجی هستند، آسیب به ساختار هواپیما منجر به از دست رفتن سطح آیرودینامیکی و در ادامه سقوط هواپیما می‌گردد. اگر دماغه هواپیما به علت برخورد بقایای اشیاء خارجی آسیب ببیند می‌تواند سیستم راداری را از کار انداخته و هواپیما را دچار مشکل اساسی نماید [12]. یکی دیگر از نتایج نامطلوب بقایای اشیاء خارجی اختلال در عملکرد طبیعی فرودگاه و موجب تاخیر در پروازها و از دست دادن درآمد و اضافه کاری بیشتر کارمندان می‌گردد [12]. بنابراین ضرورت و اهمیت الگوریتم و سیستمی جهت تشخیص بقایای اشیاء خارجی بسیار حیاتی است. تشخیص

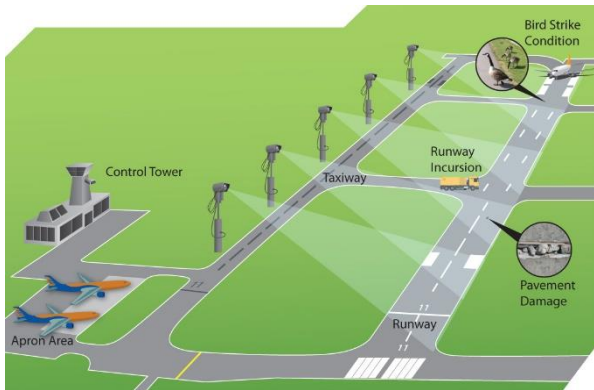
در تشخیص بقایای اشیاء خارجی بر پایه ویدئو، الگوریتم از فریم-های متوالی گرفته شده در زمان واقعی استفاده می‌کند. اگرچه این روش می‌تواند بقایای اشیاء خارجی را تا اندازه ۴,۵ سانتی‌متر تشخیص دهد اما به دلیل مساحت و فواصل کم، در این کار تحقیقاتی به تعداد زیادی دوربین جهت پوشش کل باند فرودگاه نیاز بوده و به دلیل عریض بودن، باند فرودگاه فاقد نتایجی است که نشان دهد فواصل زیاد بقایای اشیاء خارجی از دوربین قابلیت تشخیص دارد یا نه و این ما را از هدف اصلی سیستم تشخیص بقایای اشیاء خارجی دور نموده است. در بحث تشخیص ترک نیز از روش‌های مختلفی از جمله تشخیص ترک‌های زیر سطحی با استفاده از امواج رادار [15] و ترک‌های روی سطح باند فرودگاه با استفاده از تصاویر و تکنیک‌های بینایی ماشین استفاده گردیده است [25-26].

جدول ۲- رویکردهای تشخیص بقایای اشیاء خارجی در باند فرودگاه

کارها و مقالات موجود	تکنولوژی
Millimeter Wave (mm Wave)	سیستم رادار (Radar systems)
[20],[22]	
Motion detection	سیستم بینایی (Vision systems)
[23],[24]	
AI based solution [27]	
Object detection [28]	
Lidar based remote sensing system [18]	سیستم لیدار (Lidar systems)
Lidar technology [19]	

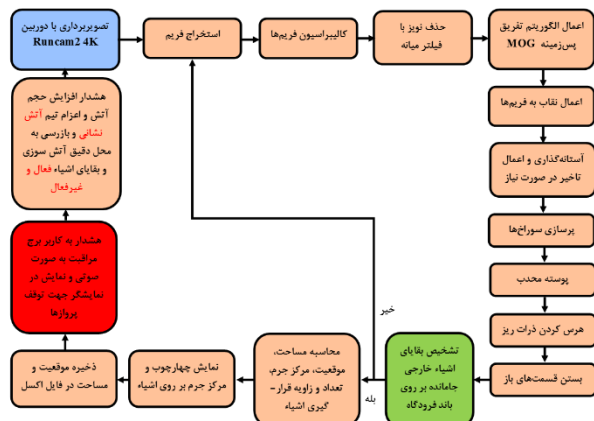
در این مقاله با توجه به پیشینه تشخیص بقایای اشیاء خارجی و معایب و مزایای هر کدام از کارهای تحقیقاتی صورت گرفته و فناوری‌های استفاده شده الگوریتم پیشنهاد شده با استفاده از تکنیک‌های بینایی ماشین که شماتیک آن در شکل ۲ نشان داده شده است (از جمله مهم‌ترین الگوریتم‌ها، الگوریتم تفریق پس‌زمینه و الگوریتم آستانه‌گذاری می‌باشد) قادر است معایب تحقیقات قبلی را پوشش داده و از لحاظ اقتصادی مقرون بصره بوده و به راحتی قابل پیاده‌سازی باشد و همچنین نظارتی کامل (با نصب تعداد کمی دوربین که با هم همپوشانی داشته باشند) بر باند فرودگاه به صورت زمان واقعی در طول شبانه روز داشته باشد. به این صورت که اگر دوربین مورد نظر با میدان دید

خارجی از یک ربات کوچک به همراه تکنیک‌های اینترنت اشیاء و لیدار استفاده نموده است که از نظر مقرون بصره بودن به دلیل استفاده از بردهای آردیونو و سنسورهای متعارف رویکرد خوبی است اما دو تا از مشکلات اصلی آن اینست که نمی‌تواند همزمان کل باند را رصد نمود و همچنین زمان استفاده از آن به دلیل تمام شدن باتری بسیار پایین بوده و مورد بعدی اینکه بقایای اشیاء خارجی فعال مانند پرندگان و اشیاء با اندازه بزرگ غیر قابل تشخیص است. در مرجع [18] نیز نتایج آزمایشگاهی بوده و فاصله تشخیص بقایای اشیاء خارجی و محدوده اندازه تشخیص اشیاء بسیار پایین و پیاده‌سازی آن در باند فرودگاه به دلیل عرض و طول زیاد باند و همچنین وجود بقایای اشیاء خارجی فعال (پرندگان) و غیر فعال در ابعاد و اندازه مختلف غیر ممکن است. در مرجع [25] از الگوریتم CNN مبتنی بر ناحیه و چهار دوربین GT2050C با کیفیت ۲۰۴۸×۲۰۴۸ پیکسل، جهت اسکن ۵ متر از عرض باند برای تشخیص بقایای اشیاء خارجی بطور همزمان استفاده می‌کند و از جی پی اس (GPS) نصب شده بر روی خودرو در حال حرکت جهت مشخص نمودن محل بقایای اشیاء خارجی بهره می‌برد. الگوریتم پیشنهادی برای تشخیص پیچ‌ها و سنگ‌ها با دقت ۹۷,۶۷٪ و با فرکانس نمونه‌برداری ۲۶ فریم بر ثانیه و در زمان واقعی پیاده‌سازی شده است. بکارگیری چنین الگوریتمی با حجم محاسباتی بالا اندکی چالش برانگیز و دشوار بوده و بدلیل اینکه بقایای اشیاء خارجی دارای ابعاد، اندازه، جنس و چهارچوب مشخصی نیستند استفاده از داده‌های مشخص جهت آموزش الگوریتم در الگوریتم‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین بسیار دشوار بوده و درصد خطای بالایی دارد و همچنین استفاده از وسیله نقلیه برای تشخیص بقایای اشیاء خارجی نیازمند مجوزهای اضافی از مدیریت فرودگاه است. در مرجع [26] نیز تشخیص چندین شیء با استفاده از کتابخانه OpenCV مبتنی بر فناوری Embedded Platform صورت پذیرفته است. در فناوری Embedded Platform از برد DM3730 و الگوریتم طبقه‌بندی (Cascade classifier) استفاده شده است و در نتیجه آن زمان محاسبه شده برای تشخیص ۱ شیء ۹۵ میلی‌ثانیه بدست آمده است با این حال، این کار تحقیقاتی فاقد اندازه شیء کشف شده و فاصله بین سیستم نصب شده و شیء تشخیص داده شده است. در مراجع [23] و [24] نیز جهت تشخیص بقایای اشیاء خارجی از تکنیک‌های پردازش تصویر استفاده نموده است.



شکل ۱- نحوه فرارگیری دوربین‌ها در باند فرودگاه [29]

شماتیک کلی الگوریتم تشخیص بقایای اشیاء خارجی غیر فعال در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیک کلی الگوریتم تشخیص بقایای اشیاء خارجی

پس از تصویربرداری از باند فرودگاه توسط دوربین مربوطه و ارسال ویدئو به سیستم و به دنبال آن انجام مرحله از قبیل استخراج فریم‌ها، کالیبراسیون فریم‌ها، حذف نویز توسط فیلتر-های میانه، الگوریتم تفریق پس‌زمینه MOG، افزودن نقاب (Mask)، آستانه‌گذاری (Thresholding)، پرسازی سوراخ‌ها (Fill Hull)، پوسته محدب (Convex Hull) و هرس کردن (Remove Particle)، الگوریتم اعمالی به ویدئو ارسالی کاملاً آماده جهت تشخیص بقایای اشیاء جامدانه بر روی باند فرودگاه است، حال اگر اشیاء تشخیص داده شوند الگوریتم مساحت، موقعیت و تعداد بقایای جامدانه بر روی باند را به صورت کاملاً کاربرپسند و گرافیکی بر روی نمایشگر، به همراه چهارچوب و مرکز جرم تصویر نمایش می‌دهد. و در نهایت به کاربر برج مراقبت اخطار صوتی و تصویری جهت متوقف نمودن نشست و برخاستن پروازها داده می‌شود. و کاربر با داشتن موقعیت، ابعاد و اندازه، و تعداد بقایای اشیاء جامدانه بر روی باند فرودگاه تیم‌های بازرسی

۱۲۰ درجه در ارتفاع ۵ متری و در عرض ۲ متری از کنار باند فرودگاه نصب گردد، می‌تواند عرض ۲۵ متر و طول ۴۵ متر را پوشش داده (داده‌های مورد نظر تا محدوده ۱۸ متر تست گردیده‌اند) و بقایای اشیاء خارجی فعال (آتش‌سوزی، حرکت انسان‌ها، پرندگان و حیوانات) و غیر فعال (پیچ، پرچ، مهره، دریچه باک سوخت، ترشه‌های فلزی و غیره) را برای مساحت کوچک (واشر) ۰،۰۰۲۳ (مترمربع) را با کارایی ۷۹٪ و مساحت متوسط (دریچه دسترسی) ۰،۲۲۰۱ (مترمربع) را با کارایی ۹۸٪ در فواصل مختلف تشخیص داده و علاوه بر این، محیطی گرافیکی بسیار کاربرپسند را به همراه موقعیت دقیق و مساحت واقعی (متر-مربع) بقایای اشیاء خارجی را با هشدارهای صوتی و نمایشی نشان دهد.

### تشخیص بقایای اشیاء خارجی فعال و غیر فعال

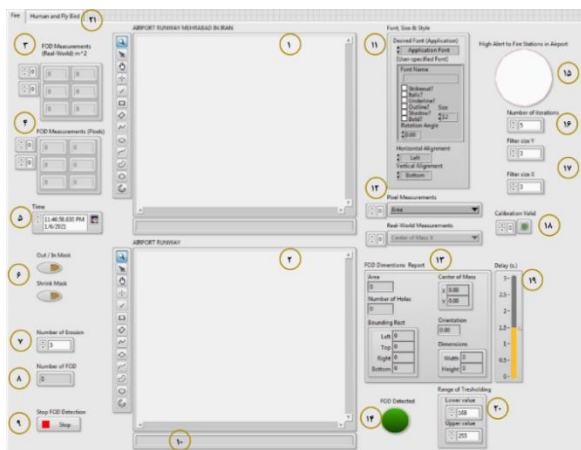
در این قسمت با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و بینایی ماشین به تشخیص بقایای اشیاء خارجی فعال و غیر فعال از قبیل قطعات کامپوزیتی جدا شده از هواپیما، وسایل جامدانه توسط مهندسیین خط پرواز، سنگ ریزه‌ها، تکه‌های چوب، اتصالات و قطعات جدا شده از هواپیما پرداخته می‌شود و سپس بعد از تشخیص، مساحت بقایای اشیاء خارجی غیرفعال به همراه تعداد، ابعاد، اندازه و موقعیت دقیق شناسایی شده و هشدارهای لازم به برج مراقبت از پرواز داده می‌شود و تا پاک شدن باند فرودگاه پروازها به حالت تعویق در می‌آید.

### پیاده سازی الگوریتم

جهت پیاده سازی الگوریتم از نرم‌افزارهای لب ویو، پایتون و از کتابخانه OpenCV استفاده نموده‌ایم. برای تشخیص بقایای اشیاء خارجی غیر فعال ابتدا بایستی باند فرودگاه به دوربین مجهز شود. برای اینکار بدلیل پوشش وسیعتری از باند فرودگاه و همچنین استفاده از دوربین‌های کمتر از دوربین‌های با میدان دید و کیفیت بالا استفاده می‌کنیم. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌کنیم نحوه قرارگیری دوربین‌ها باید طوری باشد که دوربین‌ها همدیگر را پوشش داده و تمام باند فرودگاه کنترل گردد.

۰,۰۴۵	۰,۲×۰,۲	ارابه فرود شکسته قسمت‌های لاستیکی
۰,۱۲۶۹	۰,۴۷×۰,۲۷	باک سوخت اضافی
۰,۰۰۲۳	۰,۰۵×۰,۰۵۵	واشرها
۰,۰۰۵۴	۰,۲۷×۰,۰۲	پیچ‌ها
۰,۰۰۲۸۷۵	۰,۱۱×۰,۰۲۵	آچار آلنی
۰,۰۱۱	۰,۲۲×۰,۰۵	انبر قفلی
۰,۰۱۰۵	۰,۴۲×۰,۰۲۵	آچار ۱
۰,۰۰۹	۰,۳۶×۰,۰۲۵	آچار ۲
۰,۰۱۸	۰,۶×۰,۰۳	لاشه پرندگان
۰,۰۲۵۳	۰,۴۶×۰,۰۵۵	ملخ
۰,۰۱۵	۰,۱۵×۰,۱	سنگ ریزه

در شکل ۴ خروجی الگوریتم پیشنهادی تشخیص بقایای اشیاء خارجی با محیط بسیار گرافیکی و کاربرپسند نشان داده شده است که این برنامه شامل قسمت‌های مختلفی می‌باشد که در جدول ۴ ذکر گردیده است.



شکل ۴- خروجی الگوریتم پیشنهادی تشخیص بقایای اشیاء خارجی

پس از روشن شدن چراغ تشخیص بقایای اشیاء خارجی جامانده بر روی باند فرودگاه سیستم صوتی کاربر فعال شده و آژیر خطر به صدا در می‌آید و کاربر مشخصات ذخیره شده در فایل اکسل خروجی برنامه را جهت پاک‌سازی باند فرودگاه از هر گونه شیء اضافی برای تیم‌های بازرسی ارسال می‌نماید تا پروازها از سر گرفته شوند.

جدول ۴- بخش‌های مختلف شکل ۴

ردیف	عنوان
۱	تصویر گرفته شده از باند فرودگاه توسط دوربین Runcam2 4K

را جهت رفع این عیب به محل دقیق ارسال می‌کند. و بعد از تمیز شدن باند فرودگاه پروازها دوباره از سر گرفته می‌شود.

### داده‌های ورودی

داده‌ها به صورت ویدئو و توسط دوربین (Run cam2 4K) تصویربرداری شده‌اند. در هنگام جمع‌آوری داده‌ها سعی بر آن شده است که طیف گسترده‌ای از بقایای اشیاء خارجی جامانده بر روی باند فرودگاه را که در مقالات نیز ذکر شده‌اند و موجب بروز حوادث مالی و جانی گسترده می‌گردند، مورد استفاده قرار داده‌ایم که در شکل ۳ نشان داده شده است.



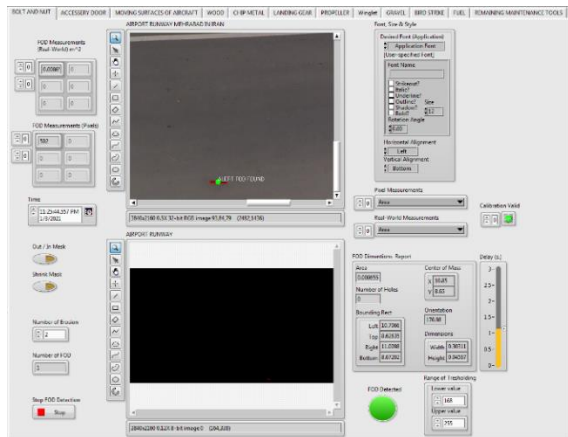
شکل ۳- بقایای اشیاء خارجی جامانده بر روی باند فرودگاه

در جدول ۳ دسته‌بندی و مساحت واقعی بقایای اشیاء خارجی غیر فعال که به عنوان ورودی به الگوریتم تشخیص داده شده‌اند ذکر گردیده است.

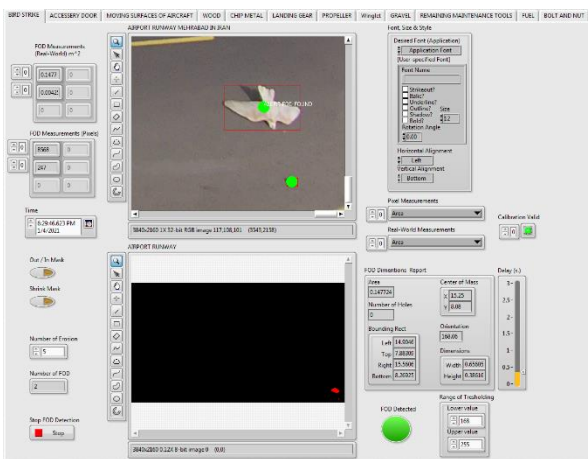
جدول ۳- مساحت واقعی بقایای اشیاء خارجی بر روی باند فرودگاه

اشیاء	ابعاد واقعی (متر)	مساحت واقعی (مربع متر)
دریچه کامپوزیتی ۱	۰,۳۵×۰,۲۳	۰,۰۸۰۵
دریچه کامپوزیتی ۲	۰,۷۱×۰,۳۱	۰,۲۲۰۱
سطوح متحرک	۰,۷۱×۰,۳۱	۰,۰۵
چوب	۰,۰۸×۱,۲۰	۰,۰۹۶
بالک‌های نوک بال	۰,۳۵×۰,۲۵	۰,۰۸۷۵
تراشه فلزی	۰,۵۵×۰,۰۳	۰,۱۶۵
ارابه فرود شکسته قسمت‌های فلزی	۰,۶×۰,۰۲	۰,۰۱۲





شکل ۵- خروجی الگوریتم پیشنهادی تشخیص (پیچ)



شکل ۶- خروجی الگوریتم پیشنهادی تشخیص (لاشه پرندگان)

برای الگوریتم پیشنهادی در بخش تشخیص بقایای اشیاء خارجی فعال از داده‌هایی همچون آتش‌سوزی (در اثر سانحه هواپیمایی، وجود علف‌های خشک اطراف باند فرودگاه و غیره) و حرکت پرندگان (از طریق محیط هوایی باند فرودگاه) و حرکت افراد جهت تشخیص استفاده می‌گردد، که در شکل ۷ علف‌های خشک شده اطراف باند فرودگاه نشان داده شده است.



شکل ۷- علف‌های خشک شده اطراف باند فرودگاه

۲	خروجی تصویر پس از پیاده سازی الگوریتم تفریق پس‌زمینه MOG و اعمال تمامی مراحل شکل ۲
۳	نمایشگر مربوط به ابعاد و اندازه بر حسب اندازه واقعی (متر)
۴	نمایشگر مربوط به ابعاد و اندازه بر حسب پیکسل
۵	تاریخ و ساعت به صورت زمان واقعی
۶	کلیدهای نقاب
۷	تنظیم میزان قدرت حذف ذرات اضافی در بخش هرس کردن
۸	تعداد بقایای اشیاء خارجی
۹	کلید توقف سیستم تشخیص بقایای اشیاء خارجی
۱۰	نمایشگر کیفیت و نوع تصویر
۱۱	تنظیمات مربوط به فونت و اندازه نوشته هشدار بر روی نمایشگر کاربر
۱۲	فعال سازی هر ابعاد و اندازه مورد نیاز شامل مساحت، محیط و غیره
۱۳	نمایشگر مربوط به ابعاد و اندازه به صورت سریع و زمان واقعی
۱۴	چراغ هشدار تشخیص بقایای اشیاء خارجی بر روی باند فرودگاه (خاموش)
۱۵	چراغ هشدار سطح بالا به تیم‌های آتش‌نشانی و بازرسی (خاموش)
۱۶	تنظیمات کنترلی مربوط به الگوریتم بستن
۱۷	تنظیمات کنترلی مربوط به فیلتر میانه جهت حذف نویز
۱۸	چراغ کالیبراسیون
۱۹	نمایشگر و تنظیم کننده میزان تاخیر در فریم‌ها
۲۰	تنظیمات مربوط به آستانه‌گذاری
۲۱	تنظیم نوع اشیاء و داده ورودی

در شکل ۵ و ۶ نمونه‌ای از فریم‌ها هنگام تشخیص بقایای اشیاء خارجی بر روی باند فرودگاه نشان داده شده است. و در جدول ۵ نیز خروجی الگوریتم پیشنهادی در فواصل مختلف نشان داده شده است.

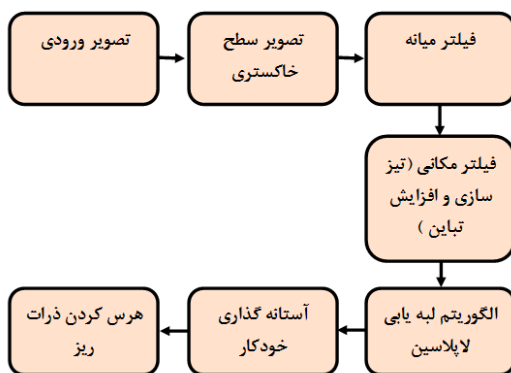
جدول ۵- خروجی الگوریتم پیشنهادی

اشیاء	مساحت (متر مربع)	مساحت (متر مربع)	مساحت (متر مربع)
	فاصله ۱۸ متری از دوربین	فاصله ۱۳ متری از دوربین	فاصله ۹ متری از دوربین
دریچه کامپوزیتی ۱	۰,۰۴۸	۰,۰۷۷	۰,۰۸۶
دریچه کامپوزیتی ۲	۰,۱۴۳	۰,۱۹۷	۰,۲۱۶
سطوح متحرک	۰,۰۸۴	۰,۱۲۱	۰,۰۷۷
بالک‌های نوک بال	۰,۰۶۸۷	۰,۰۷۷۶	۰,۰۸۷۷

همانطور که در شکل ۷ و ۱۰ نشان داده شده است ترک‌های موجود بر روی باند فرودگاه موجب ترکیدگی لاستیک‌ها و وارد شدن آسیب‌های جدی به هواپیما می‌گردد. بنابراین علاوه بر توسعه الگوریتمی برای تشخیص بقایای اشیاء خارجی، از تصاویر ارسالی جهت تشخیص ترک‌ها استفاده شده است. الگوریتم تشخیص ترک در شکل ۱۱ نشان داده است.



شکل ۱۰- ترک‌های روی باند فرودگاه مهرآباد (تهران)

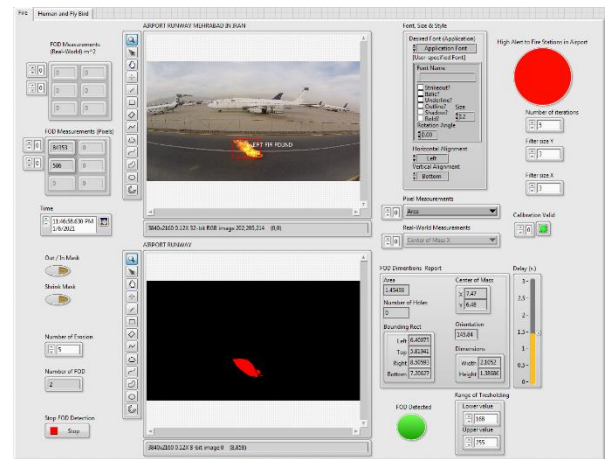


شکل ۱۱- شماتیک کلی الگوریتم تشخیص ترک بر روی باند فرودگاه بعد از پیاده سازی الگوریتم خروجی با دقت بالایی استخراج گردید که بستگی به مقدار حساسیت قابل تنظیم بوده و ترک‌های روی باند را تشخیص و در اختیار کاربر قرار داده است.

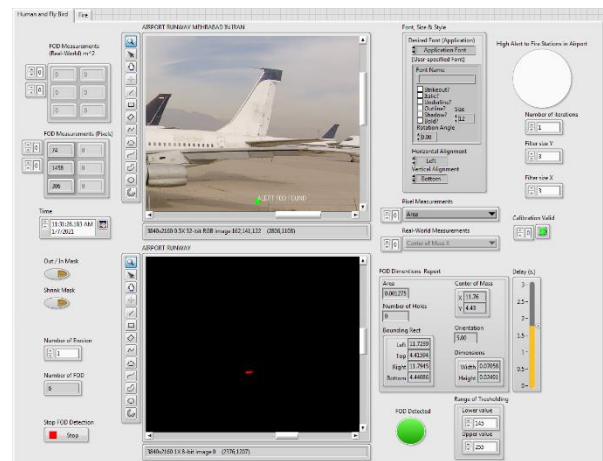


شکل ۱۲- خروجی الگوریتم تشخیص ترک با حساسیت کم

در خروجی برنامه پیشنهادی در این قسمت بعد از تشخیص اشیاء فعال بر روی باند فرودگاه اگر تعداد پیکسل‌های تعیین شده در الگوریتم در تصویر کم باشد سیستم به کاربر برج مراقبت هشدارهای لازم را (جهت رفع اشیاء فعال برای مثال آتش‌سوزی، توسط تیم‌های بازرسی فرودگاه) در ابعاد کم را می‌دهد اما اگر پیکسل‌های تصویر بیشتر از حد معمول بوده و با گذشت زمان به صورت لحظه‌ای در حال افزایش باشد برنامه به صورت خودکار و هوشمند هشدارهای در سطح بالا را به برج مراقبت و تیم‌های بازرسی و مهم‌تر از همه به تیم‌های آتش‌نشانی می‌دهد. در شکل ۸ و ۹ خروجی الگوریتم پیشنهادی جهت تشخیص بقایای اشیاء خارجی فعال نشان داده شده است.



شکل ۸- خروجی الگوریتم پیشنهادی تشخیص (آتش سوزی)



شکل ۹- خروجی الگوریتم پیشنهادی تشخیص (حرکت پرندگان)

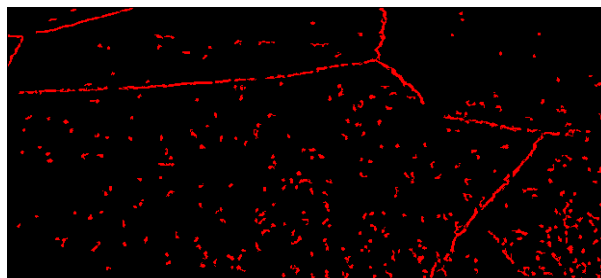
الگوریتم تشخیص ترک



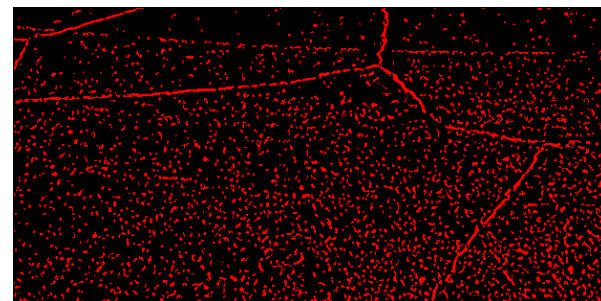
برای تعیین میزان کارایی الگوریتم پیشنهادی از میان مجموعه داده‌ها از بقایای اشیاء خارجی کامپوزیتی در فواصل مختلف و از بقیه داده‌ها در فواصل دلخواه (جدول ۶) استفاده کرده‌ایم. همانطور که در جدول ۷ نشان داده شده است بقایای اشیاء خارجی را در فواصل مختلف بر روی باند فرودگاه قرار داده و کارایی الگوریتم محاسبه شده است. همانطور که دیده شد الگوریتم پیشنهادی قادر است بقایای اشیاء خارجی (واشرها) با مساحت  $0.0023$  (متر مربع) که اندازه کوچکی است را با کارایی  $79\%$  و دریچه‌های دسترسی کامپوزیتی با مساحت  $0.2201$  (متر مربع) و اندازه متوسط را با کارایی  $98\%$  و همچنین تشخیص بقایای اشیاء خارجی فعال همچون آتش‌سوزی، حرکت نامنظم پرندگان و ترک‌ها را به‌صورت هوشمند و با دقت بالا تشخیص دهد. و هشدارهای سطح بالا و پایین (به‌صورت صوتی (آزیر) و نمایش هشدار در نمایشگر) لازم را به کاربر برج مراقبت و تیم‌های بازرسی و آتش‌نشانی با در اختیار گذاشتن اندازه و محل دقیق اشیاء می‌دهد.

در این مقاله سعی بر آن شده است تا الگوریتم پیشنهادی به‌صورت زمان واقعی، کاربرپسند، با محیط گرافیکی و قابل پیاده‌سازی در فرودگاه‌ها، مقرون بصره، بدون ایجاد اختلال در هواپیما و داده‌های ورودی آن نیز نزدیک به آنچه در واقعیت رخ می‌دهد باشد. پیشنهادات ما برای ادامه کار در آینده بشرح زیر است:

- ۱- پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی با کارایی بالا.
- ۲- در بعضی از مواقع زاویه تابش نور در محیط موجب ایجاد سایه بقایای اشیاء بر روی باند می‌گردد که این سایه ایجاد شده در مواقع استفاده از الگوریتم تفریق پس‌زمینه موجب می‌گردد که سایه نیز جزئی از اشیاء تلقی گردد و این کار دقت خروجی الگوریتم را پایین می‌آورد بنابراین پیشنهاد می‌شود که الگوریتمی جهت حذف سایه‌ها توسعه پیدا کند.
- ۳- استفاده از چندین دوربین (با توجه به طول باند فرودگاه) به صورتی که با همدیگر همپوشانی داشته باشند.



شکل ۱۳- خروجی الگوریتم تشخیص ترک با حساسیت متوسط



شکل ۱۴- خروجی الگوریتم تشخیص ترک با حساسیت بسیار بالا

### نتیجه‌گیری

تشخیص بقایای اشیاء خارجی فعال و غیرفعال برای تامین ایمنی هواپیما و باند فرودگاه بسیار ضروری است. اگرچه چندین سیستم تشخیص برای رفع مشکل بقایای اشیاء خارجی وجود دارد اما در این مقاله یک راه حل کاملاً عملی، کم هزینه، کاربرپسند با محیط گرافیکی و دقیق برای دستیابی به یک الگوریتم تشخیص بقایای اشیاء خارجی ارائه شده است. هدف اصلی الگوریتم پیشنهادی، تشخیص حضور بقایای اشیاء خارجی است که ممکن است شامل اشیاء شکسته و تعداد زیادی از اشیاء ناشناخته باشد که نمی‌توان آنها را طبقه‌بندی کرد. بنابراین مطمئن‌ترین روش برای تشخیص بقایای اشیاء خارجی در این نوع از کاربردها نظارت ناحیه‌ای بصورت فریم به فریم و استفاده از الگوریتم تفریق پس‌زمینه مبتنی بر توزیع گاوسی (همانند الگوریتم تفریق پس‌زمینه MOG) است. در این الگوریتم پیشنهادی در صورت استفاده از دوربین‌های با میدان دید  $120^\circ$  درجه و نصب دوربین در ارتفاع  $5$  متری می‌توان  $45$  متر از طول باند فرودگاه را نظارت نمود. نتایج ذکر شده در جدول ۵ نشان داد که با افزایش فاصله از دوربین دقت تشخیص بقایای اشیاء خارجی پایین می‌آید، بنابراین بایستی در عمل و به‌عنوان پیشنهاد جهت ادامه کار در تحقیقات آینده دوربین‌ها با همدیگر همپوشانی داشته و از دوربین‌های استریو جهت کالیبراسیون و تعیین عمق دقیقتر استفاده گردد.

۹۶٪	۱۳	دریچه	
۶۰٪	۱۸	کامپوزیتی ۱	
۹۸٪	۹	دریچه	۲
۹۰٪	۱۳	کامپوزیتی ۲	
۶۵٪	۱۸	سطوح	
۶۵٪	۹	متحرک	۳
۴۱٪	۱۳	هواپیما	
۶۰٪	۱۸	بالک‌های نوک	۴
۱۰۰٪	۹	بال	
۸۹٪	۱۳		
۷۹٪	۱۸		

## منابع و مراجع

- [1] C. V. Oster Jr, J. S. Strong and C. K. Zorn, "Analyzing aviation safety: Problems, challenges, opportunities," *Research in Transportation Economics*, v. 43, n. 1, pp.148164, 2013.
- [2] Y. Zhongda, L. Mingguang and C. Xiuquan, "Research and implementation of fod detector for airport runway," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, vol. 304, p. 032 050, 2019.
- [3] H. Aftab, RSM. Minhas, "Still image based foreign object debris (fod) detection system" *National University of Sciences and Technology, Islamabad, Pakistan, Sci. Tech. and Dev. V. 33, n. 1, pp. 30-33, 2014.*
- [4] N. Rajamurugu, P. Karthikeyan, K. Ajithkumar, A. I. Hussain and V. Vimalprakash, "A study of foreign object damage (fod) and prevention method at the airport and aircraft maintenance area" *2016 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 152 012038.
- [5] Foreign Object Debris, [https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero\\_01/textonly/s01txt.html](https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_01/textonly/s01txt.html).
- [6] Wikipedia contributors, *Air france flight 4590* — *Wikipedia, the free encyclopedia*. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Air\\_France\\_Flight\\_4590&oldid=956547803](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Air_France_Flight_4590&oldid=956547803).
- [7] E. K. KCAW, *How a deer can cause a plane crash*, KTOO, Library Catalog: [www.ktoo.org](http://www.ktoo.org) Section: Southeast, Feb. 2, 2016. Available: <https://www.ktoo.org/2016/02/01/124024>.
- [8] "Flight canceled after plane crashes into kangaroo," *usatoday*, Aug. 3, 2015, Library Catalog: [eu.usatoday.com](http://eu.usatoday.com). Available: <https://>

۴- استفاده از سیستم بینایی استریو<sup>۱</sup> جهت تشخیص بقایای اشیاء خارجی جامانده بر روی باند فرودگاه.

## جدول ۶- محاسبه کارایی الگوریتم پیشنهادی تشخیص

ردیف	انواع بقایای اشیاء خارجی جامانده بر روی باند فرودگاه	مساحت (متر مربع) واقعی اشیاء	مساحت (متر مربع) خروجی الگوریتم	کارایی الگوریتم پیشنهادی
۱	تکه‌های چوب	۰,۰۹۶	۰,۱۰۴۸	٪۹۱
۲	تراشه فلزی	۰,۱۶۵	۰,۲۳۹	٪۷۰
	ارابه فرود			
۳	شکسته قسمت‌های فلزی	۰,۰۱۲	۰,۰۱۵	٪۸۰
	ارابه فرود			
۴	شکسته قسمت‌های لاستیکی	۰,۰۴۵	۰,۰۲۵۶	٪۵۷
	ارابه فرود			
۵	باک سوخت اضافی	۰,۱۲۶۹	۰,۰۹۱	٪۷۲
	واشرها	۰,۰۰۲۳	۰,۰۰۲۹	٪۷۹
۷	پیچ‌ها	۰,۰۰۵۴	۰,۰۰۸۶	٪۶۳
۸	آچار آلنی	۰,۰۰۲۸۷۵	۰,۰۰۲۶۷	٪۹۳
۹	انبر قفلی	۰,۰۱۱	۰,۰۱۱	٪۱۰۰
۱۰	آچار ۱	۰,۰۱۰۵	۰,۰۱۵	٪۷۰
۱۱	آچار ۲	۰,۰۰۹	۰,۰۱۷	٪۶۰
۱۲	لاشه پرندگان	۰,۱۸	۰,۱۵۴	٪۸۹
۱۳	ملخ	۰,۰۲۵۳	۰,۰۲۳۸	٪۹۴
۱۴	سنگ ریزه	۰,۰۱۵	۰,۰۱۳	٪۸۷

## جدول ۷- محاسبه کارایی الگوریتم پیشنهادی تشخیص در فواصل مختلف

ردیف	انواع بقایای اشیاء خارجی جامانده بر روی باند فرودگاه	محدوده تشخیص (متر)	کارایی الگوریتم پیشنهادی
۱		۹	۹۳٪

<sup>۱</sup> Stereo Vision

short ranges,” *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, vol. 33, no. 12, pp. 1227–1238, 2012.

- [21] K. Mazouni, A. Zeitler, J. Lanteri, C. Pichot, J.-Y. Dauvignac, C. Migliaccio, N. Yonemoto, A. Kohmura and S. Futatsumori, “76.5 ghz millimeter-wave radar for foreign objects debris detection on airport runways,” *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, vol. 4, no. 3, pp. 317–326, 2012.
- [22] F. Nsengiyumva, C. Pichot, I. Aliferis, J. Lanteri and C. Migliaccio, “Millimeter-wave imaging of foreign object debris (fod) based on twodimensional approach,” in *2015 IEEE Conference on Antenna Measurements & Applications (CAMA)*, IEEE, pp. 1–4, 2015.
- [23] X. Qunyu, N. Huansheng and C. Weishi, “Video-based foreign object debris detection,” in *2009 IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques*, IEEE, pp. 119–122, 2009.
- [24] W. Chen, Q. Xu, H. Ning, T. Wang and J. Li, “Foreign object debris surveillance network for runway security,” *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2011.
- [25] L. Peng, W. Chao, L. Shuangmiao and F. Baocai, “Research on Crack Detection Method of Airport Runway Based on Twice-Threshold Segmentation,” *2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control (IMCCC)*, pp. 1716–1720, 2015.
- [26] Cha, Y., W. Choi and O. Buyukozturk. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. pp. 1-18, 2017.
- [27] X. Cao, P. Wang, C. Meng, X. Bai, G. Gong, M. Liu and J. Qi, “Region based cnn for foreign object debris detection on airfield pavement,” *Sensors*, vol. 18, no. 3, p. 737, 2018.
- [28] S. Guennouni, A. Ahaitouf and A. Mansouri, “Multiple object detection using opencv on an embedded platform,” in *2014 Third IEEE International Colloquium in Information Science and Technology (CIST)*, IEEE, pp. 374–377, 2014.
- [29] <http://dataconservation.com/Resources/Article/Safety-on-the-Runway>.
- www . usatoday . com / story / travel / roadwarriorvoices / 2015 / 08 / 03 / flight - canceled - after plane - crashes - into - kangaroo / 83842284.
- [9] “FAA Wildlife Strike Database,” Available: <https://wildlife.faa.gov/home>.
- [10] “Foreign Object Debris Introduction,” en-US, *ReadyMax*, Jan. 2020, Library Catalog: [www.readymax.com](http://www.readymax.com) Section: Blog. Available: <https://www.readymax.com/foreign-object-debris-introduction>.
- [11] AC 150/5210-24 - Airport Foreign Object Debris (FOD) Management., [https://www.faa.gov/airports/resources/advisory\\_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150\\_5210-24](https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5210-24).
- [12] R. Hussin, N. Ismail and S. Mustapa, “A study of foreign object damage (fod) and prevention method at the airport and aircraft maintenance area,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, vol. 152, p. 012 038, 2016.
- [13] Wikipedia contributors, Us airways flight 1549—Wikipedia, the free encyclopedia, Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=US\\_Airways\\_Flight\\_1549&oldid=952463614](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=US_Airways_Flight_1549&oldid=952463614).
- [14] Concorde crash in 2000, <https://www.bbc.com/news/world-europe-11923556>.
- [15] Z. Gui and H. Li, “Automated Defect Detection and Visualization for the Robotic Airport Runway Inspection,” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 76100–76107, 2020.
- [16] “Bioseco-solutions for bird protection,” Available: <http://www.bioseco.com>.
- [17] “Innovative system for preventing bird-aircraft collisions | Bioseco – solutions for bird protection,” Available: <http://bioseco.com/projects>.
- [18] S. Yahyaai1, A. Khan, M. Siyabi, A. Mehmood and T. Hussain, “LiDAR based remote sensing system for foreign object debris detection (FODD),” *Journal of Space Technology*, Jul. 2020.
- [19] A. Elrayes, M. H. Ali, A. Zakaria and M. H. Ismail, “Smart airport foreign object debris detection rover using LiDAR technology,” *Internet of Things*, vol. 5, pp.1-11, 2019.
- [20] E. Yigit, S. Demirci, A. Unal, C. Ozdemir and A. Vertiy, “Millimeter-wave ground-based synthetic aperture radar imaging for foreign object debris detection: Experimental studies at