Accepted Manuscript

Accepted Manuscript (Uncorrected Proof)

Title: Strategic Applications of Airborne, UAV-Based, and Spaceborne LiDAR in Crisis Management: A Comprehensive Technical and Economic Analysis

Authors: Masoud Khoshsima[1,*]

1. *Iranian Space Research Center, Tehran, Iran*

To appear in: **Disaster Prevention and Management Knowledge**

Received date: 2026/05/8

Accepted date: 2026/08/19

First Online Published: 2026/10/28

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

This is a “Just Accepted” manuscript, which has been examined by the peer-review process and has been accepted for publication. A “Just Accepted” manuscript is published online shortly after its acceptance, which is prior to technical editing and formatting and author proofing. Archives of Rehabilitation provides “Just Accepted” as an optional service which allows authors to make their results available to the research community as soon as possible after acceptance. After a manuscript has been technically edited and formatted, it will be removed from the “Just Accepted” Website and published as a published article. Please note that technical editing may introduce minor changes to the manuscript text and/or graphics which may affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

Please cite this article as:

Khoshsima, M. [Strategic Applications of Airborne, UAV-Based, and Spaceborne LiDAR in Crisis Management: A Comprehensive Technical and Economic Analysis]. Disaster Prevention and Management Knowledge. Forthcoming 2026.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

نسخه پذیرفته‌شده پیش از انتشار

عنوان: تحلیل راهبردی لیدارهای هواپایه، پهپادی و فضایی در مدیریت بحران با تاکید بر پارامترهای فنی و اقتصادی

نویسندگان: مسعود خوش سیما[1]*

1. پژوهشگاه فضایی ایران، تهران، ایران.

نشریه: **دانش پیشگیری و مدیریت بحران**

تاریخ دریافت: 1405/2/18

تاریخ پذیرش: 1405/5/28

تاریخ انتشار اولیه: 1405/08/05

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

این نسخه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» مقاله است که پس از طی فرایند داوری، برای چاپ، قابل پذیرش تشخیص داده شده است. این نسخه در مدت کوتاهی پس از اعلام پذیرش به صورت آنلاین و قبل از فرایند ویراستاری منتشر می‌شود. نشریه آرشیو توانبخشی گزینه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» را به عنوان خدمتی به نویسندگان ارائه می‌دهد تا نتایج آن‌ها در سریع‌ترین زمان ممکن پس از پذیرش برای جامعه علمی در دسترس باشد. پس از آنکه مقاله‌ای فرایند آماده سازی و انتشار نهایی را طی می کند، از نسخه «پذیرفته‌شده پیش از انتشار» خارج و در یک شماره مشخص در وب‌سایت نشریه منتشر می‌شود. شایان ذکر است صفحه آرایی و ویراستاری فنی باعث ایجاد تغییرات صوری در متن مقاله می‌شود که ممکن است بر محتوای آن تأثیر بگذارد و این امر از حیطه مسئولیت دفتر نشریه خارج است.

لطفا این‌گونه استناد شود:

Khoshsima, M. [Strategic Applications of Airborne, UAV-Based, and Spaceborne LiDAR in Crisis Management: A Comprehensive Technical and Economic Analysis]. Disaster Prevention and Management Knowledge. Forthcoming 2026.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

Abstract

This study aims to elucidate the strategic role of LiDAR in disaster events and their associated crisis management by analyzing the capabilities and limitations of LiDAR-based remote sensing technology. With a particular focus on the performance of UAV-, airborne-, and spaceborne LiDAR systems across different disaster scenarios—especially floods and earthquakes—it provides both a technical and an economic assessment. The results indicate that LiDAR, with vertical accuracies in the range of 5–10 cm for airborne and UAV systems and very high spatial resolution of approximately 0.3–0.5 m, enables the generation of digital terrain and surface models with uncertainties of less than 15% in elevation changes and three-dimensional displacement estimates. It can also improve the effectiveness of flood modeling and structural damage assessment by approximately 30–40% compared with low-resolution elevation data. From an operational perspective, UAV-based LiDAR, owing to its very high point density (>100 points/m²) and rapid effective deployment time on the order of hours to one day, represents the most suitable option for rapid emergency response and localized urban-scale damage assessment. In contrast, airborne LiDAR, by balancing accuracy and spatial coverage over scales of 10210^2102–10410^4104 km², is more efficient for analyzing larger-scale crises such as extensive flooding and regional landslides. Although spaceborne LiDAR offers lower spatial resolution, its global coverage, temporal repeatability, and very low end-user data cost make it a strategic tool for long-term hazard monitoring and environmental change analysis at the national scale. From a decision-making perspective, the findings show that hybrid platform strategies achieve the highest overall scores in most disaster scenarios. This result suggests that integrating spaceborne LiDAR for broad monitoring, airborne LiDAR for regional analysis, and UAV-based LiDAR for detailed local surveys provides the best balance among technical, economic, and operational criteria. Market projections further suggest that the LiDAR systems market will grow by approximately 12% over the next five years, reaching a market size of around USD 1 billion.

Keywords: LiDAR, Flood, Remote sensing, Air and Space born platforms, crisis management

نسخه پیش از انتشار

چکیده

این پژوهش با هدف تبیین نقش راهبردی لیدار در حوادث و مدیریت بحران ناشی از آن، به تحلیل نظامند و مرور توانمندی‌ها، محدودیت‌های فناوری سنجش از دور لیدار می پردازد و با تمرکز بر کارایی سامانه‌های لیدار پهپادی، هوا و فضاپایه در سناریوهای مختلف بحران، به‌ویژه سیل و زلزله، تحلیلی فنی و اقتصادی ارائه می‌کند. یک چارچوب یکپارچه برای مقایسه و تلفیق سامانه‌های لیدار در سه بستر فضایی، هواپایه و پهپادی، با در نظر گرفتن همزمان معیارهای فنی، اقتصادی و عملیاتی در سناریوهای مختلف مدیریت بحران است که با رویکردی نوآورانه به توسعه یک مدل تصمیم‌یار برای انتخاب بهینه پلتفرم منجر می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که لیدار با دقت عمودی در بازه ۵–۱۰ سانتی‌متر (سامانه‌های هواپایه و پهپادی) و تفکیک مکانی بسیار بالا تا حدود ۰٫۳–۰٫۵ متر، مدل‌های رقومی زمین و سطح با عدم‌قطعیت کمتر از ٪۱۵ تغییرات ارتفاعی و جابه‌جایی‌های سه‌بعدی را برآورد می‌کند و می‌تواند اثربخشی مدل‌سازی سیلاب و ارزیابی خسارات سازه‌ای را حدود ۳۰–٪۴۰ نسبت به داده‌های ارتفاعی کم‌تفکیک بهبود دهد. از منظر راهبرد عملیاتی، لیدار پهپادی با تراکم نقطه‌ای بسیار بالا (100< نقطه بر مترمربع) و زمان موثر در حد ساعت تا یک روز، مناسب‌ترین گزینه برای پاسخ اضطراری سریع و ارزیابی موضعی خسارات در مقیاس شهری است؛ در مقابل، لیدار هواپایه با ایجاد توازن میان دقت و پوشش مکانی در مقیاس 10^{2}–10^{4} کیلومتر مربع، برای تحلیل بحران‌های گسترده‌تر نظیر سیلاب‌های پهنه‌ای و رانش‌های منطقه‌ای کارآمدتر است. لیدار فضاپایه، علی‌رغم تفکیک مکانی کمتر، به‌واسطه پوشش جهانی، تکرارپذیری زمانی و هزینه بسیار پایین داده برای کاربر نهایی، ابزار راهبردی پایش بلندمدت مخاطرات و تحلیل روندهای تغییرات محیطی در مقیاس ملی محسوب می‌شود. از منظر تصمیم‌سازی، نتایج نشان می دهد که راهبردهای ترکیبی پلتفرمها در اغلب سناریوهای بحرانی بالاترین امتیاز نهایی را کسب می‌کنند. این نتیجه بیان میکند که ترکیب داده‌های لیدار فضایی برای پایش گسترده، لیدار هواپایه برای تحلیل منطقه‌ای و لیدار پهپادی برای برداشت‌های دقیق موضعی، بهترین توازن میان معیارهای فنی، اقتصادی و عملیاتی را فراهم می‌کند. برآوردها نشان می‌دهد که بازار سامانه‌های لیدار تا ۵ سال آینده با افزایش حدود ۱۲ درصدی به حجم مارکت یک میلیارد دلار خواهد رسید.

واژگان کلیدی: ***لیدار، سکوهای هوا و فضاپایه، مدیریت بحران، سنجش‌ازدور، سیلاب***

نسخه پیش از انتشار

۱. مقدمه

افزایش فراوانی، شدت و تنوع بحران‌های طبیعی و انسان ساز در دهه‌های اخیر، از جمله زلزله‌ها، سیلاب، رانش زمین و آتش‌سوزی‌های جنگلی و جنگها، مدیریت بحران را به یکی از چالش‌های اصلی برنامه‌ریزی و حکمرانی تبدیل کرده و ضرورت توسعه و به‌کارگیری فناوری‌های نوین در مدیریت بحران را بیش از پیش آشکار ساخته است (دابه و همکاران، ۲۰۱۶) و (گزارش دفتر کاهش خطر بلایای طبیعی سازمان ملل متحد[1]، ۲۰۱۵) . مدیریت بحران به‌عنوان یک فرآیند چندمرحله‌ای، شامل پیشگیری و کاهش خطر، آمادگی، پاسخ اضطراری و بازسازی، نیازمند دسترسی به داده‌های مکانی دقیق، به‌روز و سه‌بعدی از سطح زمین، سازه‌ها و پوشش گیاهی است که به‌شدت تحت تأثیر ناهمواری‌های توپوگرافی و ساختارهای فضایی قرار دارند. (گیس و همکاران، ۲۰۱۵)، (پیتوره و همکاران،۲۰۱۷) و (دانبارو همکاران، ۲۰۰۳) روش‌های سنتی پایش میدانی و برداشت داده، به‌دلیل محدودیتهای سیستمی در دقت، سرعت و پوشش مکانی، اغلب پاسخگوی نیازهای پیچیده مدیریت بحران‌های امروزی را نمی‌باشند. فناوری‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور نقش مهمی در پایش، پوشش گسترده و تحلیل مخاطرات ایفا می‌کنند.

فناوری لیدار (LiDAR[2]) به‌عنوان دقیق ترین ابزار سنجش از دور، امکان برداشت مستقیم اطلاعات سه‌بعدی از سطح زمین و عوارض طبیعی و مصنوعی را با دقت بالا فراهم می‌کند. برخلاف داده‌های اپتیکی و راداری که نسبت به ساختار عمودی عوارض حساسیت محدودی دارند، لیدار قادر است توزیع عمودی ارتفاع را با دقت سانتی‌متری ثبت کند (وودر و همکاران، ۲۰۱۲). در سال‌های اخیر، استفاده از لیدار (نصب شده بر سکوهای هوایی) به‌دلیل انعطاف‌پذیری عملیاتی، کاهش هزینه‌ها و دستیابی به تراکم نقطه‌ای بالا، مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است (تریپکلی و همکاران، ۲۰۲۲).

بر اساس پژوهش دابه و همکاران (۲۰۱۶)، پارامترهایی نظیر ارتفاع عوارض، ساختار عمودی پوشش گیاهی، ناهمواری سطح زمین و حجم زیست‌توده با دقت بالا توسط لیدار استخراج میشود. این ویژگی در مدیریت بحران، به‌ویژه در مرحله پیشگیری و آمادگی، نقش کلیدی ایفا می‌کند؛ زیرا مدل‌های رقومی زمین و سطح (DSM) استخراج‌شده از لیدار، پایه اصلی شبیه‌سازی سیلاب، تحلیل پایداری شیب‌ها و شناسایی مناطق پرخطر محسوب می‌شوند. البته یکی از چالش‌های اصلی استفاده گسترده از لیدار، هزینه و حجم بالای داده‌ها است، اما راهبردهای نمونه‌برداری و تلفیق لیدار با داده‌های ماهواره‌ای می‌تواند این محدودیت‌ها را کاهش دهد (وودر و همکاران، ۲۰۱۲).

لیدار در فاز پیشگیری و آمادگی، پاسخ به بحران و در ارزیابی خسارات پس از بحران مطرح می باشد. در فاز پیش از بحران، لیدار به‌عنوان ابزاری کلیدی برای تهیه نقشه‌های خطر شناخته می‌شود. دقت بالای داده‌های ارتفاعی لیدار امکان شناسایی دقیق مناطق مستعد سیلاب، گسل‌های فعال، شیب‌های ناپایدار و تغییرات ریزتوپوگرافی را فراهم می‌کند. مطابق با تحلیل (وودر و همکاران، ۲۰۱۲)، توانایی لیدار در ثبت ساختار عمودی زمین باعث می‌شود که مدل‌سازی فرآیندهای فیزیکی با عدم‌قطعیت کمتر انجام شود. مدیریت مؤثر بحران سیل، از پرتکرارترین و پرهزینه‌ترین مخاطرات طبیعی در جهان، مستلزم دسترسی به داده‌های مکانی دقیق، به‌روز و قابل اتکا از توپوگرافی، کاربری اراضی و تغییرات سطح زمین است (تریپکلی و همکاران، ۲۰۲۲). لیدار نسبت به روش‌های زمینی، سرعت پوشش مکانی بسیار بالاتری دارد و نیاز به حضور فیزیکی در مناطق پرخطر را کاهش می‌دهد (وودر و همکاران،

[1] UNISDR
[2] Light Detection and Ranging

۲۰۱۲) . در مرحله پاسخ به بحران، سرعت بالای برداشت داده‌های لیدار هوابرد و پهپادی امکان تهیه اطلاعات به‌روز از مناطق آسیب‌دیده را فراهم می‌سازد، بدون آنکه نیاز به حضور میدانی در محیط‌های پرخطر وجود داشته باشد.این ویژگی باعث کاهش خطر انسانی و افزایش کارایی عملیات مدیریت بحران در مقیاس محلی و منطقه‌ای می‌شود . در مرحله بازسازی و ارزیابی خسارات، یکی از مهم‌ترین قابلیت‌های لیدار، امکان مقایسه داده‌های پیش و پس از وقوع حادثه است. اختلاف‌گیری بین مدل‌های ارتفاعی، امکان برآورد کمی تغییرات سطح زمین، حجم مواد جابه‌جاشده، تخریب پوشش گیاهی و میزان خسارات فیزیکی را فراهم می‌کند. این قابلیت، که در حسگرهای اپتیکی به‌دلیل اشباع طیفی و محدودیت دید عمودی به‌خوبی در دسترس نیست، یکی از مزیت‌های راهبردی لیدار در مدیریت بحران محسوب می‌شود (دابه و همکاران، ۲۰۱۶). در مقایسه با روش‌های فتوگرامتری مبتنی بر تصاویر اپتیکی پهپادی، لیدار مزیت نفوذ نسبی در پوشش گیاهی و استخراج مستقیم ساختار سه‌بعدی عوارض سطحی را داراست. این موضوع باعث می‌شود که در مناطق شهری متراکم و نواحی دارای پوشش گیاهی، مدل‌های ارتفاعی استخراج‌شده از لیدار و مدل‌سازی هیدرولوژیکی دقیق و تحلیل خطر سیلاب در مقیاس‌های محلی و شهری از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار باشند(جاکوویچ و همکاران،۲۰۱۹) و (تریپکلی و همکاران، ۲۰۲۲). همچنین لیدارهای فضایی با فراهم‌سازی داده‌های سه‌بعدی پیوسته در مقیاس‌های مختلف، امکان تحلیل ساختار اهداف را با دقت بالا فراهم می‌کنند. همچنین، ترکیب داده‌های چندمقیاسی لیدار موجب بهبود برآورد پارامترهای ساختار عمودی پوشش گیاهی شده است. این قابلیت‌ها نقش مهمی در پایش اکوسیستم‌ها و کاربردهای مدیریت منابع طبیعی و بحران ایفا می‌کنند (مندل و همکاران، ۲۰۲۳)

بر اساس پایگاه داده EM-DAT[3] ، طی یک دهه اخیر به‌طور متوسط زلزله سالانه بیش از ۲۶ هزار تلفات انسانی و حدود ۱۰ میلیارد دلار خسارت اقتصادی در سطح جهان ایجاد کرده‌اند (گوها-ساپیر و همکاران، ۲۰۱۸) . (مطالعات نشان می‌دهد که بخش عمده این خسارات ناشی از آسیب یا فروریزش سازه‌ها است (اسپنس و کابورن، ۲۰۰۲) ازاین‌رو ارزیابی سریع و دقیق خسارت ساختمانی پس از زلزله در مراحل پاسخ اضطراری و بازسازی می‌کند (ماکباگ و همکاران، ۲۰۲۲). روش‌های متداول مبتنی بر بازرسی‌های میدانی و ارزیابی بصری ساختمان‌به‌ساختمان اگرچه قابل اعتماد هستند، اما در مقیاس شهری و منطقه‌ای زمان‌بر، پرهزینه بوده و معمولاً به پوشش مکانی محدود منجر می‌شوند.(فلورکا و همکاران، ۲۰۲۱) و (ویت ورد و همکاران، ۲۰۲۲) در مقابل، لیدار، امکان برداشت اطلاعات سه‌بعدی و ساختار عمودی سازه‌ها را با دقت بالا و در گستره وسیع فراهم می‌سازد و به‌طور فزاینده‌ای در ارزیابی خسارت زلزله مورد توجه قرار گرفته است. (واگت و همکاران، ۲۰۰۷) روش‌های مبتنی بر لیدار عمدتاً بر تحلیل تغییرات هندسی و ارتفاعی ساختمان‌ها از طریق مقایسه داده‌های پیش و پس از حادثه استوارند (دوو و همکاران، ۲۰۰۲) افزون بر این، پژوهش‌های اخیر نشان داده‌اند که تلفیق داده‌های لیدار با تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند دقت ارزیابی خسارت پس از زلزله را به‌طور معناداری افزایش دهد و پشتیبانی مؤثرتری از تصمیم‌گیری در مدیریت بحران فراهم آورد (اسماعیل زاده و همکاران، ۲۰۲۲) و (غفاریان و امتحانی ۲۰۲۱). براساس پژوهش سوگیراتو و همکاران، ترکیب پهپاد و فناوری لیدار به‌عنوان روشی کارآمد، امکان پایش سریع و دقیق وضعیت روسازی جاده‌ها را فراهم می‌کند و محدودیت‌های روش‌های سنتی را کاهش می‌دهد. در این رویکرد، مدل‌های سه‌بعدی سطح جاده از طریق ابرنقاط تولید شده و شاخص PCI برای ارزیابی وضعیت روسازی به‌کار گرفته می‌شود. نتایج نشان‌دهنده دقت بالا (حدود ۹۳.۷٪) و کارایی مناسب این روش در پایش زیرساخت‌های حمل‌ونقل است(سوگیراتو و همکاران، ۲۰۲۵). داده‌های لیدار با چگالی بالا و دقت هندسی مناسب، امکان استخراج دقیق پارامترهای توپوگرافی و ساختاری را در محیط‌های پیچیده فراهم می‌کنند و در پایش مخاطرات طبیعی نقش مؤثری دارند. همچنین، ادغام لیدار با سایر داده‌های سنجش‌ازدور موجب بهبود مدل‌سازی و تحلیل

[3] Emergency Events Database

تغییرات محیطی در مقیاس‌های مختلف می‌شود. این ویژگی‌ها باعث شده است که لیدار به‌عنوان ابزاری کلیدی در ارزیابی ریسک و مدیریت بحران مورد توجه قرار گیرد. (سان، ۲۰۲۴)

مطالعه تریپکلی و همکاران (۲۰۲۲) نشان می‌دهد که داده‌های لیدار امکان تولید مدل‌های رقومی زمین با تفکیک مکانی بسیار بالا (تا ۰.۳ متر) و دقت عمودی در حد چند سانتی‌متر را فراهم می‌کنند. این ویژگی به‌ویژه در محیط‌های شهری و مناطق دارای ریزتوپوگرافی پیچیده، برتری قابل‌توجهی نسبت بهDEM های ماهواره‌ای با تفکیک مکانی متوسط) ایجاد می‌کند. نتایج این پژوهش بیانگر آن است که استفاده ازDEM های با تفکیک پایین می‌تواند منجر به هموارسازی بیش‌ازحد ناهمواری‌های زمین و در نتیجه بروز خطاهای قابل‌توجه در تحلیل‌های هیدرولوژیکی و مکانی شود. تریپکلی و همکاران (۲۰۲۲)

مطابق با پژوهشهای (مویا و همکاران، ۲۰۱۸؛ لیو و یامکیزی۲۰۱۸؛ ساگنیتی۲۰۲۰) روش‌های تشخیص تغییر مبتنی بر داده‌های ارتفاعی لیدار هوابرد برای شناسایی و طبقه‌بندی ساختمان‌های فروریخته پس از زمین‌لرزه بسیار اثر بخشند. دقت استخراج مختصات سه‌بعدی عوارض سطح زمین توسط لیدار، معمولاً در حدود ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر در راستای قائم و ۱۰ تا ۲۵ سانتی‌متر در راستای افقی گزارش شده است (نیسن و همکاران ۲۰۱۲). در بسیاری از مطالعات، خسارت ساختمانی از طریق تحلیل تغییرات ارتفاع ساختمان‌ها و مقایسه مدل‌های رقومی سطح (DSM) پیش و پس از زلزله شناسایی شده است؛ با این حال، به دلیل ایجاد جابجایی‌های افقی زمین در اثر زلزله، هم‌ترازی افقیDSM ها به‌عنوان یک مرحله پیش‌پردازشی ضروری در نظر گرفته می‌شود. مویا و همکاران، ۲۰۱۸ . این رویکرد عمدتاً قادر به شناسایی خساراتی است که با کاهش قابل‌توجه ارتفاع یا فروپاشی کامل سازه همراه باشند (غفاریان و همکاران، ۲۰۱۸). اگرچه این روش‌ها در تفکیک ساختمان‌های به‌شدت آسیب‌دیده از ساختمان‌های سالم عملکرد مناسبی دارند، اما در برآورد کمّی شدت خسارت، به‌ویژه در سطوح خفیف تا متوسط، با محدودیت مواجه‌اند، زیرا عمدتاً بر ویژگی‌های فیزیکی بام ساختمان نظیر ارتفاع، شیب و شکل هندسی متکی هستند و اطلاعاتی درباره مکانیزم‌های خرابی سازه‌ای ارائه نمی‌دهند. بررسیهای دیگری نشان می‌دهد که لیدار در ارزیابی خسارات جنگهای اخیر، به‌ویژه در قالب داده‌های چندزمانه ابزاری مؤثر برای تشخیص، کمی‌سازی و تحلیل تخریب‌های ناشی از جنگ نظامی است. در این رویکرد، ابرنقاط مربوط به قبل و بعد از جنگ با یکدیگر مقایسه شده و تغییرات هندسی ساختمان‌ها استخراج می‌شود.
پردازش داده های لیدار، تحلیل آماری پارامترهایی مانند مساحت، حجم و ارتفاع امکان برآورد کمی خسارات را فراهم می‌کند. مطالعه موردی شهر خارکیف اوکراین (کاستریکوف و سروهین، ۲۰۲۵) نشان می‌دهد که الگوهای تغییر ناشی از جنگ با توسعه عادی شهری تفاوت معناداری دارند و می‌توان از این تفاوت برای تفکیک تخریب‌های جنگی از تغییرات معمول شهری استفاده کرد. همچنین نتایج نشان می‌دهد دقت برآوردهای هندسی (مساحت و حجم) در محدوده قابل قبول (حدود ۱–۳٪ خطا) قرار دارد. با وجود مطالعات متعدد در زمینه کاربرد لیدار، اغلب پژوهش‌ها به بررسی یک نوع پلتفرم یا یک جنبه خاص (فنی یا کاربردی) محدود شده‌اند. در این پژوهش، با رویکردی یکپارچه، عملکرد سامانه‌های لیدار فضاپایه، هواپایه و پهپادی به‌صورت همزمان و بر اساس معیارهای چندگانه فنی، اقتصادی و عملیاتی تحلیل شده و یک چارچوب تصمیم‌یار برای انتخاب بهینه فناوری در سناریوهای مختلف مدیریت بحران ارائه می‌شود که بیانگر نوآوری اصلی این مطالعه است. هدف از این مقاله معرفی و جانمایی نقش این سامانه‌ها در مدیریت بحران ناشی از حوادث با در نظر گرفتن مشخصات فنی و تاکید بر اثرگذاری، ارائه تصویری جامع از نقش فناوری لیدار در بهبود کارایی مدیریت بحران است. در ادامه با تحلیل فناوری سکوهای هوا و فضایی، تشریح هزینه‌ها، مزایا و محدودیتها، بهره گیری از این فناوری نوین در بحران‌ها و مدیریت آنرا در غالب یک مدل مفهومی پیشنهادی عملیاتی ارائه خواهد شد.

۲- روش شناسی پژوهش:

این پژوهش از نوع مرور تحلیلی نظام‌مند است که با هدف ارزیابی جامع قابلیت‌های فناوری لیدار در مدیریت بحران انجام شده است. فرآیند تحقیق شامل چهار مرحله اصلی بوده است:

۱- جستجوی نظام‌مند منابع در پایگاه‌های علمی معتبر در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۵ با در نظر گرفتن پارامترهای سیستمی لیدارها، پارامترهای زیر سیستمی مانند توان لیزر و مشخصات فنی آن، هزینه های داده برداری و در نهایت پلتفرمهای زمینی، هوایی (پهپادی و فضایی)

۲- مطالعه و بررسی دقیق منابع ، غربالگری اولیه بر اساس پارامترهای تعیین شده هدف و ورودی ها

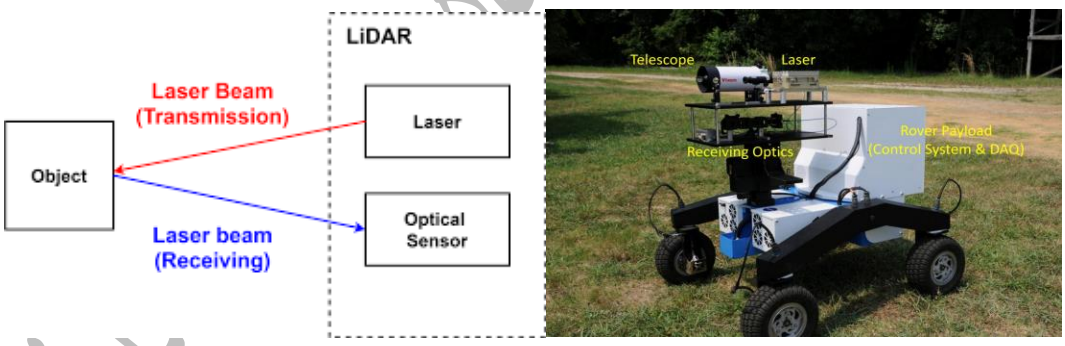
۳- انتخاب نهایی مطالعات بر اساس معیارهای ورود شامل ارتباط مستقیم با کاربرد لیدار در بحران، ارائه داده‌های کمی و بیشترین کاربرد براساس اثربخشی و دقت

۴- تحلیل تطبیقی مطالعات منتخب بر اساس شاخص‌های فنی (دقت، چگالی نقاط)، عملیاتی (زمان برداشت، پوشش) و اقتصادی (هزینه داده و عملیات.

در نهایت، با استفاده از رویکرد تحلیل چندمعیاره، عملکرد پلتفرم‌های مختلف لیدار (فضاپایه، هواپایه و پهپادی) در سناریوهای مختلف بحران مقایسه و ارزیابی شد.

۳- مرور فناوری لیدار :

یک سامانه لیدار در ساده‌ترین حالت (شکل ۱) از یک بخش لیزر به عنوان فرستنده، بخش الکترواپتیک یا تلسکوپ به عنوان گیرنده و بخش پردازش داده‌ها تشکیل می‌شود. مطابق شکل ۱، لیزر با ارسال پالس به سمت هدف، دریافت موج بازگشتی توسط تلسکوپ و آشکارسازی، پایش انجام می شود.



شکل۱- نمایی از یک لیدار زمینی و زیرسیستمهای لیدار

پارامترهای فنی سامانه لیدار نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت داده تولیدی و کارایی آن‌ها در مدیریت بحران دارند. طول موج لیزر، نرخ تکرار پالس (PRF [4]) و قابلیت ارسال چند پالس هم‌زمان، مستقیماً بر تراکم ابر نقاط و سرعت برداشت داده تأثیر می‌گذارند و برای پاسخ سریع در بحران‌هایی نظیر سیلاب و زلزله حیاتی هستند. ویژگی ثبت چند بازتاب و ذخیره شکل موج کامل امکان تحلیل ساختار عمودی اهداف را فراهم کرده و به‌ویژه در کاربردهایی مانند پایش جنگل، رانش زمین و ارزیابی خسارات پوشش گیاهی اهمیت دارد. همچنین، پارامترهایی نظیر زاویه اسکن، ارتفاع پرواز و پهنای سواث، تعادل میان دقت مکانی و وسعت پوشش را تعیین می‌کنند که در طراحی مأموریت‌های لیداری برای بحران‌های گسترده بسیار حیاتی است. از دیگر پارامتر مهم ابر نقاط[5] است که از

[4] Pulse Repetition Frequency
[5] Point Cloud

نقاط سه‌بعدی است که هر نقطه موقعیت خود را در فضا دارد و هر نقطه در واقع مکان دقیق بازتاب یک پالس لیزر از سطح است. جزئیات بیشتر در جدول ۱ با توضیحات بیان شده است.

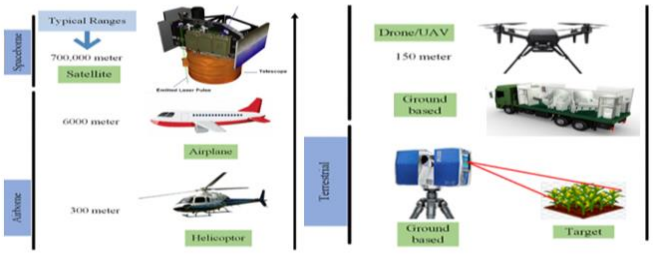
جدول ۱ – برخی پارامترهای فنی به همراه تعریف و اهمیت آن تشریح شده است.

ردیف	پارامتر فنی	تعریف	اهمیت کاربردی
1	نرخ تکرار پالس	تعداد پالس‌های لیزر ارسال‌شده در هر ثانیه	افزایش PRF موجب افزایش تراکم نقاط و بهبود دقت مدل سه‌بعدی
2	ارسال چند پالس	توانایی ارسال پالس جدید قبل از بازگشت پالس قبلی	افزایش سرعت برداشت داده و پوشش سریع مناطق وسیع
3	ثبت چند بازتاب	قابلیت ثبت چند بازتاب از یک پالس واحد (تاج درخت، شاخه، زمین)	استخراج ساختار عمودی پوشش گیاهی و تفکیک زمین از پوشش
4	سرعت نوسان آینه اسکنر	نرخ چرخش یا نوسان آینه برای اسکن پرتو لیزر(Hz)	تعیین‌کننده تراکم خطوط اسکن و یکنواختی پوشش داده
5	زاویه اسکن	زاویه انحراف پرتو از محور عمود	زاویه بزرگ‌تر پوشش عرضی بیشتر ولی کاهش دقت ارتفاعی
6	ارتفاع و سرعت پرواز پلتفرم	ارتفاع و سرعت حرکت هواپیما، پهپاد یا ماهواره	ارتفاع بیشتر پوشش وسیع‌تر اما تراکم نقاط کمتر
7	شدت بازتاب	میزان انرژی بازگشتی هر پالس لیزر	کاربرد در طبقه‌بندی سطوح، تشخیص نوع مواد و پوشش
8	ثبت شکل موج کامل	ذخیره کل شکل موج بازتابی به‌صورت پیوسته	تحلیل دقیق ساختار عمودی اهداف و لایه‌های زیرین
9	سیگنال موج بازگشتی	شدت بازتاب برحسب زمان	ارائه اطلاعات پیوسته از ساختار عمودی هدف
10	مدل ارتفاعی زمین	مدل ارتفاعی استخراج‌شده از نقاط زمین بدون پوشش	پایه تحلیل‌های توپوگرافی و هیدرولوژی
11	مدل سطحی	شامل زمین، ساختمان، پوشش گیاهی و موانع	مناسب تحلیل شهری و ارزیابی خسارات
12	مدل ارتفاع پوشش	اختلاف DSM و DEM	استخراج ارتفاع پوشش گیاهی و جنگل
13	طول موج لیزر	محدوده ۵۳۲ تا ۱۰۶۴ نانومتر بسته به نوع لیدار	تعیین نفوذپذیری در پوشش، نوع سطح قابل شناسایی
14	سواث(Swath width)	پهنای ناحیه‌ای که در هر گذر اسکن می‌شود	تعیین سرعت پوشش منطقه‌ای
15	ابر نقاط(Point Cloud)	مجموعه نقاط سه‌بعدی حاصل از بازتاب پالس‌ها	نمایش سه‌بعدی دقیق از دنیای واقعی

۳-۱- سکوهای لیدار:

سامانه‌های لیدار را بر اساس سکوی استقرار به لیدارهای زمینی، هواو فضاپایه تقسیم‌بندی می شوند (شکل۲). لیدار زمینی با دقت بسیار بالا، ابزار مناسبی برای پایش تغییرشکل سازه‌ها، دامنه‌ها و مناطق پرخطر در مقیاس محلی محسوب می‌شود، در حالی که لیدارهای فضایی با پوشش گسترده و توان پایش مناطق وسیع، نقش مهمی در ارزیابی مخاطرات در مقیاس منطقه‌ای و جهانی ایفا می‌کنند. با وجود رشد سریع کاربردهای لیدار در سال‌های اخیر، مطالعات پراکنده‌ای در زمینه استفاده از لیدار زمینی و فضایی در مدیریت بحران انجام شده و نیاز به یک مرور جامع و نظام‌مند در این حوزه احساس می‌شود.

نسخه پیش از انتشار



شکل ۲- نمایی از سکوهای زمینی، فضایی و هوایی (پهپاد و هوایی)

۳-۲لیدارهای زمینی (TLS[6] / MLS[7]):

لیدارهای زمینی یکی از دقیق‌ترین سامانه‌های برداشت داده‌های سه‌بعدی محسوب می‌شوند که به صورت لیدارهای ثابت (TLS) و لیدارهای متحرک (MLS) توسعه یافته‌اند. این سامانه‌ها به‌ویژه برای برداشت‌های بسیار دقیق در مقیاس محلی و مهندسی، نقش مکملی در کنار لیدارهای هواپایه و فضایی ایفا می‌کنند (شان و تود، ۲۰۱۸) . لیدارهای زمینی ثابت معمولاً بر روی سه‌پایه یا سکوی پایدار زمینی نصب شده و در فاصله عملیاتی تقریبی ۶۰ تا ۱۰۰ متر از هدف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سامانه‌ها به دلیل توانایی تولید داده با تراکم بسیار بالا (از چند نقطه در هر متر مربع تا چند نقطه در هر سانتی‌متر مربع)، گزینه‌ای ایده‌آل برای مدل‌سازی دقیق سازه‌ها (پل‌ها، ساختمان‌ها، تونل‌ها، پالایشگاه‌ها) و محیط‌های کوچک یا پیچیده(معادن و فضاهای زیرزمینی)، استخراج جزئیات ظریف هندسی و قابلیت تحلیل تغییر شکل‌ها در مقیاس میلی‌متری، محسوب می‌شوند (واسلمن و مس، ۲۰۱۰).

قابلیت ترکیب این لیدارها با حسگرهای اپتیکی نیز یکی از مزایای مهم این سامانه‌ها است؛ به‌طوری که با ادغام داده‌های RGB با ابرنقاط، امکان تولید مدل‌های سه‌بعدی رنگی فراهم می‌شود که برای مستندسازی، تحلیل‌های بصری و کاربردهای میراث فرهنگی بسیار ارزشمند است (شان و تود، ۲۰۱۸). علاوه بر این، فرآیندهای کنترل و کالیبراسیون مبتنی بر نقاط کنترل نقشه‌برداری‌شده زمینی تضمین می‌کنند که داده‌های لیدار با سیستم مختصات واقعی زمین همخوانی کامل داشته باشند و از نظر هندسی و مکانی معتبر باشند واسلمن و مس، ۲۰۱۰. لیدارهای متحرک زمینی معمولاً بر روی وسایل نقلیه زمینی نصب می‌شوند و برای اسکن سه‌بعدی پیوسته جاده‌ها، شهرها و زیرساخت‌های خطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سامانه‌های MLS شامل یک یا چند حسگر لیدار، سامانه تعیین موقعیت دقیق (GNSS/INS) و پلتفرم متحرک زمینی هستند که امکان برداشت سریع داده در مقیاس‌های شهری و منطقه‌ای را فراهم می‌سازند (پونته و همکاران، ۲۰۱۳). مزیت اصلی لیدار MLS نسبت به TLS، سرعت بالای برداشت داده و پوشش پیوسته مسیرهای طولانی است که آن را برای نقشه‌برداری شهری، پایش شبکه‌های حمل‌ونقل، خطوط لوله، خطوط انتقال نیرو و مدیریت

[6] **Terrestrial LiDAR**
[7] **Mobile Laser Scanning**

دارایی‌های زیرساختی بسیار مناسب می‌سازد (شان و تود، ۲۰۱۸) در حوزه مدیریت بحران، لیدار MLS نقش مهمی در ارزیابی سریع خسارات زیرساختی پس از زلزله، سیل یا حوادث صنعتی ایفا می‌کند، به‌گونه‌ای که امکان برداشت سریع هندسه آسیب‌دیدگی‌ها، تغییر مکان سازه‌ها و انسداد معابر را فراهم می‌سازد (پونته و همکاران، ۲۰۱۳)

۳-۳- لیدارهای هواپایه ALS[8]:

لیدارهای هواپایه یکی از مهم‌ترین فناوری‌های برداشت داده‌های سه‌بعدی در مقیاس منطقه‌ای و محلی محسوب می‌شوند که بر روی دو نوع اصلی از پلتفرم‌های پروازی شامل بال‌ثابت (FW[9]) و بال‌چرخان (RW[10]) قابل نصب و بهره‌برداری هستند. این سامانه‌ها به‌طور گسترده برای نقشه‌برداری توپوگرافی، پایش پوشش زمین و تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی مورد استفاده قرار می‌گیرند (شان و تود، ۲۰۱۸)

۳-۳-۱- لیدارهای بال‌ثابت(FW-LiDAR):

لیدار بال‌ثابت شامل یک حسگر لیدار، سامانه‌های دقیق تعیین موقعیت و ناوبری (GNSS/INS) و یک پلتفرم پروازی بال‌ثابت هستند که به‌طور معمول در ارتفاع‌های نسبتاً زیاد و با سرعت یکنواخت پرواز می‌کنند. ماموریت اصلی این لیدارها، برداشت داده‌های سه‌بعدی از سطح زمین در مقیاس‌های منطقه‌ای تا ملی است. کاربردهای رایج FW-LiDAR شامل نقشه‌برداری توپوگرافی وسیع، تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی زمین (DEM/DTM) و مدل سطحی(DSM) ،پایش تغییرات زمین و فرسایش خاک، مطالعات هیدرولوژیکی و مدیریت حوضه‌های آبریز، پایش خطوط ساحلی و تغییرات تراز آب، و نقشه‌برداری ملی یا منطقه‌ای می‌باشد (شان و تود، ۲۰۱۸)

۳-۳-۲- لیدارهای بال‌چرخان(RW-LiDAR / UAV-LiDAR)

لیدارهای بال‌چرخان بر روی سکوهایی نظیر پهپادهای چندملخه یا بالگردها نصب می‌شوند. در این نوع سامانه‌ها، پلتفرم پروازی دارای قابلیت پرواز ایستا است، برخلاف پرنده‌های بال‌ثابت که نیازمند حرکت پیوسته رو به جلو هستند. سامانه RW-LiDAR شامل یک حسگر لیدار، سامانه تعیین موقعیت و ناوبری (GNSS/INS) و یک پلتفرم بال‌چرخان (مانند کوادکوپتر یا هلیکوپتر) است و عمدتاً برای نقشه‌برداری سه‌بعدی دقیق در ارتفاع پایین و مناطق محدود یا پیچیده مورد استفاده قرار می‌گیرد. مطالعات نشان داده‌اند که این لیدارها به دلیل ارتفاع پرواز پایین و تراکم بسیار بالای نقاط، قابلیت تولید ابرنقاطی با دقت بسیار بالا را دارد که برای تحلیل ساختار عمودی پوشش گیاهی، استخراج مدل‌های دقیق ارتفاعی و تحلیل سه‌بعدی محیط بسیار مناسب است(والک و همکاران، ۲۰۱۲).همچنین، کاربرد این سامانه‌ها در محیط‌های رودخانه‌ای و سیلابی نشان داده است که RW-LiDAR توانایی بالایی در مدل‌سازی دقیق بستر رودخانه و کناره‌ها داشته و نقش مهمی در تحلیل خطر سیلاب ایفا می‌کند . از منظر مدیریت بحران، UAV-LiDAR ابزار بسیار کارآمدی برای پایش تغییرات ژئومورفولوژیک، رانش زمین و ناپایداری‌های سطحی محسوب می‌شود و امکان تحلیل دقیق بحران‌های طبیعی را فراهم می‌سازد. دقت مدل‌های ارتفاعی تولیدشده توسط UAV-LiDAR به‌شدت وابسته به طراحی

[8] **Airborne Laser Scanning**
[9] **Fixed-Wing**
[10] **Rotary-Wing**

مأموریت پروازی، به‌ویژه ارتفاع پرواز و زاویه اسکن است؛ به‌گونه‌ای که افزایش ارتفاع یا زاویه‌های بزرگ اسکن می‌تواند منجر به کاهش دقت و افزایش خطاهای هندسی شود (تامیمی و تود، ۲۰۲۴). کاربردهای رایج RW-LiDAR شامل نقشه‌برداری سه‌بعدی شهری و زیرساختی، پایش جنگل‌ها و محیط زیست، بازرسی خطوط انتقال نیرو و خطوط لوله، مطالعات زمین‌لغزش و تغییرات توپوگرافی محلی، و مدل‌سازی دقیق سازه‌ها و محیط‌های محدود است.

در مجموع، سامانه‌های ALS در قالب پلتفرم‌های بال‌ثابت و بال‌چرخان، نقش مکمل یکدیگر را در مدیریت بحران ایفا می‌کنند؛ به‌گونه‌ای که FW-LiDAR برای پایش‌های وسیع‌مقیاس و تولید داده‌های پایه منطقه‌ای و RW-LiDAR برای تحلیل‌های دقیق موضعی، ارزیابی خسارات و پاسخ سریع به بحران‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. این معماری چندسکویی، امکان توازن میان پوشش مکانی، دقت و هزینه را در سامانه‌های پایش بحران فراهم می‌سازد. جزئیات بشتر در جدول ۲ بیان شده است.

جدول ۲- مرور و مقایسه مشخصات فنی لیدارهای هواپایه

ویژگی	لیدار FW	لیدار RW
نوع پلتفرم	هواپیماهای بال‌ثابت یا پهپادهای بال‌ثابت	پهپادهای چندملخه، بالگردها
ارتفاع پرواز معمول	۳۰۰ تا ۳۰۰۰ متر	۳۰ تا ۲۰۰ متر
پوشش مساحتی	زیاد – مناسب برای پروژه‌های گسترده یا منطقه‌ای	کم – مناسب برای مناطق کوچک یا محلی
رزولوشن مکانی	پایین‌تر (در ازای پوشش بیشتر)	بسیار بالا (چون در ارتفاع پایین پرواز می‌کند)
دقت اندازه‌گیری ارتفاعی	بالا (۵–۱۵ سانتی‌متر)	بسیار بالا (۲–۵ سانتی‌متر)
توان پرواز ایستا	ندارد	دارد
زمان پرواز	طولانی‌تر (تا چند ساعت)	محدود (۱۵ تا ۶۰ دقیقه برای پهپادها)
پایداری در باد و شرایط جوی	بیشتر و پایدارتر	کمتر (تأثیرپذیر از باد)
هزینه عملیاتی	بالاتر (نیاز به خلبان یا پهپاد بزرگ‌تر)	پایین‌تر (راه‌اندازی ساده و کم‌هزینه)
سرعت پرواز	۲۰ تا ۵۰ متر بر ثانیه	۵ تا ۱۵ متر بر ثانیه
نرخ برداشت داده	کمتر	بسیار بالا (به دلیل پرواز آهسته و ارتفاع پایین)
کاربردهای رایج	نقشه‌برداری توپوگرافی گسترده، پایش ساحلی	نقشه‌برداری شهری، جنگل‌داری، محلی
محدودیت اصلی	هزینه زیاد و نیاز به فضای پرواز باز	زمان پرواز و پوشش کم
انعطاف عملیاتی در مناطق سخت‌گذر	محدود	بسیار بالا

مطابق با جدول ۲ تحلیل پارامترهای فنی سامانه‌های لیدار نصب‌شده بر روی پلتفرم‌های بالگردی یا پهپادهای بال‌چرخان نشان می‌دهد که این سامانه‌ها به‌طور خاص برای برداشت‌های بسیار دقیق و موضعی طراحی شده‌اند. ارتفاع پرواز پایین در بازه تقریبی ۶۰ تا ۱۲۰ متر موجب می‌شود که پرتوهای لیزر با حداقل واگرایی به سطح زمین برخورد کرده و در نتیجه، دقت مکانی و ارتفاعی داده‌ها به‌طور چشمگیری افزایش یابد. این ویژگی برای کاربردهایی نظیر پایش شکستگی سدها، بررسی آسیب سازه‌ها، ارزیابی رانش زمین‌های موضعی و شناسایی موانع خطرناک پس از زلزله اهمیت حیاتی دارد. نرخ بالای تکرار پالس لیزر که تا حدود ۲۰۰ هزار پالس در ثانیه می‌رسد، به سامانه اجازه می‌دهد در مدت زمان کوتاه حجم عظیمی از داده‌های سه‌بعدی تولید کند. این موضوع مستقیماً به افزایش تراکم نقاط در سطح زمین منجر می‌شود؛ به‌گونه‌ای که چگالی داده در حدود ۱۰ تا ۳۰ نقطه در هر متر مربع حاصل می‌شود. چنین تراکمی برای شناسایی عوارض ریزمقیاس مانند کابل‌های برق، لبه‌های ساختمان‌ها، ترک‌های سطح زمین یا

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

شاخه‌های درختان کاملاً ضروری است و امکان تحلیل‌های دقیق پسابحران را فراهم می‌کند. در مقابل، پهنای سواث نسبتاً محدود (حدود ۶۰ تا ۳۰۰ متر) نشان می‌دهد که لیدارهای RW بیشتر برای مأموریت‌های هدفمند و موضعی مناسب هستند تا پایش‌های گسترده منطقه‌ای. این محدودیت پوشش عرضی، اگرچه باعث کاهش بهره‌وری برای بحران‌های وسیع مانند سیلاب‌های گسترده می‌شود، اما در عوض امکان تمرکز بر جزئیات بسیار دقیق و شناسایی ویژگی‌های کوچک ولی بحرانی را فراهم می‌آورد؛ ویژگی‌ای که در مرحله پاسخ سریع و ارزیابی خسارات موضعی بسیار ارزشمند است. در مجموع، تمرکز این سامانه‌ها بر حداکثرسازی تراکم نقاط برای شناسایی عوارض کوچک بیانگر آن است که لیدارهای RW به‌عنوان یک ابزار مکمل در کنار لیدارهای هواپایه ثابت‌بال و فضایی عمل می‌کند. این سامانه‌ها به‌ویژه در سناریوهایی که دقت موضعی، ایمنی پرواز پایین‌ارتفاع و انعطاف عملیاتی اهمیت دارد، نقش کلیدی در چرخه مدیریت بحران ایفا می‌کنند.

مشخصات فنی ارائه‌شده برای سامانه‌های لیدار هواپایه نصب‌شده بر روی هواپیماهای بال‌ثابت نشان می‌دهد که این پلتفرم‌ها به‌طور خاص برای پایش‌های منطقه‌ای و بحران‌های با گستره وسیع مکانی طراحی شده‌اند. ارتفاع پرواز در بازه ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر بالای سطح زمین (AMT) این امکان را فراهم می‌کند که مناطق وسیعی در هر پرواز پوشش داده شوند، در حالی که همچنان دقت ارتفاعی در حد قابل قبول برای مدل‌سازی توپوگرافی، تحلیل سیلاب و شناسایی تغییرات زمین حفظ می‌شود. این ویژگی، لیدار هواپایه را به گزینه‌ای بسیار مناسب برای بحران‌هایی نظیر سیلاب‌های گسترده، رانش‌های دامنه‌ای وسیع و پایش مناطق زلزله‌زده در مقیاس منطقه‌ای تبدیل می‌کند. نرخ تکرار پالس لیزر در محدوده ۷۰ تا ۲۰۰ کیلوهرتز، تعادل مطلوبی میان سرعت برداشت داده و تراکم نقاط برقرار می‌کند. این بازه PRF امکان تولید داده‌هایی با کیفیت کافی برای استخراج مدل‌های رقومی ارتفاعی دقیق (DEM) و مدل‌های سطحی (DSM) را فراهم می‌آورد، بدون آنکه حجم داده‌ها یا هزینه‌های پردازش به‌صورت غیرضروری افزایش یابد. در نتیجه، لیدار هواپایه از منظر اقتصادی و عملیاتی نیز گزینه‌ای بهینه برای پایش بحران‌های وسیع محسوب می‌شود. فاصله نقاط روی زمین در هر گذر در بازه ۰.۵ تا ۲ متر نشان می‌دهد که این سامانه‌ها برای مدل‌سازی توپوگرافی منطقه‌ای با دقت بالا ولی نه در حد جزئیات سازه‌ای طراحی شده‌اند. چنین تراکمی برای کاربردهایی مانند شبیه‌سازی جریان سیلاب، تحلیل زهکشی، شناسایی گسل‌ها و ارزیابی پایداری شیب‌ها کاملاً مناسب است، هرچند برای شناسایی عوارض بسیار ریز، نسبت به لیدارهای پهپادی محدودیت دارد.

پهنای سواث بین ۲۰۰ متر تا بیش از ۱ کیلومتر نیز بیانگر توان بالای این سامانه‌ها در پوشش سریع مناطق وسیع است. این ویژگی باعث می‌شود که لیدار هواپایه بتواند در مدت زمان کوتاه، اطلاعات مکانی قابل اتکایی برای تصمیم‌گیری در سطوح استانی یا ملی فراهم آورد؛ امری که در مرحله پاسخ اضطراری و همچنین در بازسازی پسابحران نقش کلیدی ایفا می‌کند. در مجموع، لیدارهای هواپایه بال‌ثابت را می‌توان به‌عنوان یک ابزارحیاتی برای اخذ داده‌های سه‌بعدی در مدیریت بحران‌های گسترده دانست؛ سامانه‌هایی که با ایجاد تعادل میان دقت، پوشش مکانی و هزینه عملیاتی، حلقه اتصال میان لیدارهای دقیق موضعی (پهپادی) و پایش‌های کلان‌مقیاس فضایی را تشکیل می‌دهند.

۳-۴- لیدارهای فضاپایه:

شاخص اصلی برتری لیدارهای فضایی نسبت به سایر سکوهای زمینی و هوایی، پایش جهانی پیوسته همراه با تکرار زمانی منظم اهداف است. اگرچه هزینه‌های توسعه، پرتاب و بهره‌برداری از سامانه‌های فضاپایه و سطح بالای فناوری موردنیاز برای آن‌ها همواره

محل بحث بوده است، اما چالش‌های کلان دنیای امروز نظیر نقشه‌برداری ارتفاعی در مقیاس جهانی، تعیین ارتفاع و عمق، پایش یخ‌های قطبی، تغییرات اقلیمی، ریزگردها، لایه اوزون، چرخه دی‌اکسیدکربن و بخار آب، مستلزم اندازه‌گیری‌هایی در مقیاس‌های مکانی و زمانی بسیار بزرگ هستند که عملاً از توان سامانه‌های زمینی و هواپایه خارج است (مارکوس و همکاران، ۲۰۱۷).

در این چارچوب، لیدارهای فضاپایه نقش کلیدی در پایش بلندمدت تغییرات سطح زمین و پوشش گیاهی، تقویت مدل‌های مخاطرات طبیعی (نظیر پیش‌بینی سیل و آتش‌سوزی) و تولید داده‌های پایه برای مدل‌های خطر و برنامه‌ریزی کاهش آسیب در مدیریت بحران ایفا می‌کنند. قابلیت ثبت داده‌های ارتفاعی همگن و تکرارشونده در سطح جهانی، امکان شناسایی روندهای تدریجی تغییرات ژئومورفولوژیک و محیط زیست را فراهم می‌سازد که برای تحلیل مخاطرات طبیعی و انسانی اهمیت حیاتی دارد. مأموریت‌های فضایی جدید نظیر ICESat-2 وGEDI ، افق‌های تازه‌ای را برای استفاده از داده‌های لیدار در مدیریت بحران گشوده‌اند.

در میان مأموریت‌های شاخص، پروژه **Earth CARE**[11]، یکی از پیشرفته‌ترین مأموریت‌های سنجش از دور جوّی محسوب می‌شود که با بهره‌گیری از چهار محموله اصلی، از جمله لیدار، امکان پایش همزمان آئروسل‌ها، ابرها و فرآیندهای جوی مؤثر بر تغییرات اقلیمی و مخاطرات محیطی را فراهم می‌سازد. داده‌های این مأموریت به‌طور غیرمستقیم در تحلیل پدیده‌هایی نظیر ریزگردها، تغییرات تابش و بارش‌های حدی نقش کلیدی دارند.

از سوی دیگر، مأموریت **GEDI**[12] ، به‌طور ویژه بر پایش ساختار عمودی جنگل‌ها و زیست‌توده زمینی متمرکز است. این سامانه با ثبت شکل موج کامل بازتاب‌ها، امکان استخراج دقیق ارتفاع تاج درختان، مدل ارتفاع پوشش گیاهی (CHM) و تحلیل زیست‌توده را فراهم می‌کند. (کی و همکاران، ۲۰۱۹) مطالعات ارزیابی عملکرد نشان می‌دهد که داده‌های GEDI از دقت قابل توجهی در مناطق جنگلی برخوردار بوده و برای تحلیل خسارات زیست‌محیطی ناشی از آتش‌سوزی‌ها، تخریب جنگل‌ها و تغییر کاربری زمین بسیار ارزشمند هستند (هانکوک و همکاران، ۲۰۱۹).

در کنارGEDI، ماهواره **ICESat-2**[13]، به‌عنوان یکی از دقیق‌ترین سامانه‌های لیدار فضاپایه در حوزه ارتفاع‌سنجی شناخته می‌شود. هدف اصلی این مأموریت، اندازه‌گیری جرم صفحات یخی قطبی، ضخامت یخ دریا و ارتفاع پوشش گیاهی به‌منظور پایش تغییرات اقلیمی است (مارکوس و همکاران، ۲۰۱۷). سامانه ATLAS این ماهواره با بهره‌گیری از روش چندپرتویی و نرخ نمونه‌برداری بالا، تراکم داده‌ای بسیار بیشتر نسبت به نسخه قبلی ایجاد کرده و امکان نمونه‌برداری مکانی فشرده‌تری را فراهم نموده است. داده‌های پردازش‌شده ICESat-2، به‌ویژه محصولاتATL08 ، امکان استخراج دقیق ارتفاع تاج درختان، طبقه‌بندی پوشش گیاهی و مدل‌سازی سطح زمین را فراهم می‌سازند (نئونواندر و پیت، ۲۰۲۰) همچنین الگوریتم‌های بازیابی ارتفاع یخ و زمین توسعه‌یافته برای این مأموریت، دقت بالایی در پایش تغییرات توپوگرافی و دینامیک صفحات یخی نشان داده‌اند (اسمیت و همکران، ۲۰۱۹). این ویژگی‌ها باعث شده است که ICESat-2 به یکی از منابع کلیدی برای تحلیل تغییرات سطح زمین و مخاطرات مرتبط با ذوب یخ‌ها، بالا آمدن سطح دریا و تغییرات اقلیمی تبدیل شود. به عنوان مثال، مقایسه‌ها میان داده‌های ICESat-2 و GEDI با لیدارهای هواپایه نشان

---

[11] (Cloud, Aerosol and Radiation Explorer): توسعه یافته است (JAXA) و ژاپن (ESA) به‌صورت مشترک توسط آژانس فضایی اروپا

[12] Global Ecosystem Dynamics Investigation: به‌صورت مشترک میان ناسا و دانشگاه مریلند طراحی شده و در دسامبر ۲۰۱۸ بر روی ایستگاه فضایی بین‌المللی نصب گردید

[13] Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 : پرتاب شد ICESat-1 در سپتامبر ۲۰۱۸ به‌عنوان ادامه مأموریت

می‌دهد که اگرچه لیدار فضایی از نظر تفکیک مکانی محدودیت‌هایی نسبت به سامانه‌های هوابرد دارد، اما از منظر یکنواختی پوشش، تکرارپذیری زمانی و هزینه در مقیاس‌های بزرگ، برتری قابل توجهی دارد (نئونواندر و پیت، ۲۰۲۱). بدین ترتیب، لیدارهای فضاپایه نه به‌عنوان جایگزین کامل، بلکه به‌عنوان مکمل راهبردی سامانه‌های هواپایه و زمینی در چارچوب یک معماری چندسکویی برای مدیریت بحران مطرح می‌شوند. در مجموع، مأموریت‌های ICESat-2 و GEDI با فراهم‌سازی داده‌های ارتفاعی دقیق و جهانی، بستر تحلیلی ارزشمندی برای پایش بلندمدت مخاطرات طبیعی، تحلیل روندهای محیطی پیش‌برنده بحران‌ها و تقویت مدل‌های پیش‌بینی خطر فراهم کرده‌اند؛ هرچند کاربرد عملیاتی مستقیم آن‌ها در مدیریت بحران‌های لحظه‌ای هنوز در حال توسعه و تکامل است.

مطابق با جدول ۴ سامانه‌های مختلف لیدار با وجود اشتراک در اصل اندازه‌گیری فاصله لیزری، از نظر ویژگی‌های فنی و کارکردی تفاوت‌های معناداری دارند که مستقیماً بر کارایی آن‌ها در مدیریت بحران اثرگذار است. در این جدول، شاخص‌هایی مانند دقت عمودی، چگالی نقاط و PRF بر اساس منابع استاندارد انتخاب شده و به‌صورت نسبی مقایسه شده‌اند. لیدارهای هواپایه سرنشین‌دار (ALS)با ایجاد توازن میان دقت، پوشش مکانی و هزینه، برای تحلیل مخاطرات در مقیاس منطقه‌ای مناسب هستند، در حالی که لیدارهای پهپادی به‌دلیل چگالی نقطه‌ای بسیار بالا، دقت افقی و عمودی برتر و تناوب زمانی کوتاه، گزینه‌ای ایده‌آل برای پاسخ سریع و ارزیابی خسارت موضعی محسوب می‌شوند. در مقابل، لیدارهای فضاپایه با وجود دقت مکانی کمتر و چگالی پایین‌تر، به‌واسطه پوشش جهانی، هزینه بسیار پایین داده برای کاربر نهایی و قابلیت پایش بلندمدت، نقش کلیدی در تحلیل روندهای کلان مخاطرات طبیعی ایفا می‌کنند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که انتخاب بهینه سامانه لیدار در مدیریت بحران باید مبتنی بر تطابق میان مقیاس بحران، نیاز زمانی، سطح دقت مورد انتظار و ملاحظات اقتصادی صورت گیرد. شایان ذکر است چارچوب مقایسه بر اساس چهار معیار کلیدی تعریف شده است: دقت، پوشش مکانی تفکیک زمانی، هزینه عملیاتی

جدول ۴ مشخصات فنی متداول سامانه‌های لیدار مورد استفاده در مدیریت بحران

ویژگی فنی	لیدار ماهواره‌ای – فضاپایه	لیدار هواپایه (UAV)	لیدار هواپایه(ALS)
طول موج لیزر	1064 nm (ICESat-2)؛ ۵۳۲/۱۰۶۴ nm (GEDI/ICESat)	905 nm یا ۱۰۶۴nm	1064 nm (NIR)؛ ۵۳۲nm
نوع پالس	Full-waveform / Photon-counting	Discrete / Full-waveform	Discrete / Full-waveform
فرکانس تکرار پالس(PRF)	از مرتبه kHz - فوتون‌شمار	100–400 kHz	100–500 kHz تا >1 MHz
چگالی نقطه‌ای[14]	در امتداد مسیر ۱>	50–500 بسیار بالا در مقیاس محلی	5–30 تا 50< پروازهای کم‌ارتفاع
دقت عمودی	±10–30 cm	±2–10 cm	±5–15 cm
دقت افقی	Along-track- از مرتبه ده متر	±3–10 cm	±10–30 cm
پوشش مکانی	جهانی	محلی(10–50 km²)	منطقه‌ای(10²–10⁴ km²)
تناوب زمانی	چند روز تا چند ماه	بسیار بالا (در حد ساعت–روز)	درخواستی (پرواز مأموریتی)
توان نفوذ در پوشش گیاهی	متوسط (وابسته به تراکم پوشش)	بالا	بالا
حجم داده	متوسط	بسیار زیاد	زیاد
کاربرد شاخص در بحران	پایش بلندمدت خطرات	پاسخ سریع، ارزیابی خسارت موضعی	سیل، رانش، طوفان، زلزله
هزینه عملیاتی نسبی	بسیار کم برای کاربر (داده آزاد)	کم تا متوسط	بالا

[14] **points/m²**

۴- مطالعات موردی و تحلیل نقش لیدار در مدیریت بحران:

همانطور که پیشتر عنوان شد، پارامتر دقت در پایش، پیش بینی، برآورد خسارات و در نهایت مدیریت بحران ناشی از آسیبها و خسارات وارده بسیار حائز اهمیت است. پوشش گسترده، سرعت و دقت داده برداری لیدار باعث شده است که در اکثر حوادث؛ طوفانها، بارانهای شدید سیل آسا و رانشهای زمین و زمین لرزه‌ها؛ لیدار در خدمت فازهای بحران و مدیریت آن:

- پیشگیری: مدل‌سازی خطر
- آمادگی: پایش مستمر
- پاسخ: ارزیابی سریع خسارت
- بازسازی: برنامه‌ریزی بازتوانی

قرار گیرد. مطالعات اخیر نشان داده‌است که لیدار در ارزیابی سریع خسارت پس از طوفانهای بزرگ مانند هاریکن ایان[15] و هاریکن مایکل نقش عملیاتی مهمی داشته است. داده‌های سه‌بعدی لیدار در ترکیب با تجزیه و پردازش ابری و مدل‌های یادگیری ماشین، به ارائه دید فضایی دقیق از تغییرات توپوگرافی، آسیب سازه‌ها، شاخص‌های سقوط درختان، و انسداد خطوط حمل‌ونقل کمک می‌کند. این اطلاعات به تیم‌های پاسخ‌دهی اضطراری و مدیریت بحران اجازه می‌دهد که اولویت‌بندی فعالیت‌های بازسازی و تخصیص منابع را بهتر انجام دهند و زمان واکنش را کاهش دهند . در بررسی آثار و آسیبهای ناشی از طوفان‌های شدید و بادهای مخرب درایالات متحده، در سال ۲۰۲۵ استفاده از لیدار پهپاد برای شناسایی و طبقه‌بندی خسارت جنگل‌ها ناشی از طوفان‌های شدید (هاریکن و گردباد) نشان داد که مدل‌های ارتفاع پوشش گیاهی (CHM) از داده‌های لیدار نسبت به روش‌های بدون لیدار به‌طور قابل‌توجهی دقت طبقه‌بندی را افزایش می‌دهد و کاهش خطا تا ٪۲۳ رخ خواهد داد . اهمیت این بکارگیری در استخراج خودکار شاخص‌های خسارت ناشی از طوفان، افزایش سرعت ارزیابی پس از بحران نسبت به روش‌های میدانی سنتی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری در بازسازی و توزیع منابع در مدیریت بحران چشمگیر خواهد بود. در خصوص کاهش زمان پاسخ اضطراری پس از هاریکن کاترینا بررسی شبکه‌های حمل‌ونقل بررسی ها نشان می‌دهد استفاده از داده‌های لیدار قبل و بعد از هاریکن کاترینا و تحلیل داده‌های لیدار برای تشخیص موانع و انسداد در شبکه حمل‌ونقل می‌تواند به‌طور معنی‌داری زمان رسیدن تیم‌های پاسخ اضطراری به محل‌های حادثه را کاهش دهد. این مطالعه نشان داد که لیدار می‌تواند لایه‌های دقیق سه‌بعدی از زیرساخت‌های شهری تولید کند و با تحلیل سریع آن به افزایش کارایی عملیات امداد و نجات کمک کند و در نهایت تصمیم سازی برای مدیریت بحران را در بهبود مسیرهای دسترسی پس از بحران به کمک داده‌های ارتفاعی و شبکه‌ای و کاهش زمان واکنش تیم‌های نجات و افزایش ایمنی عملیات جلوه گر نمود. ارزیابی سریع خرابی‌های پوشش جنگلی، بهبود دقت تشخیص درختان افتاده و مناطق تخریب‌شده و کمک به برنامه‌ریزی بازیابی و مدیریت منابع طبیعی از موارد کلیدی در این خصوص می باشد. در ادامه چند رویداد طبیعی و نقش لیدارهواپایه در مدیریت آسیبها و بحران را در جدول ۵ با جزئیات بیشتر قابل بررسی می‌باشد.

[15] **Nicole & Ian**

جدول ۵ - رویداد طبیعی و نقش لیدارهواپایه در مدیریت بحران در سالهای اخیر

رویداد طبیعی/ حادثه / مکان/ زمان	اثربخشی لیدار	مدیریت بحران
سیل ناگهانی - والنسیا، اسپانیا ۲۰۲۴	تهیه مدل‌های ارتفاعی و ترکیب با داده های RGB دوربینهای چند طیفی	مستندسازی دقیق توپوگرافی سیلابی تفکیک مناطق با خطرات مختلف پشتیبانی تصمیم‌گیری سریع به‌ویژه در مواقع آلودگی و خطر سلامت عمومی
طوفان موراکات – تایوان (2009) وقوع رانش‌های بزرگ‌مقیاس	شناسایی، نقشه‌برداری و تحلیل ساختارهای رانشی نقشه‌برداری دقیق رانش‌ها، شناسایی خطوط شکستگی با استفاده از داده‌های لیدار با تفکیک‌پذیری بالا و تصاویر هوایی	تهیه نقشه خطر رانش زمین برای شناسایی مناطق پرخطر •پشتیبانی از برنامه‌ریزی پیشگیری و کاهش خسارت •اعتبارسنجی و مقایسه با روش‌های سنتی هوایی) نقشه‌برداری دقیق نواحی لغزشی، شناسایی خطوط شکستگی و تحلیل تغییرات مورفولوژیکی دامنه‌ها و پیش‌بینی مخاطرات ثانویه و کاهش ریسک در مناطق کوهستانی
سیلاب شهری – آکرا ۲۰۱۹	بهبود مدل‌های خطر سیلاب شهری و پیش‌بینی دقیق‌تر مناطق اغتشاش	بهبود دقت مدل‌های سیلاب و پیش‌بینی خطر طراحی اقدامات پیشگیری همچون دیوارهای سیلابی و مسیرهای فرار
زلزله– لارکا، اسپانیا	تعیین آسیب‌پذیری ساختمان‌ها	ارتقای دقت ارزیابی لرزه‌ای در مناطق شهری پشتیبانی از برنامه‌های مقاوم‌سازی و اولویت‌بندی مداخلات
طوفان گرمسیری (هاریکن مایکل)، فلوریدا -۲۰۱۸	مدل‌سازی موج طوفان	تلفیق داده‌های لیدار با تصاویر هوایی و داده‌های میدانی اولویت‌بندی عملیات امداد، تخلیه و بازسازی - شناسایی دقیق تخریب سازه‌ها، تغییرات خط ساحلی و جابه‌جایی رسوبات - برنامه‌ریزی بازسازی پایدار

مطالعات گانگ و همکاران (۲۰۲۴) در یک منطقه ساحلی فلوریدا نشان می دهد که تحلیل اختلاف هندسی داده‌های داده‌های لیدار پیش و پس از توفان مایکل می‌تواند به‌طور مؤثری گستره و شدت آسیب‌ها را آشکار سازد. براساس این تحقیق، با استفاده از چارچوب تحلیلی چندمقیاسی مبتنی بر ویژگی‌های سه‌بعدی و الگوریتم جنگل تصادفی نشان میدهد که داده‌های لیدار قادر به طبقه‌بندی دقیق عوارض پایدار، تخریب‌شده و تغییرشکل‌یافته با دقتی در حدود ٪۹۷ هستند. این نتایج بیانگر قابلیت بالای لیدار در ارزیابی سریع خسارات شهری و ساحلی و پشتیبانی از تصمیم‌گیری‌های اضطراری است.

تجربه طوفان مایکل نشان می‌دهد که لیدار هواپایه نه‌تنها ابزاری برای مستندسازی خسارات، بلکه مؤلفه‌ای راهبردی در مدل‌سازی مخاطرات، بهبود پیش‌بینی‌ها و پشتیبانی از تصمیم‌سازی در مدیریت بحران با پایش دوزمانه (امکان مقایسه مستقیم ساختار سه‌بعدی قبل و بعد از توفان) و ارزیابی سریع خسارات، طبقه‌بندی خودکار آسیب‌ها با دقت بالا (استفاده از چارچوب‌های یادگیری ماشین مبتنی بر داده‌های لیدار دقت بالایی در شناسایی کلاس‌های تخریب)، بهبود مدل‌های سیلاب و طوفان ساحلی (بهره‌گیری از داده‌های لیدار در تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی و افزایش دقت شبیه‌سازی‌ها) و پشتیبانی مؤثر از تصمیم‌سازی بحران (نقش کلیدی در آگاهی وضعیتی و اولویت‌بندی اقدامات پس از بحران) می‌شود. طوفان موراکات که در آگوست ۲۰۰۹ جنوب تایوان را تحت تأثیر قرار

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

داد، یکی از شدیدترین رخدادهای بارشی ثبت‌شده در منطقه به‌شمار می‌رود و منجر به وقوع هزاران مورد رانش زمین گسترده و ویرانگر شد. در این میان، داده‌های لیدار هواپایه به‌عنوان یکی از مؤثرترین ابزارهای سنجش‌ازدور سه‌بعدی برای مستندسازی، تحلیل و پایش این رانش‌ها به‌کار گرفته شدند.

مطابق با جدول۵ داده‌های لیدار با تفکیک مکانی بالا امکان نقشه‌برداری دقیق نواحی لغزشی، شناسایی خطوط شکستگی تحلیل تغییرات مورفولوژیکی دامنه‌ها را به‌طور مؤثر فراهم می‌سازند. به‌طور خاص، لین و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از داده‌های لیدار پیش و پس از این طوفان ، موفق به استخراج خودکار مناطق رانش‌یافته و مرزهای آن‌ها با دقت بسیار بالا شدند. این مطالعه نشان داد که لیدار قادر است حتی رانش‌های کوچک و پنهان‌شده در زیر پوشش گیاهی را نیز شناسایی کند؛ قابلیتی که در تصاویر اپتیکی متعارف به‌سختی امکان‌پذیر است. یکی از دستاوردهای مهم به‌کارگیری لیدار در این رویداد، تشخیص دقیق خطوط شکستگی و سطوح لغزش در مناطق کوهستانی جنوب تایوان بود که نقش کلیدی در بازسازی مکانیزم‌های وقوع رانش و تحلیل پایداری دامنه‌ها ایفا کرد . مطابق با یافته های لین و همکاران، این اطلاعات برای مدل‌سازی پتانسیل رانش‌های ثانویه، طراحی اقدامات پایدارسازی و برنامه‌ریزی بازسازی مناطق آسیب‌دیده بسیار حیاتی بوده‌اند.

در زلزله شهر لارکای اسپانیا، مشخص‌سازی ساختمان‌های این شهر با تلفیق داده‌های لیدار هوابرد، ارتوفتو و تصاویر ماهواره‌ای برای ایجاد یک پایگاه داده از عناصر در معرض خطر و آسیب‌پذیری زلزله است.

در فرآیند مدیریت این رخداد، با استفاده از داده‌های لیدار هوابرد با وضوح بالا، نقشه‌ای تهیه شد که محل رخداد زمین‌لغزش را نشان می‌داد. سپس با اختصاص وزن به هر عامل مؤثر، نقشه حساسیت ایجاد شد. داده‌های لیدار برای استخراج این عوامل مؤثر در پیش‌بینی مکانی مناطق خطر به کار رفت. صحت نقشه حساسیت با روش منحنی راک (AUC) مورد ارزیابی قرار گرفت که نرخ موفقیت و پیش‌بینی به ترتیب ٪۸۶.۲۲ و ٪۸۴.۸۷ بود. در ادامه با ادغام نقشه حساسیت و داده‌های بارش ۱۵ ساله، نقشه خطر تولید شد. پس از آن نقشه آسیب‌پذیری، این نقشه با در نظر گرفتن کاربری/پوشش زمین (LULC) به عنوان عنصر در معرض خطر و بر اساس معیارهایی مانند هزینه بازسازی، زمان مورد نیاز، ریسک نسبی زمین‌لغزش، خطر برای جمعیت و اثر کلی بر خسارت، استخراج شد و در نهایت، با تلفیق اطلاعات خطر و آسیب‌پذیری، نقشه‌های ریسک تولید شدند (عبدالوحید و پرهان، ۲۰۱۷).
در زلزله سال ۲۰۱۰ هائیتی، یک الگوریتم برای بخش‌بندی بدون نظارت ساختمان‌ها و ارزیابی آسیب، با استفاده از داده‌های لیدار هوابرد پیشنهاد شده است. در این روش، خواص سطح محلی (مانند بردارهای نرمال و انحنای سطح) همراه با روش رشد ناحیه‌ای برای بخش‌بندی ساختمان‌های مجزا در ابر نقطه‌ای لیدار به کار گرفته شدند. ساختمان‌های آسیب دیده بر اساس زاویه شیب سقف شناسایی و سپس آسیب با معیارهای تخت‌بودگی و ارتفاع نقاط ارزیابی شد. اعتبارسنجی این روش‌های بخش‌بندی و ارزیابی آسیب، با استفاده از داده‌های لیدار هوابرد جمع‌آوری‌شده پس از زلزله سال ۲۰۱۰ هائیتی انجام شد. دقت بخش‌بندی ساختمان‌ها ٪۹۳.۸ و دقت ارزیابی آسیب ٪۷۸.۹ به دست آمد که با استفاده از ابر نقطه‌ای لیدار و ارزیابی‌های کارشناسی ۱۹۵۳ ساختمان در مناطق به شدت آسیب‌دیده محاسبه شد. زلزله سال ۲۰۱۰ هائیتی نشان‌دهنده کاربرد موثر لیدار هوابرد برای افزایش کارایی و سرعت انجام عملیات پاسخ‌دهی به شرایط اضطراری است. (اکسل و آرت، ۲۰۱۷).

۵- یافته های تحلیلی دقت و خطا:

از نظر فنی، مهم‌ترین مزیت لیدار در مدیریت بحران، دقت بالای ارتفاعی آن است. به عنوان مثال در سیلاب، دقت عمودی داده‌های لیدار هوابرد و پهپادی معمولاً در بازه ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر است، در حالی که این مقدار برایDEM های ماهواره‌ای رایج نظیر SRTM معمولاً بیش از ۳ تا ۵ متر است.(وودر و همکاران، ۲۰۱۲) این اختلاف دقت، تأثیر مستقیمی بر نتایج مدل‌سازی سیلاب دارد؛ به‌گونه‌ای که خطاهای کوچک ارتفاعی می‌توانند منجر به برآورد نادرست عمق و گستره سیلاب شوند. براساس یافته تریپکلی و همکاران (۲۰۲۲) استفاده از لیدار پهپادی در مدل‌سازی سیلاب شهری، مرحله پیشگیری و آمادگی، مدل‌های DTM برای شناسایی دقیق مسیرهای جریان، مناطق تجمع آب و نقاط ضعف سامانه‌های زهکشی شهری، می‌تواند دقت پیش‌بینی پهنه‌های آب‌گرفتگی را تا ۳۰–۴۰٪ نسبت به استفاده از داده‌های ارتفاعی کم‌دقت افزایش دهد. در مرحله پاسخ به بحران، لیدار پهپادی به دلیل سرعت بالای برداشت داده و انعطاف‌پذیری عملیاتی، امکان تهیه اطلاعات به‌روز از مناطق سیل‌زده را در مدت‌زمان کوتاه فراهم می‌کند. این ویژگی به‌ویژه در مناطق شهری متراکم که دسترسی زمینی محدود است، اهمیت بالایی دارد.

در پژوهشی دیگر در خصوص دقت متوسط برآورد زیست‌توده، نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که لیدار دقیق‌ترین حسگر برای برآورد کمّی پارامترهای سه‌بعدی است. مطالعات مبتنی بر حوادث طبیعی و بحرانهای ایجادشده، بالاترین مقدار ضریب تعیین متوسط و کمترین خطای پیش‌بینی متوسط) ٪۱۴ را ثبت کرده‌اند. این عملکرد به‌طور معناداری بهتر از رادار با و خطای ٪۲۵ و همچنین حسگرهای اپتیکی چندطیفی با تفکیک متوسط و خطای ٪۳۲ و تفکیک درشت و خطای ٪۴۲ است. این آمار به‌وضوح نشان می‌دهد که داده‌های لیدار به‌دلیل ماهیت سه‌بعدی و حساسیت به ساختار عمودی، بیشترین قابلیت را برای استخراج شاخص‌های دقیق آسیب و تغییرات ارتفاعی دارند.

جدول ۶. خلاصه دقت برآورد زیست‌توده هوایی با داده‌های سنجش‌ازدور در آفریقا

نوع حسگر	میانگین خطای پیش‌بینی	میانگین ضریب تعیین(R^2)
حسگرهای فعال		
لیدار (۰.۵ سانتی‌متر تا ۵ متر)	٪14	0.89
رادار (۱ تا ۱۰ متر)	٪25	0.74
ابرطیفی	—	0.83
حسگرهای چندطیفی		
تفکیک مکانی بالا< 5 m	٪27	0.75
تفکیک مکانی متوسط10–60 m	٪32	0.68
تفکیک مکانی پایین:250–1000 m	٪42	0.58

نتایج پژوهش تریپکلی و همکاران نشان می‌دهد که استفاده از مدل‌های ارتفاعی بسیار پرتفکیک (۰.۳ متر) استخراج‌شده از-UAV LiDAR، منجر به بهبود چشمگیر دقت شبیه‌سازی سیلاب شهری نسبت بهDEM های ماهواره‌ای با تفکیک ۱۰ متر می‌شود. این افزایش دقت به‌طور مستقیم در کاهش خطای برآورد حجم و مسیر رواناب منعکس شده است، به‌طوری‌که استفاده ازDEM های کم‌تفکیک باعث بیش‌برآورد جریان‌های سطحی به میزان حدود 15% در مناطق شیب‌دار و تا 62.5% در مناطق شهری مسطح شده است. از منظر اقتصادی، هرچند داده‌برداری UAV-LiDAR هزینه اولیه بیشتری نسبت به داده‌های ماهواره‌ای آزاد دارد، اما

افزایش دقت مدل‌سازی، امکان شناسایی دقیق موانع ریزمقیاس شهری نظیر دیوارها، پل‌ها و طاق‌ها را فراهم می‌کند که نقش کلیدی در مسیر حرکت سیلاب دارند. این موضوع باعث کاهش خطا در تعیین مناطق پرخطر، بهینه‌سازی محل اجرای اقدامات حفاظتی و جلوگیری از هزینه‌های ناشی از تصمیم‌گیری‌های نادرست در مدیریت بحران می‌شود. علاوه بر این، انعطاف‌پذیری UAV-LiDAR در برداشت سریع داده‌ها پس از وقوع رخدادهای حدی، آن را به ابزاری کارآمد برای مرحله پاسخ اضطراری و بازسازی پس از بحران تبدیل می‌کند، به‌ویژه در مناطق شهری پویا که تغییرات توپوگرافی در بازه‌های زمانی کوتاه رخ می‌دهد. جزئیات بیشتر در جدول ۷ بیان شده است.

جدول ۷- مقایسه عملکرد داده‌های UAV-LiDAR وDEM های کم‌تفکیک در ارزیابی خطر سیلاب شهری

شاخص ارزیابی	ماهواره‌ای کم‌تفکیک DEM	UAV-LiDAR
تفکیک مکانی مدل ارتفاعی	متر 10	متر 0.3
نوع داده ارتفاعی	منطقه‌ای DTM	شامل ساختمان و ریزتوپوگرافی DTMbs
خطای برآورد رواناب در مناطق شیب‌دار	مبنای مقایسه	15% ≈ کاهش
خطای برآورد رواناب در مناطق مسطح شهری	مبنای مقایسه	62.5%کاهش تا
شناسایی موانع بحرانی (دیوار، پل، طاق)	غیرقابل تشخیص	قابل تشخیص دقیق
قابلیت به‌روزرسانی سریع پس از حادثه	محدود	بسیار بالا
مناسب برای مدیریت بحران محلی	متوسط	بسیار بالا

۶- تحلیل اقتصادی و موازنه فنی- اقتصادی در مدیریت بحران:

از نظر اقتصادی، فناوری لیدار نه‌تنها به‌عنوان یک ابزار برداشت داده، بلکه به‌عنوان سرمایه‌گذاری راهبردی در کاهش هزینه‌های بحران قابل تحلیل است.

جدول ۸ نشان می‌دهد که لیدار هواپایه می‌تواند زمان ارزیابی از چند هفته به چند ساعت کاهش دهد که در بحران‌های بزرگ منجر به کاهش هزینه‌های پاسخ و بازسازی و تخصیص بهینه منابع می‌شود؛ هرچند هزینه اولیه جمع‌آوری داده بالا است، اثر ارزش اقتصادی و عملیاتی مطالعات سریع بسیار بالاست.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

جدول۸- استفاده اقتصادی از داده های لیدار در مدیریت بحران و رویدادهای مخرب

پلتفرم لیدار	نمونه کاربرد بحرانی	منافع اقتصادی غیرمستقیم	منافع اقتصادی مستقیم	هزینه پردازش	هزینه جمع‌آوری داده
هواپایه(ALS)	سیلاب‌های گسترده، هاریکن	کاهش خسارات آتی از طریق مدل‌سازی دقیق خطر	کاهش هزینه بازدیدهای میدانی گسترده	متوسط	بالا
پهپادی(UAV-LiDAR)	زلزله، رانش موضعی	افزایش ایمنی تیم‌های امداد	کاهش زمان پاسخ اضطراری	متوسط تا بالا	پایین تا متوسط
ماهواره‌ای (ICESat-2, GEDI)	پایش بلندمدت خطرات	بهبود تصمیم‌سازی کلان و سیاست‌گذاری	پایش رایگان و مداوم	پایین	بسیار پایین (داده رایگان)

مطابق با جدول مذکورانتظار می روداستفاده ترکیبی یا ادغام داده‌های لیدار مستقل از نوع سکو با ابزارهای دیگر باعث کاهش نیاز به ماموریت‌های میدانی خطرناک و سرعت بخشیدن به برنامه‌ریزی پاسخ اضطراری شود، در حالی که تهیه تصاویر دقیق‌تر در مقیاس محلی می‌تواند هزینه کلی مدیریت بحران را کاهش دهد. تجمیع داده‌های لیدار فضایی با مدل‌های دیگر می‌تواند مدیریت خطرات بلندمدت را مقرون به صرفه‌تر کند (مثلاً پیش‌بینی مناطق پرخطر)، مخصوصاً در مقیاس ملی/جهانی؛ اگرچه تفکیک زمانی کمتر از هواپایه و پهپاد است، پوشش جهانی و دسترسی رایگان آن ارزش افزوده عظیمی دارد. بر اساس جدول ۹، داده‌های لیدار در بازه تفکیک مکانی بسیار بالا (۰٫۵ سانتی‌متر تا ۱۰ سانتی‌متر) قرار دارند و قابلیت تحلیل در مقیاس پیکسلی و موضعی را فراهم می‌کنند، اما با هزینه های اخذ داده چالش کلیدی است. در مقابل، داده‌های اپتیکی با تفکیک بالا (<5 m) اگرچه هزینه کمتری نسبت به لیدار دارند، اما همچنان در رده هزینه بالا قرار می‌گیرند. داده‌های با تفکیک متوسط (۱۰–۶۰ متر) مانند Landsat و SPOT با هزینه کم یا رایگان، صرفاً برای تحلیل‌های مقیاس بزرگ مناسب‌اند. بنابراین، جدول به‌روشنی نشان می‌دهد که لیدار بیشترین دقت و جزئیات مکانی را ارائه می‌دهد، اما استفاده عملیاتی آن در مدیریت بحران نیازمند توجیه اقتصادی یا تمرکز بر مناطق بحرانی محدود است. اگرچه حسگرهای اپتیکی چندطیفی به‌طور عملیاتی به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند، حسگرهای فعال مانند لیدار و رادار به دلیل هزینه بالا، عمدتاً برای مطالعات موضعی با دقت بالا به‌کار می‌روند.

جدول ۹. مصالحه بین دقت پیش‌بینی و هزینه حسگرها در برآورد زیست‌توده هوایی

داده‌های ماهواره‌ای در دسترس	تفکیک مکانی حسگر	هزینه اخذ داده	مقیاس و کاربری نقشه‌برداری
لیدار، رادار، ابرطیفی	بسیار بالا (۰.۵ تا ۱۰ سانتی‌متر)	بسیار پرهزینه	مقیاس پیکسلی
QuickBird ،Ikonos، WorldView-2 ،RapidEye	بالا 5 > متر	پرهزینه	اعتبارسنجی در مقیاس محلی
Landsat ،SPOT	متوسط (۱۰ تا ۶۰ متر)	کم‌هزینه یا رایگان	نقشه‌برداری زیست‌توده در مقیاس کوچک و بزرگ
MODIS ،AVHRR	پایین (۲۵۰ تا ۱۰۰۰ متر)	رایگان	برآورد و نقشه‌برداری در مقیاس بسیار وسیع

در انتخاب پلتفرم لیدار برای مدیریت بحران، همواره یک موازنه ذاتی میان دقت، پوشش و هزینه وجود دارد. لیدار پهپادی بیشترین دقت و انعطاف‌پذیری زمانی را ارائه می‌دهد، اما پوشش مکانی محدود آن، استفاده را به مقیاس محلی محدود می‌سازد. در مقابل،

نسخه پیش‌نویس پیش از انتشار

لیدار هواپایه نقطه تعادل میان دقت و پوشش را ایجاد می‌کند و به همین دلیل در بسیاری از مطالعات سیلاب، طوفان و رانش زمین به‌عنوان گزینه اصلی انتخاب می‌شود. لیدار ماهواره‌ای، اگرچه از نظر دقت مکانی ضعیف‌تر است، اما پوشش جهانی و هزینه نزدیک به صفر برای کاربر نهایی، آن را به گزینه‌ای بی‌رقیب برای پایش بلندمدت خطرات و تحلیل روندهای اقلیمی–محیطی تبدیل کرده است.

بر اساس تحلیل ارائه‌شده توسط هزینه‌های مرتبط با پروژه‌های لیدار پهپادی را می‌توان به دو بخش اصلی اخذ داده و پردازش داده تفکیک کرد. هزینه اخذ داده به عواملی نظیر نوع حسگر لیدار، ارتفاع و الگوی پرواز، تراکم نقطه‌ای مورد نیاز و وسعت منطقه مطالعه وابسته است. در پروژه‌های مشابه، هزینه برداشت داده لیدار پهپادی معمولاً در بازه ۲۰۰ تا ۵۰۰ دلار به ازای هر کیلومتر مربع است که این مقدار به‌طور قابل‌توجهی کمتر از هزینه لیدار هوابرد سرنشین‌دار است. در بخش پردازش داده، هزینه‌ها شامل نیروی انسانی متخصص، نرم‌افزارهای پردازش ابرنقاط و منابع محاسباتی می‌شود. مطابق با نتایج پژوهش تریپکلی و همکاران (۲۰۲۲) هزینه پردازش داده‌های لیدار برای تولیدDTM های دقیق، معمولاً در بازه ۱۰۰ تا ۳۰۰ دلار به ازای هر کیلومتر مربع قرار دارد. پیچیدگی محیط شهری، تراکم پوشش گیاهی و دقت مورد انتظار از جمله عواملی هستند که می‌توانند این هزینه را افزایش دهند .

جدول ۱۰ -هزینه اخذ و پردازش داده‌های ارتفاعی لیدار

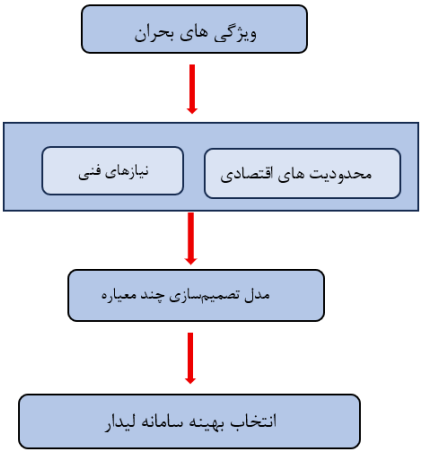
روش برداشت داده	تفکیک مکانی افقی	دقت عمودی تقریبی	هزینه پردازش (USD/km²)	هزینه اخذ داده (USD/km²)
LiDARپهپادی(UAV LiDAR)	0.1–0.5 m	5–10 cm	100–300	200–500
LiDARهوابرد سرنشین‌دار	0.5–2 m	10–20 cm	150–400	800–2000
فتوگرامتری پهپادی(SfM)	0.05–0.3 m	20–50 cm	80–250	50–200
DEMماهواره‌ای تجاری (Airbus, TanDEM-X)	5–12 m	1–3 m	10–30	10–50
DEMرایگان(SRTM / ASTER)	30 m	>5 m	5–20	رایگان

مقایسه‌ای از هزینه‌های اخذ و پردازش داده‌های ارتفاعی با استفاده از روش‌های مختلف در جدول ۱۰ ارائه شده است. بر این اساس ، لیدار پهپادی با وجود هزینه بالاتر نسبت بهDEMهای ماهواره‌ای، دقت عمودی بسیار بالاتری (در حد چند سانتی‌متر) فراهم می‌کند که آن را برای مطالعات دقیق توپوگرافی و مدل‌سازی هیدرولوژیکی محلی به گزینه‌ای مناسب تبدیل می‌کند. در مقایسه با لیدار هوابرد سرنشین‌دار، هزینه اخذ داده لیدار پهپادی به‌طور قابل‌توجهی کمتر است، در حالی که تفکیک مکانی بالاتر و انعطاف‌پذیری عملیاتی بیشتری ارائه می‌دهد. با این حال، هزینه پردازش داده‌های لیدار، به‌ویژه در محیط‌های شهری پیچیده و مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم، بخش قابل‌توجهی از کل هزینه پروژه را تشکیل می‌دهد تریپکلی و همکاران (۲۰۲۲) مطابق با تحلیل ارائه‌شده توسط وودر و همکاران ۲۰۱۲ اگرچه هزینه اولیه اخذ داده‌های لیدار نسبت به داده‌های اپتیکی بالاتر است، اما نسبت هزینه به دقت آن در کاربردهای بحرانی بسیار مطلوب‌تر ارزیابی می‌شود، به‌ویژه زمانی که هزینه‌های عملیات زمینی، زمان اجرا و ریسک انسانی نیز در نظر گرفته شود.

۷- مدل کاربردی پیشنهادی برای به‌کارگیری لیدار در مدیریت بحران

مدلهای پیشنهادی و عملیاتی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که تصمیم سازی بهینه انجام شود و مواردی نظیر انتخاب نوع پلتفرم، لحاظ شدن هزینه فایده، رعایت تعادل و موازنه بین دقت و پوشش متناسب با مراحل بحران رعایت شود. استفاده از چارچوب تصمیم‌سازی فنی– اقتصادی مبتنی بر MCDA برای به‌کارگیری لیدار در مدیریت بحران، چارچوب کلان(DSS[16]) در قالب یک DSS سه‌لایه‌ای ارائه می‌شود (شکل۳):

لایه اول لایه ورودی بحران: نوع بحران (سیل، زلزله، رانش، طوفان و ...)، مقیاس مکانی، فوریت زمانی، محدودیت دسترسی و ایمنی است. لایه دوم را معیارهای فنی تشکیل می دهد مانند دقت و رزولوشنها، چگالی نقاط، زمان دسترسی به داده ها و معیارهای اقتصادی نظیر هزینه‌های جمع آوری و پردازش و هزینه های کل و فایده در کنار معیارهای عملیاتی شامل محدودیتها، نیروی انسانی، ایمنی و قابلیت استقرار سریع می باشد. در لایه سوم می توان با وزن دهی به معیارها، ارزیابی گزینه ها امتیاز کسب شده خروجی ها را نمایش داد و در نهایت لایه آخر تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب بهینه‌ترین پلتفرم لیدار (یا ترکیب آن‌ها) برای یک سناریوی بحرانی خاص با درنظرگرفتن محدودیت‌های فنی، اقتصادی و عملیاتی که ارائه خواهد شد.



شکل ۳ .چارچوب مفهومی مدل پیشنهادی تصمیم‌سازی فنی–اقتصادی برای انتخاب سامانه‌های لیدار در مدیریت بحران.

استفاده از لیدار پهپادی، لیدار هواپایه، لیدار فضایی و مدل ترکیبی که معمولا بهترین حالت در اکثر بحران‌ها است. البته همیشه مباحث اقتصادی در این زمینه به عنوان یک گلوگاه سیستمی و تاثیر گذار خروجی را تعیین می‌کند. خروجی مدلهای پیشنهادی معمولا به گونه ایی طراحی می شوند که اگر پارامتر شاخص کل از یک بزرگتر باشد استفاده از لیدار کاملاً توجیه‌پذیر است و در غیر این صورت استفاده محدود یا ترکیبی پیشنهاد می‌شود و در لایه چهارم انتخاب پلتفرم در جدول ۱۱ ارائه می‌شود.

[16] **Decision Support System**

جدول ۱۱- خروجی مدلهای تصمیم گیری برای لیدار

پلتفرم پیشنهادی	شرایط بحران
لیدار پهپادی	فوریت بالا + مقیاس کوچک
لیدار هوایی	مقیاس متوسط + دقت بالا
لیدار فضایی	پایش ملی/بلندمدت
ادغام چندپلتفرمی	بحران پیچیده

به عنوان یک حالت بسیار ساده سازی شده در این خصوص می توان به سناریو سیل ناگهانی شهری اشاره کرد. با وسعتی به میزان مقیاس ۳۰ km^2 و فوریت بسیار بالا و رزولوشن مکانی و دقت بهتر از 10 cm لحاظ می شود در این رویداد خسارت بالقوه بسیار شدید پیش‌بینی خواهد شد. تحلیل مدل برای بکار گیری لیدار دقت عالی، پوشش ناکافی برای لیدارهای پهپادی، دقت و پوشش مناسب برای لیدارهای هواپایه و عدم وجود رزولوشن مناسب (دقت ناکافی) برای لیدارهای فضا پایه برآورد می‌شود. که نهایتا منجر به استفاده ترکیبی از لیدار پهپادی و هواپایه در مناطق بحرانی خواهد شد.

نتایج نشان می‌دهد که انتخاب سامانه لیدار مناسب در مدیریت بحران، صرفاً یک تصمیم فنی یا اقتصادی مجزا نیست، بلکه یک مسأله تصمیم‌گیری چندبعدی است که نیازمند درنظرگرفتن هم‌زمان دقت، پوشش، زمان دسترسی، هزینه و محدودیت‌های عملیاتی می‌باشد. نتایج نشان می دهد که راهبردهای ترکیبی در اغلب سناریوهای بحرانی بالاترین امتیاز نهایی را کسب می‌کنند. این نتیجه بیان میکند که ترکیب داده‌های لیدار فضایی برای پایش گسترده، لیدار هواپایه برای تحلیل منطقه‌ای و لیدار پهپادی برای برداشت‌های دقیق موضعی، بهترین توازن میان معیارهای فنی، اقتصادی و عملیاتی را فراهم می‌کند. وزن‌دهی معیارها نشان میدهد که در مراحل پاسخ اضطراری، معیارهای فنی و زمانی از اهمیت بالاتری برخوردارند، در حالی که در مراحل بازسازی و کاهش خطر، معیارهای اقتصادی و پوشش مکانی نقش پررنگ‌تری ایفا می‌کنند. این موضوع بر ضرورت پویایی وزن معیارها در مراحل مختلف چرخه مدیریت بحران تأکید دارد.

۸- نتیجه گیری:

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که فناوری لیدار، به عنوان مکمل سایر فناوری‌های سنجش‌ازدور که عمدتاً بر اطلاعات دوبعدی یا شاخص‌های طیفی متکی هستند، در برداشت تغییرات ارتفاعی، جابه‌جایی‌های سه‌بعدی و امکان داده‌برداری مجدد در بازه‌های زمانی کوتاه، یکی از ارکان اصلی ارزیابی خسارات و تصمیم‌سازی در مدیریت بحران‌های طبیعی نظیر سیل و زلزله است و مستقیماً با شدت و الگوی خسارت در بحران‌های هیدرولوژیکی و لرزه‌ای مرتبط‌اند. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های لیدار با خطای پیش‌بینی حدود ۱۴٪، بالاترین دقت را در میان تمامی حسگرهای سنجش‌ازدور دارند. این سطح از دقت برای ارزیابی خسارات سازه‌ای ناشی از سیل و زلزله اهمیت کلیدی دارد، زیرا چنین مخاطراتی عمدتاً با تغییرات ارتفاعی، جابجایی‌های سه‌بعدی، نشست زمین و تغییر شکل سازه‌ها همراه هستند. در ارزیابی خسارت زلزله، لیدار امکان استخراج کاهش ارتفاع ساختمان، تغییر شکل بام‌ها، و جابجایی‌های

نسخه پیش از انتشار

دائمی را فراهم می‌کند که شاخص‌های مستقیمی از شدت آسیب سازه‌ای محسوب می‌شوند. در مقایسه، حسگرهای اپتیکی چندطیفی با خطای بالاتر 27 تا ۴۲٪ عمدتاً به تغییرات ظاهری وابسته‌اند و در تشخیص آسیب‌های متوسط یا جزئی عملکرد ضعیف‌تری دارند.

در سناریوهای سیلابی، دقت بالای عمودی لیدار که معمولاً در بازه 5 تا ۱۰ سانتی‌متر گزارش می‌شود، امکان مدل‌سازی دقیق تراز آب، عمق سیلاب، فرسایش بستر و تخریب زیرساخت‌ها را فراهم می‌سازد. اختلاف ارتفاع‌های استخراج‌شده از مدل‌های سطح رقومی پیش و پس از رخداد، مبنای کمی مناسبی برای شناسایی مناطق دچار فرسایش، نشست یا تخریب سازه‌ای ناشی از جریان سیلاب ایجاد می‌کند؛ قابلیتی که با داده‌های اپتیکی یا راداری با دقت کمتر به‌سختی قابل دستیابی است. نتایج نشان می‌دهد که لیدار در رده تفکیک مکانی بسیار بالا (۰.۵ تا ۱۰ سانتی‌متر) قرار می‌گیرد و قابلیت تحلیل در مقیاس پیکسلی و موضعی را داراست. در مجموع، نتایج تخمین می زنند که لیدار تنها فناوری سنجش‌ازدوری است که می‌تواند خسارات ناشی از سیل و زلزله را به‌صورت کمّی، سه‌بعدی و با خطای کمتر از ۱۵٪ ارزیابی کند؛ هرچند هزینه بالا، استفاده گسترده آن را به کاربردهای هدفمند و ترکیب با داده‌های کم‌هزینه‌تر محدود می‌سازد.

کارایی لیدار در مدیریت بحران به نوع پلتفرم مورد استفاده و میزان تطابق آن با ویژگی‌های بحران وابسته است. لیدار پهپادی، به‌دلیل پرواز در ارتفاع پایین، تراکم نقطه‌ای بسیار بالا و انعطاف‌پذیری عملیاتی، مؤثرترین گزینه برای پاسخ اضطراری، ارزیابی سریع خسارات موضعی و برداشت دقیق زیرساخت‌های شهری و سازه‌های آسیب‌دیده در بحران‌هایی با مقیاس مکانی محدود و فوریت زمانی بالا محسوب می‌شود. در مقابل، لیدار هواپایه با ایجاد توازن میان دقت ارتفاعی و پوشش مکانی، نقش کلیدی در مدل‌سازی سیلاب‌های گسترده، تحلیل رانش زمین و ارزیابی منطقه‌ای خسارات ایفا می‌کند و به‌عنوان گزینه‌ای عملیاتی برای بحران‌های متوسط تا بزرگ در مقیاس منطقه‌ای و ملی شناخته می‌شود. لیدار فضاپایه نیز، علی‌رغم محدودیت در تفکیک مکانی، به‌واسطه پوشش جهانی، تکرارپذیری زمانی و هزینه بسیار پایین داده برای کاربر نهایی، ابزار راهبردی برای پایش بلندمدت مخاطرات، تحلیل روندهای تغییرات محیطی و پشتیبانی از سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی کلان کاهش ریسک به‌شمار می‌رود. تحلیل‌های کمی ارائه‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های لیدار می‌تواند دقت مدل‌سازی سیلاب و ارزیابی خسارات سازه‌ای را تا حدود ۳۰–۴۰٪ نسبت به داده‌های ارتفاعی کم‌تفکیک افزایش دهد و عدم‌قطعیت در برآورد خسارت را به‌طور معناداری کاهش دهد. این بهبود دقت، به‌ویژه در بحران‌هایی نظیر سیل و زلزله که پیامدهای آن‌ها به تغییرات جزئی ارتفاعی و جابه‌جایی‌های سه‌بعدی وابسته است، اهمیت حیاتی دارد. قابلیت مقایسه داده‌های لیدار پیش و پس از رخداد، امکان استخراج شاخص‌های کمّی نظیر نشست زمین، تخریب سازه‌ها و تغییرات مورفولوژیکی را فراهم می‌کند که مبنای علمی قابل اتکایی برای اولویت‌بندی عملیات امداد، بازسازی و تخصیص بهینه منابع محسوب می‌شود.

۹- چشم انداز جهانی اقتصادی لیدار

برآوردها نشان می‌دهد که بازار سامانه‌های لیدار در سال ۲۰۲۵ ارزشی در حدود ۳۹۹ میلیون دلار داشته و انتظار می‌رود تا سال ۲۰۳۲ به حدود ۸۴۳ میلیون دلار افزایش یابد که معادل CAGR برابر با ۱۱.۶٪ است. این رشد پایدار بیانگر گسترش تدریجی کاربردهای لیدار در حوزه‌هایی نظیر مهندسی عمران، نقشه‌برداری شهری، پایش زیرساخت‌ها و مدیریت ریسک‌های محیطی است. از منظر جغرافیایی، آمریکای شمالی با حدود ۳۰٪ سهم بازار بزرگ‌ترین بازار لیدار محسوب می‌شود و پس از آن اروپا و ژاپن قرار دارند

که در مجموع بیش از ٪۴۰ سهم بازار جهانی را به خود اختصاص داده‌اند؛ این توزیع نشان‌دهنده بلوغ بازار در کشورهای توسعه‌یافته و نقش سرمایه‌گذاری‌های زیرساختی در رشد فناوری لیدار است . (هانکوک و همکاران، ۲۰۱۹).

در کنار بازار تجهیزات، بازار خدمات لیدار نیز رشد قابل‌توجهی را تجربه کرده است؛ به‌طوری که ارزش این بازار در سال ۲۰۲۴ حدود ۲.۸ میلیارد دلار برآورد شده و پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۳۴ به ۸.۷ میلیارد دلار برسد که معادل نرخ رشد مرکب سالانه ٪۱۲.۱ است. بخش حمل‌ونقل با سهمی در حدود ٪۳۵، بزرگ‌ترین مصرف‌کننده خدمات لیدار به‌شمار می‌رود؛ به‌ویژه در پروژه‌های مرتبط با شهرهای هوشمند و زیرساخت‌های خودروهای خودران را شامل می‌شود.

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

مراجع:

Abdulwahid, W. M., & Pradhan, B. (2017). Landslide vulnerability and risk assessment for multi-hazard scenarios using airborne laser scanning data (LiDAR). *Landslides, 14*(3), 1057–1076. https://doi.org/10.1007/s10346-016-0744-0

Axel, C., & van Aardt, J. (2017). Building damage assessment using airborne LiDAR. *Journal of Applied Remote Sensing, 11*(4), 046024. https://doi.org/10.1117/1.JRS.11.046024

Bolcek, J., Gibril, M. B. A., Veverka, J., Sloboda, Š., Maršálek, R., & Götthans, T. (2025). Spaceborne LiDAR Systems: Evolution, Capabilities, and Challenges. *Sensors*, *25*(12), 3696. https://doi.org/10.3390/s25123696

Dube, T., Mutanga, O., & Ismail, R. (2016). Quantifying aboveground biomass in African environments: A review of the trade-offs between sensor estimation accuracy and costs. *Tropical Ecology, 57*(3), 393–405.

Dunbar, P. K., & Abbott, E. A. (2003). *Global landslide and avalanche hotspots*. United States Geological Survey (USGS) Open-File Report 03-456.

Eslamizade, F., Rastiveis, H., Zahraee, N. K., Jouybari, A., & Shams, A. (2022). Decision-level fusion of satellite imagery and LiDAR data for post-earthquake damage map generation. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 67*, 102661. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102661

Falorca, J. F., Miraldes, J. P., & Lanzinha, J. C. G. (2021). New trends in visual inspection of buildings and structures: Study for the use of drones. *Open Engineering, 11*(1), 734–743.

Geiss, C., Taubenböck, H., & Wurm, M. (2015). Estimation of seismic building structural types using multi-sensor remote sensing and machine learning techniques. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 104*, 175-188. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.07.016

Ghaffarian, S., & Emtehani, S. (2021). Monitoring urban deprived areas with remote sensing and machine learning in case of disaster recovery. *Climate, 9*(4), 58.

Ghaffarian, S., Kerle, N., & Filatova, T. (2018). Remote sensing-based proxies for urban disaster risk management and resilience: A review. *Remote Sensing, 10*(11), 1760.

Gong, J., Wang, C., Zhang, Y., & Li, Z. (2024). Multi-scale analysis of urban damage using bi-temporal airborne LiDAR data after Hurricane Michael. *Remote Sensing of Environment, 301*, 113925. https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113925

Guha-Sapir, D., Below, R., & Hoyois, P. (2018). *EM-DAT: The emergency events database*. Université Catholique de Louvain (UCL)–CRED. https://www.emdat.be

Hancock, S., Armston, J., Hofton, M., Sun, X., Tang, H., Duncanson, L., … Dubayah, R. (2019). The GEDI lidar instrument and mission performance. *Remote Sensing of Environment, 221*, 654–665. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.032

Hancock, S., Arnston, J., Disney, M., & Dubayah, R. (2021). A global lidar system for ecosystem structure and dynamics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A, 379*(2199), 20200157. https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0157

Jakovljevic, G., Govedarica, M., Alvarez-Taboada, F., & Pajic, V. (2019). Accuracy assessment of deep learning based classification of LiDAR and UAV point clouds for DTM creation and flood risk mapping. *Geosciences, 9*(7), 323. https://doi.org/10.3390/geosciences9070323

Kostrikov, S. V., & Serohin, D. S. (2025).Urban change detection with airborne LiDAR for hostilities' impact estimation: a case study of Kharkiv.European Journal of Remote Sensing.

Lin, C. W., Chang, W. S., Liu, S. H., Tsai, T. T., & Lee, S. P. (2014). Detection of landslides using multi-temporal airborne LiDAR data. *Engineering Geology, 175*, 24-36. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.012

Liu, W., & Yamazaki, F. (2018). Detection of collapsed buildings due to the 2016 Kumamoto earthquake using multi-temporal airborne LiDAR data. *Natural Hazards, 92*(2), 1073-1089. https://doi.org/10.1007/s11069-018-3240-0

Macabuag, J., Rossetto, T., & Lloyd, T. O. (2022). Rapid assessment of building damage after earthquakes using remote sensing: A review. *Bulletin of Earthquake Engineering, 20*(2), 1001-1025. https://doi.org/10.1007/s10518-021-01278-8

Markus, T., Neumann, T., Martino, A., Abdalati, W., Brunt, K., Csatho, B., … Zwally, J. (2017). The Ice, Cloud, and Land Elevation Satellite-2 (ICESat-2): Science requirements, concept, and implementation. *Remote Sensing of Environment, 190*, 260–273. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.029

Moya, L., Yamazaki, F., Liu, W., & Yamada, M. (2018). Detection of collapsed buildings from LiDAR data due to the 2016 Kumamoto earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 18*(1), 65–78.

Neuenschwander, A., & Pitts, K. (2019). The ATL08 land and vegetation product for the ICESat-2 Mission. *Remote Sensing of Environment, 221*, 247–259. https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.005

Neuenschwander, A., Guenther, E., White, J. C., & Duncanson, L. I. (2020). Validation of ICESat-2 terrain and canopy heights in boreal forests. *Remote Sensing of Environment, 251*, 112110. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112110

Nissen, E., Krishnan, A. K., Arrowsmith, J. R., & Saripalli, S. (2012). Three-dimensional surface displacements and rotations from differencing pre- and post-earthquake LiDAR point clouds. *Geophysical Research Letters, 39*(16), L16301. https://doi.org/10.1029/2012GL052460

Pittore, M., Wieland, M., & Fleming, K. (2017). Perspectives on global dynamic exposure modelling for geo-risk assessment. *Natural Hazards, 86*(S1), 7–30. https://doi.org/10.1007/s11069-016-2437-3

Qi, W., Lee, S. K., Hancock, S., Luthcke, S., Tang, H., Armston, J., & Dubayah, R. (2019). Improved forest height estimation by combining simulated GEDI and ICESat-2 data. *Environmental Research Letters, 14*(12), 125010. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab59d9

نسخه پذیرفته شده پیش از انتشار

Saganeiti, L., Pilogallo, A., Faruolo, G., Scorza, F., & Murgante, B. (2020). Territorial fragmentation and urban sprawl assessment through ecological network analysis. *Sustainability, 12*(9), 3726. https://doi.org/10.3390/su12093726

Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2018). *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing* (2nd ed.). CRC Press.

Smith, K. E. (2020). High-resolution topographic data for storm surge modeling: A LiDAR-based approach. *Journal of Coastal Research, 36*(4), 746–757. https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-19-00128.1

Spence, R., & Coburn, A. (2002). *Earthquake protection* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Sun, X. (2024). Review of Photodetectors for Space Lidars. *Sensors*, *24*(20), 6620. https://doi.org/10.3390/s24206620

Sugiarto, A. R., Abdi, G. N., Sadidan, I., Fitrianto, M. R., & Ramadhani, F. (2025). Road Condition Monitoring with Drones and LiDAR in Infrastructure Technology. *Semesta Teknika*, *28*(1), 113–124. https://doi.org/10.18196/st.v28i1.25170

Trepekli, K., Balstrøm, T., Friborg, T., Fog, B., Allotey, A. N., Kofie, R. Y., & Møller-Jensen, L. (2022). UAV-borne LiDAR-based elevation modelling for improving local-scale urban flood risk assessment. *Natural Hazards, 113*, 423–451. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05308-9

UNISDR. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.

Voigt, S., Kemper, T., Riedlinger, T., Kiefl, R., Scholte, K., & Mehl, H. (2007). Satellite image analysis for disaster and crisis-management support. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 45*(6), 1520–1528. https://doi.org/10.1109/TGRS.2007.895830

Vosselman, G., & Maas, H.-G. (Eds.). (2010). *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing.

Wallace, L., Lucier, A., Watson, C., & Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing, 4*(6), 1519–1543. https://doi.org/10.3390/rs4061519

Whitworth, M. R. Z., Giles, D. P., & Murphy, W. (2022). The use of airborne LiDAR for rapid assessment of earthquake-induced landsliding. *Landslides, 19*(4), 935–953. https://doi.org/10.1007/s10346-021-01799-y

Wulder, M. A., White, J. C., Nelson, R. F., Næsset, E., Ørka, H. O., Coops, N. C., Hilker, T., Bater, C. W., & Gobakken, T. (2012). Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote Sensing of Environment, 121*, 196–209. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.001