



### Understanding Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Countermeasures Against Their Threats in Urban Environments (Case Study: Shahid Mahallati Residential Complex, Shahid Chamran Residential Complex, and Sarv Residential Complex of Shahid Beheshti University)

Abolfazl Ghorbani<sup>1\*</sup>, Mostafa Behzadfar<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Correspondence: Assistant Professor, Department of Urban Planning, Faculty of Art and Architecture, University of Mazandaran, Babolsar, Iran. Email Address: a.ghorbani@umz.ac.ir

<sup>2</sup> Professor, Department of Urban Planning, School of Architecture and Environmental Design, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email Address: behzadfar@iust.ac.ir

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Article Type: Research paper

Received: 27 December 2025

Received in revised form: 14 June 2026

Accepted: 13 July 2026

Available online: 21 August 2026

##### Keywords:

Unmanned Aerial Vehicles  
(UAVs) Airspace Management  
Urban Battlefield  
Surface Space  
Super Surface

#### ABSTRACT

The increase in aerial threats of a military nature, particularly Remotely Piloted Vehicles / Unmanned Aerial Vehicles (UAVs / drones), against urban infrastructure has become a fundamental challenge for governments. A structured approach to countering these emerging threats requires a precise understanding of their nature and operational strategies within the multidimensional urban battlefield. This applied study was conducted to re-evaluate the characteristics of drone-based threats and formulate multilayered defense strategies to enhance the physical resilience of urban settlements. Employing a mixed-methods (quantitative-qualitative) approach and using the "backcasting" method to analyze vulnerabilities, data were collected and analyzed through documentary research and field observations across three residential complexes (Shahid Mahallati, Shahid Chamran, and Sarv Complex). The findings demonstrate that effective urban defense necessitates combining "immediate" and "long-term" measures. Immediate measures include deploying physical barrier systems (such as flexible nets and rigid grids) to neutralize the kinetic energy of the projectile prior to impact. Conversely, long-term measures focus on institutionalizing physical passive defense across two dimensions: in the "surface space" dimension, establishing designated air corridors for authorized traffic and locating critical buildings away from main thoroughfares are proposed to hinder the visual navigation of attacking aircraft during satellite navigation system disruptions. In the "above-surface space" dimension, solutions are provided across three scales: at the urban block scale, utilizing heterogeneous height codes to restrict aircraft maneuvers and prevent laser-locking of guided weapons; at the building scale, designing asymmetrical forms and complex facades to induce visual ambiguity; and at the building component scale, implementing sacrificial walls (to disrupt delay-fused munitions), using cast-in-place reinforced concrete (to dissipate blast waves), and applying reflective or rough materials to deflect and scatter guided missile signals.

**Cite this article:** A. Ghorbani and M. Behzadfar, "Understanding Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and Countermeasures Against Their Threats in Urban Environments (Case Study: Shahid Mahallati Residential Complex, Shahid Chamran Residential Complex, and Sarv Residential Complex of Shahid Beheshti University)," Journal of Passive Defence, vol. 17, no. 2, pp. 145-166, 2026. DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1616>



OPEN ACCESS

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.

## Introduction

The exponential increase in aerial threats of a military nature, particularly Remotely Piloted Vehicles and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), against urban infrastructure has emerged as a fundamental challenge for modern governments . Drones operate with extremely low physical and thermal signatures, allowing them to fly at low altitudes and high speeds . This enables them to effectively hide within dense urban or rural clutter, appearing at very short distances and drastically minimizing the reaction time of air defense systems . Furthermore, the widespread accessibility and low cost of commercial drone components have democratized these weapons, transforming them into affordable tactical assets for non-state armed groups and regional actors .

While conventional defense mechanisms heavily rely on technological solutions such as signal jamming and GPS spoofing, these methods encounter severe operational limitations in complex urban environments . Signal jamming can disrupt essential civilian communications, and kinetic takedowns over populated areas yield disastrous collateral consequences . Consequently, addressing these novel threats necessitates a paradigm shift: moving beyond exclusive reliance on airspace monitoring and integrating physical, passive defense strategies directly into the urban fabric and architectural design .

## Objectives

The primary objective of this applied research is to re-evaluate the operational characteristics and offensive strategies of drone-based threats within a multidimensional urban battlefield . Furthermore, the study aims to formulate and propose multilayered physical defense strategies—ranging from immediate post-construction interventions to long-term urban planning—to enhance the structural and physical resilience of urban settlements against UAV strikes .

## Methodology

This research employs a mixed-methods (quantitative-qualitative) approach to analyze urban vulnerabilities . The core analytical framework utilizes the "backcasting" method, which is particularly suited for event-driven phenomena where independent variables cannot be manipulated . By investigating the aerial strikes that occurred during the twelve-day war (June 2025), the study analyzes the cause-and-effect relationships post-incident to extract precise vulnerability patterns .

Data was collected through extensive documentary research and systematic field observations across three specific residential complexes in Tehran: Shahid Mahallati, Shahid Chamran, and the Sarv Complex. These locations were selected due to their strategic demographics, distinctive high-rise rectangular architectural forms, and their geographical proximity to major transportation arteries . The vulnerability of their geometric configurations and material composition was subsequently evaluated against known UAV attack vectors .

## Results and Discussion

### 4.1. Threat Mechanisms and Urban Vulnerability

UAVs execute attacks via two primary methods: ballistic (functioning as suicide weapons with high-speed dive trajectories) and non-ballistic (serving as platforms to drop unguided or precision-guided munitions) . The research highlights a critical security gap in Class G airspace (uncontrolled airspace below 213 meters), which encompasses all urban surface levels and facilitates undetected drone operations .

Field analyses of the targeted complexes revealed severe physical vulnerabilities. The proximity of these complexes to wide highways (e.g., Sadr, Yadegar-e Emam, and Artesh) inadvertently provided

clear linear reference points for the visual navigation systems of attacking aircraft, especially when GPS systems were disrupted . At the building scale, the 14- and 15-story structures exhibited uniform height codes that eliminated the "podium effect"—a phenomenon where surrounding tall buildings block the line of sight for laser target designators . The simple, symmetrical rectangular forms of these buildings, combined with high-contrast facade colors (e.g., red and green outlines on brown backgrounds), facilitated rapid target designation and eliminated visual ambiguity for the attackers . Furthermore, the reliance on brittle masonry (clay blocks) and the absence of secondary sacrificial roofs allowed delay-fuzed munitions to easily penetrate and detonate within interior living spaces .

#### 4.2. Multilayered Defensive Countermeasures

To counter these vulnerabilities, the study categorizes passive defense measures into immediate and long-term actions, applied across surface and supersurface urban domains .

- **Immediate Post-Construction Measures:** These focus on physical barrier systems designed to physically entrap drones or neutralize the kinetic energy of projectiles before impact .

- Tensioned Flexible Nets: Deployed horizontally or vertically over roads, facades, and roofs to catch small, commercial-grade UAVs (Group 1) .

- Rigid Meshes and Panels: Solid protective shields utilized to secure critical buildings and sensitive oil/industrial infrastructure against heavier, tactical UAV impacts .

- **Long-Term Measures (Surface Space):**

- Airspace Management: Establishing designated, structured air corridors (tubes/layers) for authorized drone traffic to reduce airspace complexity and quickly identify unauthorized hostile intrusions .

- Strategic Relocation: Distancing critical buildings from wide highways and prominent linear landmarks to heavily disrupt the visual navigation capabilities of attacking aircraft .

- **Long-Term Measures (Supersurface Space):**

- Urban Block Scale: Enforcing heterogeneous and varied height codes to restrict the air-to-ground approach vectors of UAVs and purposely induce the podium effect, thereby obstructing the line of sight required for laser-guided weapons .

- Building Scale: Designing asymmetrical, multi-faceted architectural forms to create spatial ambiguity, drastically complicating the target marking process for enemy operators .

- Building Component Scale: Implementing multi-layered, sacrificial sloping roofs to trigger delay-fuzed munitions prematurely at a safe stand-off distance . Utilizing cast-in-place reinforced concrete and blast-resistant walls to dissipate blast wave energy and prevent lethal secondary debris . Facades must utilize rough, matte materials with earthy tones to create diffuse reflections that weaken laser return signals, while strictly avoiding flat glass, Plexiglas, or mirror-like surfaces that can trap or clearly reflect targeting lasers .

## Conclusion

Effective urban defense against advanced drone threats cannot be achieved through active technological countermeasures alone; it requires the systematic integration of physical, passive defense strategies . Structural interventions—such as incorporating sacrificial layers, utilizing blast-absorbent concrete, manipulating building heights to disrupt laser guidance, and applying diffuse-reflective facade materials—force hostile forces to compromise between stealth and payload capacity . By embedding these multilayered defenses into the urban fabric, cities can exponentially increase the operational difficulty for attackers, limit structural penetration, and significantly elevate the overall physical resilience of urban settlements in modern warfare.

## بازشناسی مفهوم هواپیمای بدون سرنشین و راهکارهای مقابله با تهدیدات آن‌ها در عرصه شهری (نمونه مورد مطالعه: شهرک شهید محلاتی، شهرک شهید چمران و مجتمع سرو دانشگاه شهید بهشتی)

ابوالفضل قربانی<sup>۱\*</sup>، مصطفی بهزادفر<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه شهرسازی، دانشکده هنر و معماری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران (نویسنده مسئول). رایانامه: a.ghorbani@umz.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد، گروه شهرسازی، دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: behzadfar@iust.ac.ir

### چکیده

### مشخصات مقاله

#### تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۲

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۵/۳۰

#### کلیدواژه‌ها:

وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین

مدیریت حریم هوایی

میدان نبرد شهری

فضای سطحی

فضای رو سطحی

افزایش تهدیدات هوایی با ماهیت نظامی، به‌ویژه پرنده‌های هدایت‌پذیر از دور (پهپادها) علیه زیرساخت‌های شهری، به یکی از چالش‌های اساسی دولت‌ها تبدیل شده است. مقابله ساختاریافته با این تهدیدات نوپدید، مستلزم شناخت دقیق ماهیت و راهبردهای عملیاتی آن‌ها در میدان نبرد چندبُعدی شهری است. پژوهش کاربردی حاضر با هدف بازشناسی ویژگی‌های تهدیدات مبتنی بر پهپادها و تدوین راهکارهای پدافندی چندلایه جهت ارتقا تاب‌آوری کالبدی سکونتگاه‌های شهری انجام شده است. این مطالعه با رویکردی ترکیبی (کمی-کیفی) و بهره‌گیری از روش «پس‌کاوی» برای تحلیل آسیب‌پذیری‌ها پیش رفته و داده‌های آن از طریق مطالعات اسنادی و مشاهدات میدانی در سه مجموعه مسکونی (شهرک‌های شهید محلاتی، شهید چمران و مجتمع سرو) گردآوری و تحلیل شده‌اند. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که دفاع مؤثر شهری نیازمند تلفیق تدابیر «فوری» و «بلندمدت» است. تدابیر فوری شامل به‌کارگیری سامانه‌های سدکننده فیزیکی (نظیر تورهای منعطف و شبکه‌های صلب) برای خنثی‌سازی انرژی جنبشی پرتابه‌ها پیش از اصابت است. در مقابل، تدابیر بلندمدت بر نهادینه‌سازی پدافند کالبدی در دو بُعد تمرکز دارند: در بُعد «فضای سطحی»، ایجاد دالان‌های هوایی مجزا برای عبور و مرور مجاز و مکان‌یابی ابنیه حساس به دور از معابر اصلی به‌منظور دشوار ساختن ناوبری بصری هواگرد مهاجم به‌هنگام بروز اختلال در سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای پیشنهاد می‌شود. در بُعد «فضای روستحی» نیز راهکارها در سه مقیاس ارائه شده‌اند: در مقیاس مجموعه قطعه [بلوک]، استفاده از کدهای ارتفاعی ناهمگون جهت محدودسازی مانور هواگردها و جلوگیری از قفل لیزری تسلیحات هدایت‌شونده؛ در مقیاس ساختمان، طراحی فرم‌های نامتقارن و نماهای پیچیده برای ایجاد ابهام بصری؛ و در مقیاس اجزا ساختمان، اجرای جداره‌های فداشونده (برای اختلال در فیوز مهمات تأخیری)، کاربرد بتن مسلح درجا (جهت دفع موج انفجار) و استفاده از مصالح بازتابنده یا ناهموار به‌منظور انحراف و تفرق سیگنال موشک‌های هدایت‌شونده مورد تأکید قرار گرفته است.

**استناد:** قربانی، ابوالفضل، بهزادفر، مصطفی، "بازشناسی مفهوم هواپیمای بدون سرنشین و راهکارهای مقابله با تهدیدات آن‌ها در عرصه شهری (نمونه مورد مطالعه: شهرک شهید محلاتی، شهرک شهید چمران و مجتمع سرو دانشگاه شهید بهشتی)"، نشریه پدافند غیرعامل، دوره ۱۷، شماره ۲، صفحات ۱۶۶-۱۴۵، ۱۴۰۵. DOI: <https://doi.org/10.47176/pd.2026.1616>

© نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند.



ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع).

OPEN ACCESS

## ۱- مقدمه

محیط‌های شهری پیچیده، فرصت‌ها و چالش‌های ایده‌آلی را برای کاربردهای متنوع پهپادها از جمله نظارت، مدیریت ترافیک، واکنش اضطراری، بازرسی زیرساخت‌ها و تحویل کالا فراهم کرده‌اند [۱]، به‌طوری که ارزش بازار تجاری آن‌ها در حوزه‌های گوناگون، بیش از ۱۲۷ میلیارد دلار برآورد می‌شود [۲]. با این حال، دسترسی آسان و هزینه پایین پهپادهای تجاری، همزمان تهدید امنیتی جدی ایجاد کرده است؛ از جمله خطر اصابت اشیاء پرنده مجهز به مواد منفجره به اماکن حساس (نظامی، دولتی و مسکونی) و استفاده از آن‌ها در فعالیت‌های جاسوسی و شناسایی. دفاع در برابر پهپادها به دلیل ویژگی‌های خاص آن‌ها بسیار دشوار است. پهپادها ردپای بسیار کمی<sup>۱</sup> دارند و می‌توانند با پرواز سریع و در ارتفاع کم در شلوغی شهری یا روستایی پنهان شوند و با ظاهر شدن در فواصل بسیار کوتاه، زمان واکنش دفاعی را به حداقل برسانند [۳]. علاوه بر این، دسترسی آسان به قطعات، امکان ساخت پهپادهای سفارشی با ویژگی‌های پروازی دلخواه و هزینه‌ای به مراتب کمتر از نمونه‌های تجاری را فراهم کرده است؛ امری که پهپاد را به تسلیحاتی ارزان قیمت برای افراد و گروه‌های با منابع مالی محدود بدل ساخته است [۴].

در سال‌های اخیر، جمهوری اسلامی ایران با تهدیدات فزاینده‌ای از سوی طیف گسترده‌ای از بازیگران منطقه‌ای، فرمانطقه‌ای و گروه‌های مسلح غیردولتی<sup>۲</sup> مجهز به هواگردها تهاجمی مواجه بوده است. این بازیگران از توانمندی لازم برای انجام حملات مؤثر علیه منافع حیاتی، دارایی‌های کالبدی و سرمایه‌های انسانی کشور برخوردارند؛ از جمله حملات هوایی که توسط اسرائیل و آمریکا در جریان جنگ دوازده‌روزه (با هدف ترور دانشمندان هسته‌ای کشور) به وقوع پیوسته است.

در مقابله با این تهدیدات، عمده تمرکز متوجه راهکارهای فناورانه نظیر اخلال در سیگنال<sup>۳</sup>، جعل هویت<sup>۴</sup> و سرنگونی فیزیکی<sup>۵</sup> بوده است. با این حال، به‌کارگیری این روش‌ها در محیط‌های شهری متراکم با محدودیت‌های جدی مواجه است؛ چرا که اخلال در سیگنال می‌تواند ارتباطات ضروری را مختل سازد، جعل سیگنال توسط سامانه‌های ناوبری پیشرفته خنثی می‌شود و شلیک مستقیم در فضای متراکم شهری پیامدهای فاجعه‌باری در پی خواهد داشت.

در نتیجه، ضرورت ایجاد سازوکارهای دفاعی جدیدی که به‌جای تمرکز صرف بر فضای آسمان، بر ساختار و بافت شهری تاکید کنند، بیش از پیش احساس می‌شود. ارتقای تاب‌آوری پهنه‌های مسکونی در برابر تهدیدات انسان‌ساخت، به‌ویژه حملات

پهپادی، نیازمند بازنگری در شاخص‌های کالبدی و ملاحظات طراحی است؛ چرا که علاوه بر جنبه‌های فنی، طراحی کالبدی مجتمع‌های مسکونی نیز نقش بنیادینی در کاهش آسیب‌پذیری ساکنان در برابر تهدیدات نوین ایفا می‌کند [۵، ۶]. این پژوهش با تحلیل راهبردهای تهاجمی هواگردها در محیط‌های شهری و بهره‌گیری از تجارب جهانی، به تدوین راهکارهای دفاعی متناسب پرداخته و آن‌ها را در بستر سه نمونه عینی (شهرک شهید محلاتی، شهرک شهید چمران و مجتمع سرو) ارائه می‌کند. پژوهش حاضر در پی پاسخگویی به پرسش‌های محوری زیر است:

۱. انواع دسته‌بندی‌های متداول پهپادها و شیوه‌های تهاجمی آن‌ها در محیط‌های شهری کدامند؟
۲. با در نظر گرفتن ضرورت تداوم کاربری‌های مجاز پهپادها، چه راهکارهایی برای مقابله با پهپادهای مهاجم در محیط‌های شهری قابل ارائه است؟

## ۲- مبانی نظری

### ۲-۱- پیشینه تحقیق

پهپادها برای دهه‌ها شناخته شده‌اند؛ آن‌ها توسط ارتش‌ها برای مقاصد جنگی استفاده شده‌اند و می‌توانند محموله‌های بالستیک<sup>۶</sup> یا غیربالستیک<sup>۷</sup> را حمل کرده و کیلومترها پرواز کنند [۷]. اولین استفاده شناخته‌شده پهپادها به سال ۱۸۴۹ برمی‌گردد که به شکل بالن‌های هوایی مجهز به بمب در طول جنگ بین اتریشی‌ها و ایتالیایی‌ها استفاده شدند. رجینالد دنی<sup>۸</sup> اولین هواپیمای کنترل از راه دور با تولید انبوه نظامی به نام «هواپیمای رادیویی اُکیو-۲»<sup>۹</sup> را در طول جنگ جهانی دوم توسعه داد [۸]. پهپادها با تکیه بر توان اجرای عملیات در روز و شب، در مناطق دور و نزدیک، علیه اهداف ثابت و متحرک، در تمامی شرایط جوی، و همچنین با بهره‌گیری از قابلیت پروازهای هدایت‌پذیر از دور یا تمام‌خودکار، دستاوردهای نظامی و سیاسی قابل توجهی را در منازعات نظامی سال‌های اخیر کسب کرده‌اند [۹]. از دهه ۱۹۹۰، با محبوبیت یافتن پهپادها، نمونه‌های کوچک آن‌ها پدیدار شدند. امروزه، پهپادها فراتر از عملیات نظامی، با صدها کاربرد متنوع برای اهداف تجاری و غیرنظامی (مانند پهپادهای تفریحی) مورد استفاده قرار می‌گیرند.

### ۲-۲- انواع پهپادها

هواپیمای بدون سرنشین (پهپاد)<sup>۱۰</sup> که با نام وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین<sup>۱۱</sup> نیز شناخته می‌شود، «هواگردهایی هستند که

<sup>۶</sup> Ballistic Payload(s)

<sup>۷</sup> Nonballistic Payload(s)

<sup>۸</sup> Reginald Denny

<sup>۹</sup> Radioplane OQ-2

<sup>۱۰</sup> Unmanned Aircraft (UA)

<sup>۱۱</sup> Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)

<sup>۱</sup> Very low signature(s)

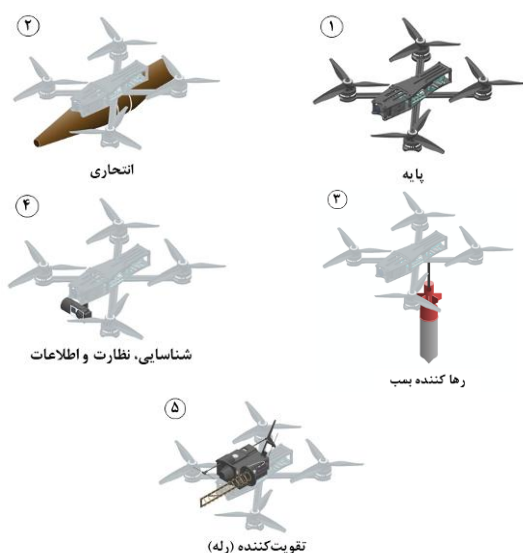
<sup>۲</sup> Non State armed Group(s)

<sup>۳</sup> Jamming

<sup>۴</sup> Spoofing

<sup>۵</sup> Kinetic Takedown

بسیار شدیدی را ایجاد می‌کند [۱۳]. علاوه بر این، طراحی ماژولار این پهپادها (مانند کوادکوپترهای رایج در جنگ اوکراین)، انعطاف‌پذیری فوق‌العاده‌ای به آن‌ها می‌بخشد؛ به گونه‌ای که با تغییر یا افزودن قطعات، می‌توانند به سرعت برای مأموریت‌ها و محموله‌های متنوع تطبیق یافته و به یک پلتفرم عملیاتی چند منظوره تبدیل شوند [۴، ۱۴].



شکل (۱): انواع پهپادهای مورد استفاده برای مأموریت‌های مختلف در جنگ اوکراین [۱۴].

## ۲-۵- انواع پرتابه‌ها و فیوزهای انفجاری در تهاجم غیربالتستیک

بررسی پرتابه‌های انفجاری<sup>۵</sup> هواگردها از دو جنبه «نوع هدایت» و «نوع فیوز انفجاری»<sup>۶</sup> دارای اهمیت است. این دو بعد نه تنها بر کارایی و اثربخشی تسلیحات تأثیر می‌گذارد، بلکه مستقیماً با توانایی انهدام هدف مرتبط هستند.

### ۲-۵-۱- مهمات غیر هدایت شونده (رها شونده)

هواپیماهای بدون سرنشین در ابعاد کوچک، به‌ویژه آن‌هایی که به لحاظ فنی در گروه ۱ دسته‌بندی می‌شوند، به‌عنوان پلتفرم‌های پرتابی کارآمد برای حمل و رهاسازی طیف وسیعی از مهمات غیرهدایت‌شونده عمل می‌کنند. این شیوه تهاجمی مزایای عملیاتی متعددی از جمله توانایی پرواز در ارتفاع بسیار پایین، هدف‌گیری نقطه‌ای دقیق، دسترسی به نواحی صعب‌العبور و همچنین کاهش زمان واکنش را فراهم می‌آورد.

این پهپادها قابلیت پرتاب انواع گوناگونی از مهمات را دارند که از آن جمله می‌توان به ابزارهای انفجاری دست‌ساز<sup>۸</sup>، نارنجک‌های دستی، گلوله‌های خمپاره در کالیبرهای مختلف و

اپراتور انسانی در داخل خود<sup>۱</sup> ندارد و می‌توانند با کنترل از راه دور توسط انسان یا به صورت خودکار پرواز کنند. در تعریفی جامع‌تر، سامانه‌های هواپیمای بدون سرنشین<sup>۲</sup> به‌عنوان مجموعه‌ای تعریف می‌شود که شامل «تجهیزات، شبکه و پرسنل لازم برای کنترل یک هواپیمای بدون سرنشین» است [۱۰].

## ۲-۳- دسته‌بندی پهپادها

پهپادها بر اساس معیارهای مختلفی از جمله سه سطح بین‌المللی، عملیاتی و فنی دسته‌بندی می‌شوند. مهم‌ترین دسته‌بندی بین‌المللی از سوی رژیم کنترل فناوری موشکی<sup>۳</sup> در سال ۱۹۸۷ ارائه شده و پهپادها را عمدتاً بر اساس برد و محموله به سه دسته تقسیم می‌کند: نخست، پهپادهای سنگین با برد بیش از ۳۰۰ کیلومتر و ظرفیت محموله بالای ۵۰۰ کیلوگرم که صادرات آن‌ها به‌شدت محدود است؛ دوم، پهپادهایی با حساسیت صادراتی کمتر که برد مشابه اما محموله سبک‌تری دارند؛ و سوم، پهپادهای کوچک با برد محدود که خارج از شمول نظارتی این رژیم قرار می‌گیرند [۱۱].

در سطح عملیاتی پهپادها بر اساس ظرفیت و نوع مأموریت (ترکیبی از ارتفاع، برد و استقامت) طبقه‌بندی می‌شوند که شامل پهپادهای کوچک و دست‌پرتاب، پهپادهای تاکتیکی (به‌منظور شناسایی و هدف‌گیری) و پهپادهای استراتژیک (با قابلیت پرواز در مسافت‌های طولانی و حمل تسلیحات) است [۱۲].

در سطح فنی، وزارت دفاع ایالات متحده از یک طبقه‌بندی پنج‌گروهی (گروه‌های ۱ تا ۵) بهره می‌برد که بر مبنای وزن، ارتفاع عملیاتی و سرعت پهپادها تعریف شده است (جدول ۱).

## ۲-۴- نوع تهدید

پهپادها بسته به نوع پیکربندی خود قادرند عملیات تهاجمی را از طریق دو روش اصلی «بالتستیک» و «غیربالتستیک» انجام دهند [۴].

در حملات بالتستیک، پهپاد نقش یک سلاح انتحاری را ایفا می‌کند؛ به این صورت که با یک مسیر شیرجه‌ای و پرسرعت، مشابه موشک‌های بالتستیک، به هدف اصابت می‌کند. در مقابل، در حملات غیربالتستیک، پهپاد حامل<sup>۴</sup> به عنوان یک سکوی پرتاب قابل استفاده مجدد عمل می‌کند که سلاح‌هایی مانند موشک یا بمب را از راه دور و از یک ارتفاع کنترل‌شده شلیک یا رها می‌کند.

علی‌رغم آنکه پهپادهای کوچک (گروه ۱) ممکن است توانایی حمل مواد منفجره با جرم بالا را نداشته باشند، اما قادرند این مواد را در فاصله بسیار نزدیک و یا حتی در تماس مستقیم با سازه هدف منفجر کنند که این امر پتانسیل ایجاد آسیب‌های

<sup>۵</sup> Explosive Projectile(s)

<sup>۶</sup> Guidance Type

<sup>۷</sup> Fuzing Mechanism

<sup>۸</sup> Improvised Explosive Device (IEDs)

<sup>۱</sup> On-Board Pilot

<sup>۲</sup> Unmanned Aircraft Systems (UASs)

<sup>۳</sup> Missile Technology Control Regime (MTCR)

<sup>۴</sup> Drone Carriers / Reusable Drone(s)

بمب‌های مینیاتوری که به‌طور خاص طراحی شده‌اند، اشاره کرد. پهپادهای با ظرفیت بالاتر، مانند گروه ۲، خواهد بود [۱۵]. برای حمل مهمات با ابعاد یا جرم بزرگ‌تر، اغلب نیاز به استفاده از

جدول (۱): دسته‌بندی‌های وسایل نقلیه هوایی بدون سرنشین [۱۱]، [۱۲]، [۱۶]

| نوع دسته‌بندی                   | محموله                      | برد                                        | ارتفاع             | استقامت                         | حداکثر وزن ناخالص برخاست | ارتفاع عملیاتی عادی               | سرعت                    | نمونه                                                                                              |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| رژیم کنترل فناوری موشکی         | سامانه‌های دسته اول         | $\leq 500$ کیلوگرم                         | $\leq 300$ کیلومتر |                                 |                          |                                   |                         | گلوبال هاوک (شناسایی)، پردیتور و ریپر (مسلح)                                                       |
|                                 | سامانه‌های دسته دوم         | $\geq 500$ کیلوگرم                         | $\leq 300$ کیلومتر |                                 |                          |                                   |                         | ابابیل ایران                                                                                       |
|                                 | پهپادهای خارج از رژیم کنترل | محدود                                      | محدود              |                                 |                          |                                   |                         | فانتوم ۳، سولو، مویک                                                                               |
| ظرفیت                           | پهپادهای استراتژیک          | برد بلند                                   | متوسط تا بالا      | بلند (از چندین ساعت تا چند روز) |                          |                                   |                         | گلوبال هاوک                                                                                        |
|                                 | پهپادهای تاکتیکی            | محدود به خط دید (حدود ۳۰۰ کیلومتر یا کمتر) | پایین تا متوسط     | متوسط (تا چندین ساعت)           |                          |                                   |                         | شَدو                                                                                               |
|                                 | پهپادهای کوچک               | برد نزدیک                                  | پایین              | کم (حدود یک ساعت)               |                          |                                   |                         | راون                                                                                               |
| نیروی هوایی ایالات متحده آمریکا | گروه ۱                      |                                            |                    |                                 | ۰ تا ۹ کیلوگرم           | $> 365.76$ متر بالاتر از سطح زمین | ۱۸۵،۲ کیلومتر بر ساعت   | واسپ ۳، آرکیو-۱۱۴ ای‌بی، باستر، نایت‌هاک، آرکیو-۱۱ ای، اف‌پس، آرکیو-۱۱۶ ای، پوینتر، آکوا/ترا پیوما |
|                                 | گروه ۲                      |                                            |                    |                                 | ۹،۵ تا ۲۵ کیلوگرم        | $> 1066.8$ متر بالاتر از سطح زمین | $> 463$ کیلومتر بر ساعت | اسکن ایگل، سیلور فاکس، آبروساند                                                                    |
|                                 | گروه ۳                      |                                            |                    |                                 | $> 599$ کیلوگرم          | $> 5486.4$ متر بالاتر از سطح زمین | $> 463$ کیلومتر بر ساعت | آرکیو-۷ بی شَدو، آرکیو-۱۵ نپتون، ایکس‌پی‌وی-۱ ترن، ایکس‌پی‌وی-۲ ماکو                               |
|                                 | گروه ۴                      |                                            |                    |                                 | $< 599$ کیلوگرم          | میانگین سطح دریا                  | هر سرعتی                | ام‌کیو-۸ بی فایر اسکوت، ام‌کیو-۱ سی‌گری ایگل، ام‌کیو-۱ ای‌بی/اسی پردیتور                           |
|                                 | گروه ۵                      |                                            |                    |                                 | $< 599$ کیلوگرم          | $< 5486.4$ متر بالاتر از سطح دریا | هر سرعتی                | ام‌کیو-۹ ریپر، آرکیو-۴ گلوبال هاوک، آرکیو-۴ ان تربتون                                              |

## ۲-۵-۲- مهمات هدایت شونده

مهمات هدایت شونده دقیق<sup>۱</sup> به عنوان «سلاحی هدایت شونده برای انهدام نقطه‌ای هدف با حداقل خسارات جانبی» تعریف می‌شود. این مهمات که با عنوان «سلاح/مهمات هوشمند<sup>۲</sup>» نیز شناخته می‌شوند، از اجزای ناوبری و هدایتی مختلفی مانند واحدهای اندازه‌گیری اینرسی<sup>۳</sup>، گیرنده‌های سامانه موقعیت‌یابی جهانی<sup>۴</sup>، جستجوگرهای لیزری<sup>۵</sup> و جستجوگرهای راداری موج میلی‌متری<sup>۶</sup> بهره می‌برند [۱۷]. این تسلیحات معمولاً توسط هواپیماها و پهپادهای گروه ۳ تا ۵ حمل و شلیک می‌شوند.

«واحد اندازه‌گیری اینرسی» یک دستگاه ناوبری مستقل است که با استفاده از ژيروسکوپ‌ها و شتاب‌سنج‌ها، شتاب و سرعت زاویه‌ای سلاح را به طور پیوسته اندازه‌گیری می‌کند. به دلیل پدیده خطای انباشته‌شده، به ندرت به تنهایی برای هدف‌گیری نقطه‌زن استفاده می‌شود و برای تصحیح خطاها و حفظ دقت نهایی، باید با یک سامانه مرجع خارجی (مانند جی‌پی‌اس یا حسگر لیزری) ترکیب شود [۱۸].

«سامانه‌های هدایت مبتنی بر جی‌پی‌اس» در محیط‌های باز یا نیمه‌شهری که سیگنال‌های ماهواره‌ای قابل اعتماد هستند، بسیار مؤثر عمل می‌کنند. با این حال، سیگنال‌های جی‌پی‌اس ذاتاً ضعیف هستند و در برابر تهدیدات جنگ الکترونیک یا دستگاه‌های جعل سیگنال<sup>۷</sup> بسیار آسیب‌پذیرند [۱۹]. همچنین در محیط‌های کاملاً شهری، موانع فیزیکی بلند مانند ساختمان‌ها موجب انسداد مسیر مستقیم دید به ماهواره‌ها و ایجاد پدیده بازتاب سیگنال می‌شوند؛ رویدادی که دقت محاسبات فاصله‌سنجی و موقعیت‌یابی را به شدت کاهش می‌دهد [۲۰].

«مهمات جوینده موج میلی‌متری» با ارسال سیگنال راداری با فرکانس بالا و پردازش انرژی بازتاب‌شده، قادر به تصویربرداری راداری برای تعیین مکان هدف است. این تکنولوژی قابلیت عملیات در هر شرایط آب و هوایی، شب یا روز را فراهم می‌کند. با وجود این مزیت، تشخیص هدف برای این جوینده‌ها در پس‌زمینه‌های زمینی و شهری پیچیده به دلیل تولید هشدارهای کاذب<sup>۸</sup> دشوار است [۲۱، ۲۲].

«سلاح هدایت‌شده با لیزر<sup>۹</sup>» بر اساس سازوکار جستجوی

انرژی لیزر بازتاب‌شده از هدف عمل می‌کنند و عملکرد آن‌ها

مبتنی بر تعامل دو جزء اصلی است: نشانگر هدف<sup>۱۰</sup> و دستگاه اکتساب<sup>۱۱</sup>. نشانگر هدف لیزری، که می‌تواند از یک سکوی زمینی یا هوایی اجرا شود، هدف را با تابش یک پرتو لیزری رمزگذاری‌شده روشن<sup>۱۲</sup> می‌کند. در مقابل، دستگاه اکتساب، که یک کیت جستجوگر و هدایتگر نصب‌شده بر روی خود مهمات است، پالس‌های لیزری رمزگذاری‌شده منعکس‌شده از هدف را دریافت کرده و سلاح را به طور مستمر به سمت منبع این پالس‌ها هدایت می‌کند تا عملیات اصابت با دقت بالا تکمیل شود [۲۳]. تکنیک‌های نشانگر لیزری در محیط شهری تحت تاثیر چالش‌های فیزیکی و جوی شامل بازگشت پرتو<sup>۱۳</sup>، عوامل کدورت<sup>۱۴</sup>، تضعیف<sup>۱۵</sup> انرژی پرتو، واگرایی پرتو<sup>۱۶</sup>، لرزش نقطه<sup>۱۷</sup>، شکست<sup>۱۸</sup>، اثر سکو<sup>۱۹</sup>، به دام افتادن<sup>۲۰</sup>، و سرریز بالا و پایین<sup>۲۱</sup> قرار دارد [۱۶] که سه مورد نخست مستقیماً با شرایط اقلیمی مرتبط هستند. با وجود تمامی این چالش‌ها، اتکای این تسلیحات به سیگنال‌های نوری (به جای امواج رادیویی)، این مزیت کلیدی را به آن‌ها می‌بخشد که در مقایسه با سامانه‌های مبتنی بر جی‌پی‌اس، آسیب‌پذیری بسیار کمتری در برابر اختلال الکترونیکی و تداخلات فرکانس رادیویی داشته باشند. این ویژگی، کارایی آن‌ها را به‌ویژه در محیط‌های شهری متراکم (جایی که موانع فیزیکی عملکرد سامانه‌های جی‌پی‌اس را به شدت مختل می‌کنند) به شکل چشمگیری افزایش می‌دهد.

## ۲-۵-۳- سامانه‌های انفجاری

سامانه‌های انفجاری برای تعیین دقیق زمان و مکان انفجار، از چهار نوع اصلی فیوز بهره می‌برند که هر یک برای دستیابی به اثر تخریبی مشخصی طراحی شده‌اند: «فیوز تماس/آنی<sup>۲۲</sup>» دقیقاً در لحظه برخورد فیزیکی با سطح هدف فعال می‌شود و عمدتاً برای انهدام اهداف سطحی و فاقد پوشش زرهی به کار می‌رود. «فیوز مجاورتی<sup>۲۳</sup>» بدون نیاز به تماس مستقیم، مکانیزم انفجار را در فاصله بهینه از هدف فعال می‌سازد تا حداکثر پراکندگی ترکش‌ها

<sup>10</sup> Laser Target Designator

<sup>11</sup> Acquisition Device

<sup>12</sup> Illuminate

<sup>13</sup> Backscatter

<sup>14</sup> Obscurant(s)

<sup>15</sup> Attenuation

<sup>16</sup> Beam Divergence

<sup>17</sup> Spot Jitter

<sup>18</sup> Refraction

<sup>19</sup> Podium

<sup>20</sup> Entrapment

<sup>21</sup> Over and Under spill

<sup>22</sup> Point Detonating/Impact Fuse

<sup>23</sup> Proximity Fuse

<sup>1</sup> Precision-guided Munitions (PGMs)

<sup>2</sup> Smart Weapon\ Smart Munition

<sup>3</sup> Inertial Measurement Unit(s)

<sup>4</sup> Global Positioning System (GPS) Receivers

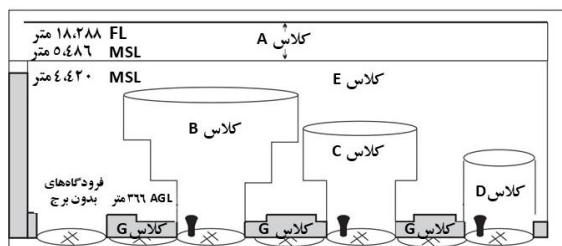
<sup>5</sup> Laser Seeker(s)

<sup>6</sup> Millimeter-wave Radar Seeker(a)

<sup>7</sup> Spoofing

<sup>8</sup> False alarm(s)

<sup>9</sup> Laser-guided Weapon



شکل (۲): طبقه‌بندی بین‌المللی حریم هوایی از کلاس A تا کلاس G. AGL: بالاتر از سطح زمین، FL: سطح پرواز، MSL: میانگین سطح دریا [۲۸].

## ۷-۲- پهباد و مدیریت آن در حریم هوایی

مدیریت ایمن و کارآمد حجم فزاینده پهبادها در بافت‌های متراکم شهری، چالشی محوری در سامانه‌های حمل‌ونقل هوایی نوین به شمار می‌رود. این چالش زمینه‌ساز شکل‌گیری برنامه‌های متعدد تحقیق و توسعه در سطح ملی شده است؛ که از میان آن‌ها می‌توان به مدیریت ترافیک سامانه‌های هوایی بدون سرنشین ناسا/FAA ایالات متحده [۲۹]، یو-اسپیس سسار<sup>۸</sup> اروپا [۳۰]، یو-تی‌ام-یوای‌اس سنگاپور<sup>۹</sup> [۳۱] و جی-یوتی‌ام<sup>۱۰</sup> ژاپن اشاره کرد [۳۲]. این برنامه‌ها مجموعه‌ای از مفاهیم عملیاتی برای مدیریت ترافیک سامانه‌های هوایی بدون سرنشین ارائه کرده‌اند که می‌توان آن‌ها را بر اساس نیاز به ساختار فضای هوایی<sup>۱۱</sup> به دو گروه اصلی تقسیم کرد:

عملیات‌های مبتنی بر پرواز آزاد<sup>۱۲</sup> که در آن نیازی به ساختاردهی فضای هوایی نیست؛ هر پهباد مسیر مورد نظر خود را دنبال می‌کند و برای پیشگیری از برخورد، کاملاً به سامانه‌های «کشف و اجتناب از تداخل»<sup>۱۳</sup> در لحظه متکی است [۳۳، ۳۴].

عملیات‌های مبتنی بر ساختار<sup>۱۴</sup> از ساختارهای فضای هوایی مانند لایه‌ها<sup>۱۵</sup>، مناطق<sup>۱۶</sup> و لوله‌ها<sup>۱۷</sup> برای سازماندهی جریان‌های ترافیک استفاده می‌کنند تا تداخلات احتمالی را کاهش دهند. هدف اصلی این ساختارها، کاهش پیچیدگی و بار کاری مدیریت ترافیک است و مزیت افزوده‌ای چون امکان لحاظ کردن ملاحظات ایمنی، امنیتی، صوتی و حریم خصوصی را از طریق طراحی هوشمندانه فضای هوایی فراهم می‌آورد [۳۵-۳۷].

و اثر موج انفجار علیه اهداف موردنظر حاصل شود. «فیوز زمان‌دار»<sup>۱</sup> صرفاً بر اساس یک مدت زمان از پیش تعیین‌شده از لحظه شلیک یا مسلح شدن عمل می‌کند و زمان انفجار را فارغ از برخورد فیزیکی یا مجاورت با هدف تنظیم می‌کند. در نهایت، «فیوز تأخیری»<sup>۲</sup> پس از برخورد اولیه با هدف، یک تأخیر زمانی مشخص را پیش از انفجار اعمال می‌کند. این نوع فیوز معمولاً در مهمات نفوذگر<sup>۳</sup> کاربرد دارد تا پرتابه بتواند پیش از انفجار، به لایه‌های درونی هدف نفوذ کرده و به نقطه دلخواه (مانند یک طبقه خاص یا فضای داخلی محصور) برسد. شایان ذکر است که تنظیم دقیق فیوزهای تأخیری، مستقیماً به آگاهی از ساختار هدف، شامل عواملی چون تعداد طبقات یا سطوح، ضخامت بتن و میزان پوشش محافظ رویی وابسته است [۲۴، ۲۵].

## ۶-۲- انواع حریم هوایی شهری و مدیریت آن

«مدیریت حریم هوایی»<sup>۴</sup> اقدامی ضروری برای جلوگیری از تداخل میان کاربران مختلف حریم هوایی، تأمین ایمنی کلیه عملیات‌های ترافیک هوایی و همچنین امکان شناسایی هواگردها توسط پدافند هوایی است. «سازمان بین‌المللی هوانوردی کشوری»<sup>۵</sup> مسئولیت برنامه‌ریزی و توسعه سامانه‌های حمل‌ونقل هوایی بین‌المللی را بر عهده دارد.

این سازمان، حریم هوایی را بر اساس معیارهایی نظیر جداسازی پروازها، صدور مجوزها و قوانین پروازی به کلاس‌های مختلفی (از A تا G) دسته‌بندی کرده است که اکثر کشورهای جهان از این الگو تبعیت می‌کنند.

حریم هوایی به‌طور کلی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شود: نخست، «حریم هوایی کنترل‌شده» (شامل کلاس‌های A، B، C، D و E) که دارای محدوده‌های ارتفاعی مشخصی بوده و در آن‌ها خدمات کنترل ترافیک هوایی<sup>۶</sup> ارائه می‌گردد و دوم، «حریم هوایی کنترل‌نشده» (کلاس G) که بخشی از حریم هوایی عمومی است و نهادهای کنترل ترافیک هوایی هیچ‌گونه مسئولیت یا اختیاری برای مدیریت ترافیک در آن ندارند [۲۶].

بخش قابل‌توجهی از پروازهای پهبادهای کوچک و مأموریت‌های مرتبط با آن‌ها در حریم هوایی کلاس G انجام می‌شود. این موضوع به‌ویژه در بازه‌های ارتفاعی پایین (معمولاً از ۰ تا ۲۱۳ متر) صدق می‌کند [۲۷]؛ چرا که این فضا کمترین محدودیت‌های عملیاتی پرواز را به همراه داشته و تمامی سطوح شهری را در بر می‌گیرد [۲۶].

<sup>7</sup> NASA/FAA unmanned aircraft system traffic management - UTM

<sup>8</sup> SESAR U-space

<sup>9</sup> Singapore uTM-UAS

<sup>10</sup> J-UTM

<sup>11</sup> Airspace Structure

<sup>12</sup> Free-flight-based operation(s)

<sup>13</sup> Conflict detection and Avoidance

<sup>14</sup> Structure-based operation(s)

<sup>15</sup> Layer(s)

<sup>16</sup> Zone(s)

<sup>17</sup> Tube(s)

<sup>1</sup> Time Fuse

<sup>2</sup> Delay Fuse

<sup>3</sup> Penetrating Munition(s)

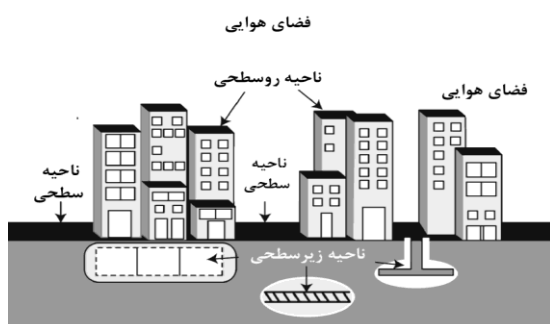
<sup>4</sup> Airspace Management

<sup>5</sup> International Civil Aviation Organization (ICAO)

<sup>6</sup> Air Traffic Control (ATC)

زیرزمین‌ها، پناهگاه‌ها و سایر فضاهای زیرزمینی می‌شود. این فضا به دلیل کاربرد در احداث پناهگاه‌ها و سازه‌های دفاعی، مستقیماً در مباحث مرتبط با حفاظت از ساختمان‌ها در برابر حملات هوایی مورد بررسی قرار نمی‌گیرد.

----- حریم هوایی کلاس G -----

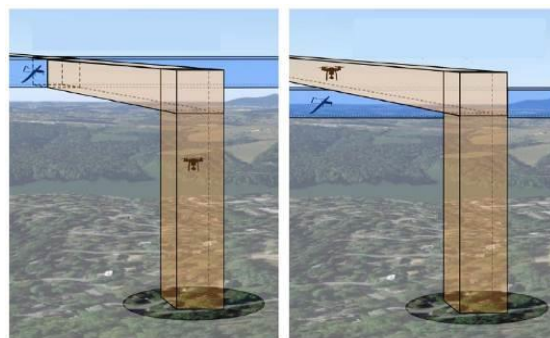


**شکل (۴):** میدان نبرد چند بعدی شهری و ارتباط آن با حریم کلاس G. در این بازه ارتفاعی ۰ تا ۲۱۳ متری به ترتیب پهنادهای تفریحی، تصویر برداری، کشاورزی، پایش تاسیسات، ریل، خطوط برق، تحویل کالا و امداد و نجات عمل می‌کنند [۲۸، ۲۷، ۱۶].

### ۳- روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از منظر رویکرد، پژوهشی ترکیبی است که با هدف شناسایی الگوهای تهدید و ارائه راهکارهای دفاعی در محیط‌های شهری تدوین یافته است. راهبرد اصلی این مطالعه، روش «پس‌کاوی» است؛ انتخاب این راهبرد به دلیل ماهیت «رویداد-محور» پدیده حملات پهنادی است که امکان دستکاری متغیرهای مستقل در آن وجود ندارد. در این چارچوب، پژوهش به مطالعه رخدادهای پیشین (نبرد ۲۳ خرداد تا ۳ تیر ۱۴۰۴) پرداخته است تا با تحلیل علل و معلول‌های پس از وقوع حادثه، به تبیین دقیق ویژگی‌های تهاجمی هواگردها و آسیب‌پذیری‌های کالبدی سه مجتمع مسکونی مورد مطالعه دست یابد.

در این راستا، ابزار گردآوری داده‌ها مبتنی بر مطالعات اسنادی و کتابخانه‌ای گسترده، به همراه شیوه‌های میدانی شامل مشاهده نظام‌مند و مستندسازی تصویری از وضعیت موجود نمونه‌ها بوده است. فرآیند تحلیل نیز با رویکردی تبیینی صورت گرفته است؛ بدین معنا که با بررسی دقیق ویژگی‌های فیزیکی، فرم هندسی و جانمایی ساختمان‌ها، نحوه تعامل آن‌ها با الگوهای تهاجمی هواگردها واکاوی شده و با بهره‌گیری از منطق پس‌کاوی، الگوهای آسیب‌پذیری استخراج و راهکارهای دفاعی پیشنهاد گردیده است.



**شکل (۳):** شبکه‌های مسیر ساختاریافته<sup>۱</sup> و جداسازی زمانی<sup>۲</sup> (سمت چپ) یا مکانی (سمت راست) برای مدیریت ترافیک [۲۹].

مدل عملیات‌های مبتنی بر مسیر ساختاریافته که تحت عنوان «عملیات‌های مبتنی بر کریدور/لوله» نیز شناخته می‌شود، در حال حاضر در شهرهایی نظیر شنژن و هانگژو (چین) برای ارائه خدمات تجاری تحویل کالا با پهناد پیاده‌سازی شده است [۳۸]. در این مدل، کالاهای مستقیماً به درب منزل مصرف‌کنندگان ارسال نمی‌شوند؛ بلکه پهنادهای مرسولات را به «پایانه‌های تحویل (کیوسک‌ها)» که در مجاورت خوشه‌های جمعیتی تعبیه شده‌اند، منتقل می‌کنند. این رویکرد به پهنادهای اجازه می‌دهد تا در مسیرهای از پیش تعیین‌شده و محدود (لوله‌ها) پرواز کنند، که علاوه بر تسهیل مسیریابی در مناطق متراکم شهری، از ورود و پراکندگی کنترل‌نشده پهنادهای در تمام فضای هوایی شهر جلوگیری می‌نماید [۳۹].

### ۲-۸- سکونتگاه‌های شهری به مثابه میدان نبرد چند بعدی

در محیط‌های غیرشهری، عمق، وسعت و ارتفاع قلمرو عملیاتی بر مبنای دو ناحیه «فضای هوایی»<sup>۳</sup> و «سطحی»<sup>۴</sup> در نظر گرفته می‌شود. با این حال، در محیط شهری، این چهارچوب گسترش می‌یابد تا نواحی «روسطحی»<sup>۵</sup> و «زیرسطحی»<sup>۶</sup> را در برگیرد. «نواحی سطحی» به نواحی خارجی سطح زمین مانند خیابان‌ها، بزرگراه‌ها، پارکینگ، فرودگاه‌ها، کشتزارها و پارک‌ها اطلاق می‌شود. «نواحی رو سطحی» شامل کف‌ها یا سطوح طبقات داخلی (درون سطحی) و سقف‌های خارجی یا بام ساختمان‌ها، استادیوم‌ها، برج‌ها یا سایر سازه‌های عمودی است. «نواحی زیرسطحی» نیز فضای زیر سطح زمین را در بر می‌گیرد که شامل شبکه‌های فاضلاب، سامانه‌های زهکشی، تونل‌های مترو، کانال‌های تأسیساتی (مانند خطوط انتقال برق و لوله‌کشی)،

<sup>1</sup> Structured Route Network(s)

<sup>2</sup> Temporal Separation

<sup>3</sup> Airspace

<sup>4</sup> Surface

<sup>5</sup> Supersurface

<sup>6</sup> Subsurface



مجتمع سرو اساتید دانشگاه بهشتی



شهرک شهید چمران



شهرک شهیدمحلّاتی

شکل (۵): موقعیت جغرافیایی سه مجموعه مسکونی هدف قرار گرفته و توزیع ساختمان‌های آسیب‌دیده (رنگ قرمز) در حوزه بلافاصله [۴۰].

## ۵- راهکارهای مقابله با تهدیدات پهپادها

با توجه به روند شتابان به‌کارگیری پهپادها، اقدامات دفاعی فیزیکی در این پژوهش بر اساس زمان پیاده‌سازی به دو گروه «اقدامات فوری (پس از ساخت)» و «اقدامات بلندمدت (حین برنامه‌ریزی و ساخت)» تقسیم شده و در دو بعد «نواحی سطحی» و «نواحی روسطحی» مورد بررسی قرار می‌گیرند.

### ۵-۱- اقدامات فوری (پس از ساخت)

در حوزه اقدامات فوری دو رویکرد اصلی وجود دارد؛ نخست «تور انعطاف‌پذیر کشیده‌شده»<sup>۱</sup> (الیاف پلیمری یا نایلونی مقاوم) برای به دام انداختن پهپادها و دوم بهره‌گیری از «شبکه یا پنل صلب»<sup>۲</sup> (فلزی یا کامپوزیت) برای مقاومت در برابر برخورد پهپادهای سنگین‌تر. فرضیه بنیادی در استفاده از حفاظت فیزیکی در برابر پهپادها، مبتنی بر «به‌دام‌انداختن فیزیکی»<sup>۳</sup>، «ایجاد اختلال عملکردی»<sup>۴</sup> یا «مجبور ساختن آن‌ها به انفجار در فواصل دور از هدف»<sup>۵</sup> است. این روش حفاظتی کاربرد گسترده‌ای در تأمین امنیت «جاده‌ها و مسیرهای پشتیبانی»، «ساختمان‌ها، مناطق مسکونی و فضاهای باز شهری» و همچنین «تأسیسات و زیرساخت‌های حیاتی شهری» دارد.

### ۵-۱-۱- تورهای انعطاف‌پذیر

تورهای ضدپهپاد<sup>۶</sup> سریع‌ترین و در دسترس‌ترین راهکار فوری برای حفاظت فیزیکی از اهداف سطحی و روسطحی در برابر تهاجمات بالستیک پهپادهای کوچک و تجاری (گروه ۱) به شمار می‌روند. این راهکار با هدف جذب و توقف انرژی جنبشی پهپاد متخاصم عمل کرده و عموماً در ترکیب با کابل‌ها، تیرک‌های

اهمیت سه مجموعه مسکونی سرو، چمران و محلّاتی در تحلیل آسیب‌پذیری در برابر حملات هوایی، به سه عامل اصلی بازمی‌گردد: نخست، کارکرد اجتماعی و سازمانی ویژه به دلیل سکونت نخبگان و پرسنل دفاعی و ضرورت اعمال تدابیر پدافند غیرعامل؛ دوم، الگوی کالبدی و معماری شامل ساختمان‌های بلندمرتبه با فرم مکعبی/مستطیلی؛ و سوم، موقعیت جغرافیایی در شمال تهران و مجاورت با زیرساخت‌ها و شریان‌های اصلی حرکت.

## ۴- محدوده مورد مطالعه و ویژگی‌های آن

مجموعه‌های مسکونی مورد بررسی، از نخستین اهداف بودند که در ساعت ۳:۳۰ روز جمعه ۲۳ خردادماه، در موج نخست تهاجم طی جنگ ۱۲ روزه، هدف حمله قرار گرفتند (شکل ۵). مجتمع مسکونی سرو، یک مجموعه دانشگاهی واقع در میدان کتاب (منطقه ۵ شهرداری تهران)، شامل چهار بلوک ۱۶ طبقه (۱۳ طبقه مسکونی، یک طبقه لابی و دو طبقه پارکینگ) است. این مجموعه در سال ۱۳۸۶ به بهره‌برداری رسید و در جریان تهاجم هوایی، آسیب کالبدی به طور ویژه به بلوک C آن وارد شد.

شهرک شهید چمران در محله نوبنیاد (منطقه ۱ شهرداری تهران) قرار دارد و شامل ۱۷ ساختمان بلندمرتبه ۱۵ طبقه متعلق به بنیاد تعاون و سازمان صنایع دفاع (ساصد) است. این مجموعه توسط خیابان شهید لنگری به دو بخش شرقی و غربی تقسیم شده و در تهاجم اولیه، بیشترین تلفات انسانی (بیش از ۶۰ شهید) را متحمل گردید.

شهرک شهید محلّاتی با وسعت ۱۸۰ هکتار در ناحیه ۱۰ منطقه ۱ شهرداری تهران واقع شده است. آغاز عملیات عمرانی این شهرک به سال ۱۳۶۴ بازمی‌گردد. ساختار کالبدی شهرک محلّاتی مبتنی بر یک الگوی مختلط شهری است که ترکیبی از واحدهای ویلایی و آپارتمان‌های بلندمرتبه را شامل می‌شود.

<sup>۱</sup> Tensioned flexible mesh

<sup>۲</sup> Rigid Mesh/Panel

<sup>۳</sup> Physically Entrap

<sup>۴</sup> Disrupt Them

<sup>۵</sup> Explode at Stand-off Distance(s)

<sup>۶</sup> Antidrone Netting

می‌شود و به‌طور ویژه برای متوقف کردن یا منصرف کردن پهناده‌ها از هدف قرار دادن وسایل نقلیه در حال حرکت کاربرد دارد. این سازه‌ها با قابلیت نصب و جمع‌آوری سریع، مانعی فیزیکی و کارآمد برای حفاظت از خودروها، کاروان‌های پشتیبانی و عابران پیاده در برابر پهناده‌های کوچک و تجاری ایجاد می‌کنند. به عنوان مثال، نیروهای اوکراینی برای در امان ماندن از حملات پهنادی، این تورها را بر روی مسیرهای تدارکاتی خود نصب می‌کنند. ضمناً جابه‌جایی در هنگام شب و استفاده از وسایل نقلیه کوچک‌تر اثربخشی این روش را افزایش می‌دهد [۴۵].



شکل (۷): نصب تورهای ضدپهناد عمودی توسط روس‌ها بر فراز جاده‌ها با استفاده از تیرهای برق در منطقه باخموت [۴۶].

این تورها همچنین بر روی نما، بام و محوطه پیرامونی ساختمان‌ها به‌صورت شبکه‌های محافظ یا پنل‌های مشبک نصب می‌شوند تا از اصابت مستقیم پهناد جلوگیری کنند. این تورها باید تمام مسیرهای نفوذ احتمالی از جمله پنجره‌ها، بالکن‌ها، ورودی‌ها، حیاط و مجاری تهویه هوا را پوشش دهند. به عنوان نمونه در بلگورود<sup>۲</sup> روسیه، ساختمان‌های واقع در مرز نواحی درگیری برای جلوگیری از برخورد پهناده‌ها، به این تورهای محافظ مجهز شده‌اند و حتی از آن‌ها برای پوشش فضاهای عمومی نیز استفاده شده است [۴۷].

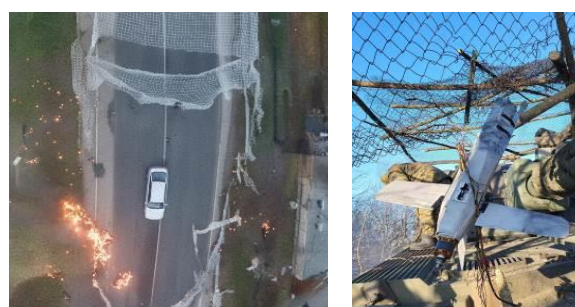
تأسیسات شهری و زیرساخت‌های حیاتی (مانند مخازن سوخت و خطوط لوله) نیز به دلیل ماهیت حساس خود، پیامدهای هرگونه حمله پهنادی را به‌شدت تشدید می‌کنند. در این موارد، تورهای ضدپهناد یا اصطلاحاً «قفس‌های مقابله‌آ» روی مخازن نفتی، پالایشگاه‌ها و تجهیزات حساس نصب می‌شوند تا با ایجاد منطقه پرواز ممنوع<sup>۴</sup>، دسترسی افقی و عمودی پهناده‌ها را کاملاً مسدود کنند. این حفاظ فیزیکی، تجهیزات کوچک و حیاتی مانند سنسورها و شیرهای کنترل را در برابر حملات نقطه‌ای و دقیق<sup>۵</sup> مصون می‌دارد.

حمله به تأسیسات نفتی در نبردهای مدرن، یک استراتژی دوگانه با هدف کاهش توان اقتصادی کشور هدف (از طریق قطع

فلزی یا چوبی و سازه‌های موقت سه‌بعدی، برای ایجاد یک پوشش فیزیکی مستحکم به کار می‌رود.

الزامات فنی تورهای ضدپهناد شامل سه مؤلفه است. نخست، «ویژگی‌های فیزیکی»؛ به این معنا که شبکه باید از موادی با استحکام کششی بالا ساخته شود [۴۱] تا انرژی جنبشی ناشی از برخورد پهناد را بدون پارگی یا تغییر شکل چشمگیر جذب کند. دوم، «ابعاد روزه‌ها»؛ که باید به قدری کوچک باشد تا پره‌های روتور یا بدنه پهناد را درگیر کرده و مانع عبور آن شود. ابعاد چشمه‌ها در تورهای سبک رایج حدود ۵۰ میلی‌متر [۴۲] و در نمونه‌های با امنیت بالا تا ۲۱ در ۲۱ میلی‌متر [۴۱] گزارش شده است. درنهایت، «مقاومت محیطی»؛ که برای استقرار طولانی‌مدت در فضای باز ضروری بوده و شامل پایداری در برابر پرتو فرابنفش خورشید، حرارت و آتش، و شرایط نامساعد جوی (مانند بادهای شدید) می‌شود.

نمونه‌ای عینی از این آسیب‌پذیری را می‌توان در جنگ روسیه و اوکراین مشاهده کرد، جایی که روس‌ها با پهنادهای حاوی ترمیت، تورهای ضدپهناد اوکراینی را در مسیرهای پشتیبانی سوزاندند و کاروان‌های لجستیکی را بی‌دفاع و در معرض حملات دقیق قرار دادند. از سوی دیگر، سرمایه زمستان نیز بر تورهای اهدایی (که اغلب از تورهای ماهیگیری فرانسه و نروژ ساخته شده بودند) فشار آورد؛ یخ‌زدگی و سنگین شدن سازه‌ها موجب ریزش آن‌ها و در نتیجه انسداد جاده‌ها و اختلال در خطوط حیاتی تأمین شد [۴۳].



شکل (۶): کارایی تورهای ضد پهناد اوکراینی در مقابله با پهنادهای تهاجمی روسی و محدودیت عملکرد تورهای ماهی‌گیری اوکراینی در برابر حملات پهنادهای ترمیت‌زن روسی [۴۳، ۴۴].

تورها بر روی جاده‌ها به‌صورت افقی (پوشش کامل) یا عمودی (پوشش منقطع) در بین یا روی تیرهای روشنایی، ستون‌ها و تیرک‌های دو طرف جاده نصب می‌شوند. پوشش افقی به‌منظور ایجاد «تونل توری» و جلوگیری از پرواز پهنادهای کوچک در ارتفاع پایین و از تمامی جهات به کار می‌رود. پوشش عمودی عموماً بر روی تیرهای روشنایی (جهت افزایش سرعت و سهولت نصب) در طرفین جاده‌ها به‌صورت عرضی یا طولی نصب

<sup>۲</sup> Belgorod

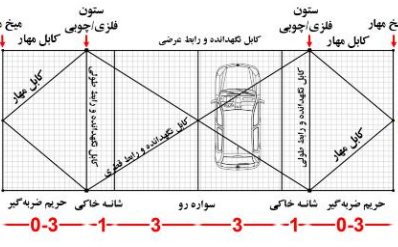
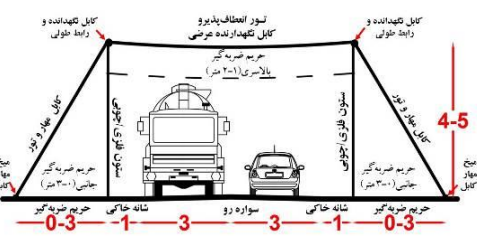
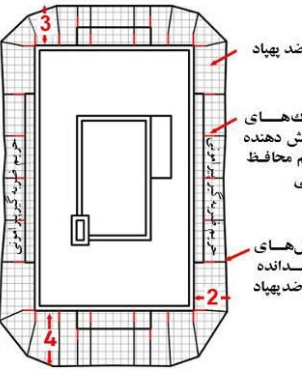
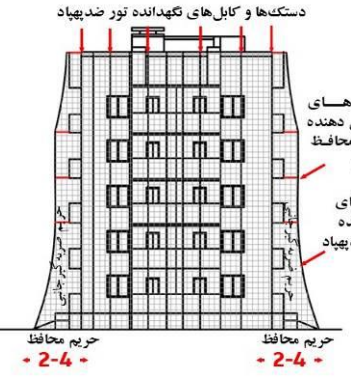
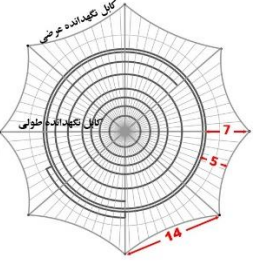
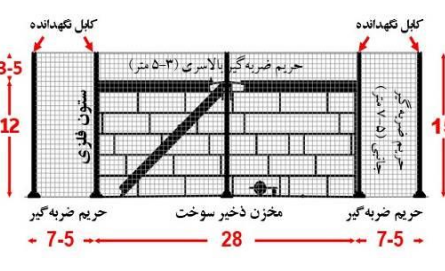
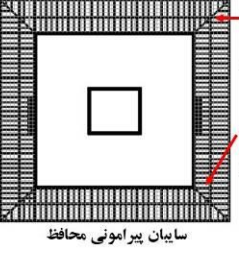
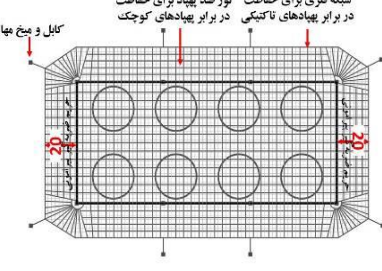
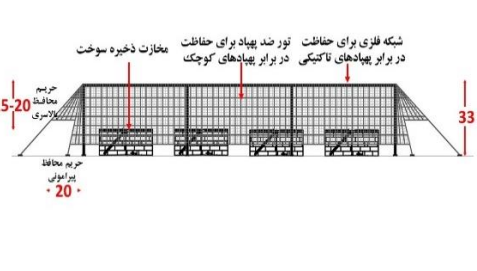
<sup>۳</sup> Cope Cage(s)

<sup>۴</sup> No-Fly Zone Barrier

<sup>۵</sup> Precision Attacks

<sup>۱</sup> Net Tunnel

## جدول (۲): اقدامات موقت و دائم فوری برای مقابله با حملات پهپادی.

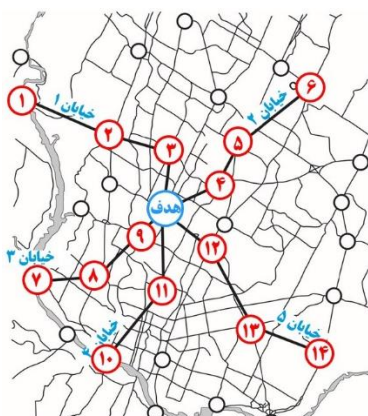
| شرح                                                                                  | پلان بام                                                                             | نما                                                                                 |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| توری‌های محافظ در بزرگراه‌های دونتسک برای مقابله با پهپادهای روسی. [۴۵]              |    |    |
| تورهای ضد پهپاد جهت تامین امنیت ساختمان‌ها در بلغراد روسیه [۴۷]                      |   |   |
| تورهای ضد پهپاد جهت تامین امنیت تأسیسات نفتی در کراسنودار [۴۸]                       |  |  |
| سپرهای حفاظتی بر روی جلوخان، نما و بام ساختمان‌های مهم در سفارت آمریکا در بغداد [۴۹] |   |  |
| سپرهای حفاظتی بر روی مخازن ذخیره‌سازی، مونچگورسک، شبه جزیره کولا [۵۰].               |  |  |

## ۵-۲- اقدامات بلند مدت

در این بخش، به دلیل اشتراک ویژگی‌های تهاجمی پهپادها با سایر پرنده‌های نظامی و تعمیم‌پذیری تدابیر کالبدی، از واژه عام‌تر «هواگرد» استفاده شده است.

### ۵-۲-۱- عناصر سطحی

«سطح» شامل تمام عوارضی است که در تراز زمین قرار دارند؛ از جمله خیابان‌ها، کوچه‌ها، فضاهای باز و پارک‌ها [۱۶]. برنامه‌ریزان نظامی در عملیات‌های شهری، به‌منظور تسهیل مسیریابی، ناوبری، و اعمال فرماندهی و کنترل، شبکه‌ای از «مسیرهای پروازی استاندارد» ایجاد می‌کنند (شکل ۸) [۵۳]. ساختار این مسیرهای پروازی، از به هم پیوستن گره‌های مرجعی تحت عنوان «نقاط کنترل هوایی»<sup>۷</sup> شکل می‌گیرد. این نقاط، به‌ویژه برای سامانه‌های ناوبری هواگردها که به تطبیق و به‌روزرسانی بصری متکی هستند، کارکردی حیاتی دارند. برای مشخص کردن این نقاط، از «نشانه‌های شاخص عمودی و خطی»<sup>۸</sup> استفاده می‌شود؛ عوارض برجسته‌ای مانند گورستان‌ها، استادیوم‌ها، مساجد، برج‌های رادیویی، ساختمان‌های بلندمرتبه و تقاطع‌های مهم ریلی و بزرگراهی از این جمله‌اند. عوارض خطی نظیر بزرگراه‌ها<sup>۹</sup>، رودخانه‌ها، خطوط راه‌آهن، کانال‌ها و خطوط ساحلی، به‌دلیل پیوستگی فضایی، به‌راحتی برای حفظ جهت‌گیری قابل تشخیص‌اند و با عمل به‌عنوان «نقاط مرجع خطی»، مسیرهای ناوبری پیوسته و آسانی را برای هدایت هواگردهای تجاری و تهاجمی فراهم می‌کنند [۵۳].



شکل (۸): ساختار مسیر شبکه، مسیر پروازی استاندارد و

نقاط کنترل هوایی عمودی و خطی. [۵۳]

منابع درآمد ارزی) و همچنین اختلال در زنجیره تأمین سوخت داخلی برای ایجاد بحران و آشوب‌های اجتماعی به کار می‌رود. این تاکتیک در جریان «جنگ ۱۲ روزه» توسط هواگردهای اسرائیلی علیه ایران اجرا شد که نتیجه آن اصابت و آسیب به انبار نفت شهران و یک مخزن سوخت در جنوب تهران و بروز آتش‌سوزی بود. شدت و کارایی این حملات با طولانی شدن بازه زمانی نبرد افزایش می‌یابد؛ به طوری که روسیه و اوکراین برای محافظت از تأسیسات نفتی و صنعتی خود در برابر حملات پهپادی، در حال پوشاندن آن‌ها با تورهای ضدپهپاد هستند [۵۱]. حملات مداوم اوکراین به ۱۶ پالایشگاه روسیه، دست‌کم به کاهش ۳۸ درصدی ظرفیت پالایش نفت این کشور منجر شده است [۵۲].

### ۵-۱-۲- شبکه یا پنل صلب

شبکه‌ها یا پنل‌های سخت<sup>۱</sup> (فلزی یا ترکیبی) که با عنوان «سپرهای حفاظتی»<sup>۲</sup> نیز شناخته می‌شوند، ابزارهایی حیاتی برای ایمن‌سازی عناصر روستی خاص مانند ساختمان‌ها و زیرساخت‌های حساس به شمار می‌روند. ساختار این سامانه‌های حفاظتی، ارتباط مستقیمی با نوع کاربری سازه و ماهیت تهدیدات احتمالی دارد و بر این اساس پیکربندی می‌شود.

سازه‌های مشبک فلزی راهکاری اثبات‌شده در حفاظت از ساختمان‌های مهم هستند. به عنوان مثال، ایالات متحده آمریکا برای پوشش نقاط آسیب‌پذیر در ساختمان‌های کلیدی سفارت خود در بغداد (شامل جلوخان، نما و بام) که بزرگ‌ترین و گران‌ترین سفارتخانه در جهان محسوب می‌شود، از این سازه‌ها استفاده کرده است [۴۹].

شرکت بزرگ معدن و متالورژی روسیه<sup>۳</sup> در واکنش به تهدیدات فزاینده پهپادها، اقدام به اجرای یک سامانه دفاعی جدید با عنوان «گنبد فولادی»<sup>۴</sup> بر فراز تأسیسات صنعتی کلیدی خود کرده است. این سامانه از یک چارچوب فلزی صلب تشکیل شده که با شبکه‌ای متراکم از تورهای کابلی پوشانده شده و به‌طور خاص برای مقابله با انرژی جنبشی ناشی از برخورد اشیای پرتابی طراحی شده است. سایت ذخیره‌سازی سوخت در مونچگورسک<sup>۵</sup> نیز از جمله تأسیساتی است که در دستور کار این نوع محافظت قرار دارد [۵۰].

<sup>۱</sup> Rigid Mesh/Panel

<sup>۲</sup> Protective shield

<sup>۳</sup> Russian Mining and Metallurgical Corporation

<sup>۴</sup> Steel Dome

<sup>۵</sup> Monchegorsk

<sup>۶</sup> Network of Standard Flight Route(s)

<sup>۷</sup> Air Control Points (ACPs)

<sup>۸</sup> Vertical and Linear Reference(s)

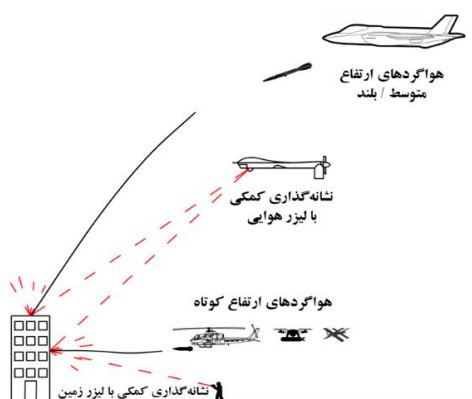
<sup>۹</sup> Highway(s)

## ۵-۲-۲- عناصر روستطی

### ▪ مقیاس مجموعه [بلوک]:

در این مقیاس، عناصر روستطی به‌ویژه ساختمان‌ها، از یک سو قابلیت مانور<sup>۱</sup> و خط سیر حمله هوا به زمین<sup>۲</sup> هواگرد را محدود می‌سازند [۵۵] و از سوی دیگر، به‌کارگیری تسلیحات هدایت‌شونده دقیق را با چالش مواجه کرده و محدودیت‌هایی در فرایند شناسایی، شلیک و خط سیر پرتابه‌ها ایجاد می‌کنند. به‌طور خاص، این موانع با ایجاد خطای بازتاب لیزر، عملکرد این سامانه‌ها در محیط‌های شهری را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد [۱۶].

اثر سکو<sup>۳</sup>، مهم‌ترین آسیب‌پذیری سلاح‌های لیزری در مقیاس بلوک است. این وضعیت، که اغلب توسط ساختمان‌های بلند و شکل‌گیری دره‌های شهری<sup>۴</sup> ایجاد می‌شود، زمانی رخ می‌دهد که ساختمان‌های میانی مسیر لیزر را مسدود می‌کنند و مانع از رسیدن انعکاس لیزر نشانه‌گذاری شده بر روی هدف به حسگر جوینده مهمات می‌شوند [۵۶].



شکل (۱۰): تفاوت راهبرد نشانه‌گذاری لیزری کمکی از راه دور توسط نشانه‌گذار هوایی و زمینی<sup>۵</sup> برای هدایت تسلیحات لیزری، متناسب با ارتفاع و موقعیت هواگردها [۱۶].

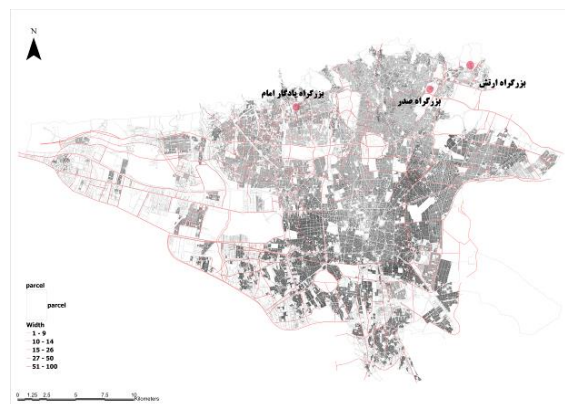
در مناطق شهری دارای ساختمان‌هایی با ارتفاع مشابه، احتمال کمتری وجود دارد که خط دید برای نشانگر لیزری (از هواگرد یا عامل زمینی) تا نقطه هدف توسط سازه‌های میانی مسدود شود. یک محیط هدف قابل پیش‌بینی‌تر، عملیات نشانه‌گذاری لیزری و هدایت نهایی بمب را ساده‌تر می‌کند. ساختمان‌های بلندتر یا ساختمان‌هایی با ارتفاعات متغیر می‌توانند خط دید بین نشانگر لیزری (روی هواگرد مهاجم یا نشانگر زمینی) و نقطه هدف روی

بررسی سه مجموعه مسکونی هدف قرار گرفته در جریان جنگ ۱۲ روزه نشان می‌دهد که هر سه در مجاورت مستقیم با زیرساخت‌های حمل‌ونقل با عرض بیش از ۵۰ متر (بزرگراه‌های اصلی تهران) قرار داشته‌اند (شکل ۸). ساختمان‌های آسیب‌دیده در سه مجموعه سرو، شهید چمران و شهرک شهید محلاتی دارای مجاورت با بزرگراه‌های صدر و یادگار امام و ارتش بوده‌اند. این مجاورت می‌تواند به عنوان یک عامل شناسایی بصری برای هدایت هواگردهای مهاجم عمل کرده باشد.

جدول (۳): فاصله ساختمان‌های مورد هدف از شبکه بزرگراهی تهران.

| مجموعه مسکونی    | بزرگراه مجاور       | موقعیت ساختمان نسبت به بزرگراه | فاصله تقریبی از بزرگراه (متر) |
|------------------|---------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| شهرک شهید چمران  | بزرگراه صدر         | بلوک شهری مجاور ضلع شمالی      | ۱۳۰۰                          |
| مجمع سرو         | بزرگراه یادگار امام | بلوک شهری مجاور ضلع جنوبی      | ۴۸۰۰                          |
| شهرک شهید محلاتی | بزرگراه ارتش        | بلوک شهری در ضلع شمالی         | ۱۷۵۰۰                         |

اگرچه ساختمان هدف قرار گرفته در شهرک شهید محلاتی فاصله بیشتری از بزرگراه ارتش دارد، اما موقعیت آن در لبه فوقانی شهرک و تراز ارتفاعی بالاتر (۲۰۱۰ متر از سطح دریا)، بر سهولت شناسایی آن افزوده و عامل هم‌جواری با شبکه بزرگراهی را تقویت کرده است (شکل ۱۰).



شکل (۹): محل قرارگیری سه مجموعه مسکونی هدف قرار گرفته (دوایر قرمز) در ارتباط با شبکه بزرگراهی تهران (خطوط قرمز که نمایانگر معابر با عرض بیش از ۵۰ متر). ماخذ نقشه پایه: [۵۴]؛ تحلیل و افزوده‌ها: نگارندگان.

<sup>۱</sup> Maneuverability

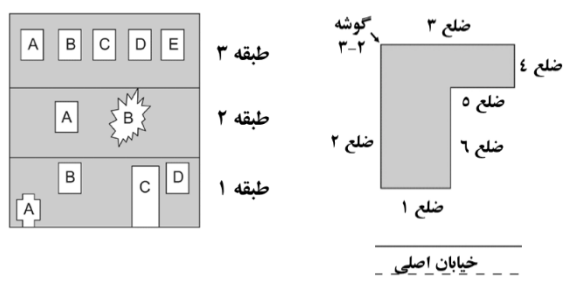
<sup>۲</sup> Air-to-ground Approach Vector(s)

<sup>۳</sup> Podium effect

<sup>۴</sup> Urban Canyon(s)

<sup>۵</sup> Airborne and Ground Designator

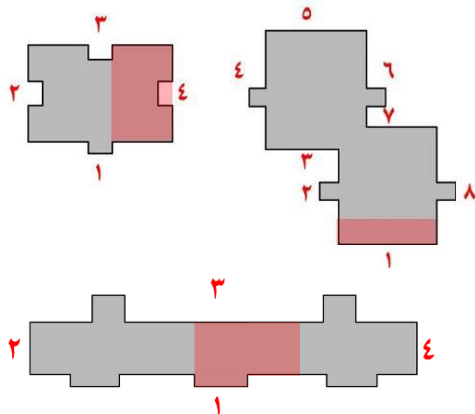
این تکنیک به خدمه هواگرد کمک می‌کند تا موقعیت دقیقی را بر روی یک ساختمان یا سازه ثابت شناسایی و تعیین کنند. مطابق شکل (۱۱)، شماره‌گذاری تمامی وجوه ساختمان در جهت عقربه‌های ساعت و با شروع از نمای اصلی (جلو) انجام می‌گیرد. روند شماره‌گذاری طبقات از طبقه همکف آغاز شده و به سمت بالاترین طبقه ادامه می‌یابد. پنجره‌ها و دهانه‌ها نیز با شروع از حرف A، از سمت چپ به راست مشخص می‌گردند. برای اطمینان از اختصاص شناسه دقیق به تمامی پنجره‌ها، دهانه‌ها و حتی حفره‌ها یا شکاف‌های شاخص بدنه سازه، توالی حروف در هر طبقه مجدداً از ابتدا تکرار می‌شود. افزون بر این، تکنیک مذکور می‌تواند در برگزیده ارجاعات توصیفی مستقیم نیز باشد؛ به عنوان مثال، اشاره به «پنجره سمت راست محل وقوع حریق» [۱۶].



شکل (۱۲): روش‌های نشانه‌گذاری ساختمان‌ها. به ترتیب از راست:

قرارداد نامگذاری جداره‌ها و گوشه‌های ساختمان - قراردادهای نامگذاری طبقات و پنجره [۱۶].

در جریان نبرد ۱۲ روزه، تمام ساختمان‌های هدف قرار گرفته، دارای فرم‌های کالبدی با قاعده مربع یا مستطیل بودند. این هندسه ساده در پلان بام، شناسایی دقیق اضلاع و گوشه‌های هدف را برای هواگردهای تهاجمی تسهیل می‌کرد و فرایند هماهنگی و نشانه‌گذاری میان عامل زمینی و هواگرد (در صورت بهره‌گیری از روش‌های نشانه‌گذاری کمکی) را به مراتب ساده‌تر می‌ساخت.

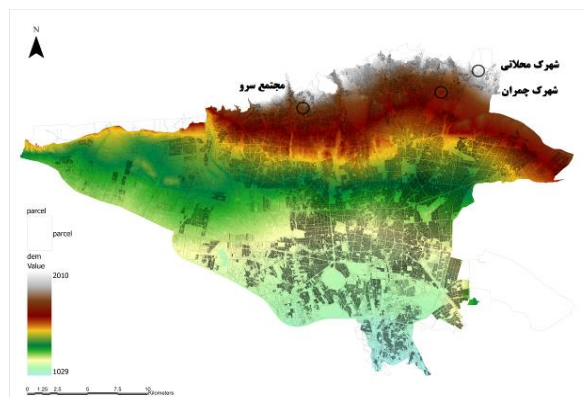


شکل (۱۳): بخش‌های آسیب دیده از نمای پلان بام در ساختمان‌های هدف قرار گرفته. به ترتیب از راست: ساختمان مجتمع سرو، شهرک شهید چمران و شهرک شهید محلاتی.

بام یا نمای ساختمان را مسدود کنند [۱۶]. اگر لیزر به‌طور موقت یا دائمی مسدود شود، جستجوگر لیزری نیمه‌فعال روی بمب سیگنال هدایتی خود را از دست می‌دهد و به یک مسیر بالستیک هدایت‌نشده بازمی‌گردد که منجر به خطا می‌شود [۵۷].

ساختمان‌های ۱۵ طبقه مجموعه شهید چمران و ۱۴ طبقه سرو دانشگاه بهشتی دارای اختلاف ارتفاعی تا ۲ برابر با غالب بناها در حوزه بلافصل خود هستند. این امر نه تنها اثر سکو را در برابر سلاح‌های هدایت لیزری ایجاد نکرده بلکه با ایجاد نمایانی مضاعف، خطوط دید مستقیمی را از جهات گوناگون برای هدف قراردادن ساختمان ایجاد کرده است [۵۴].

در شهرک شهید محلاتی، با وجود اینکه ارتفاع یکسان ۱۴ طبقه ساختمان‌ها باعث از بین رفتن نمایانی ناشی از اختلاف ارتفاع می‌شود، اما فقدان ساختمان‌های بلندتر به عدم شکل‌گیری اثر سکو منجر گردیده است. این امر، در کنار افزایش تراز ارتفاعی سطح زمین از جنوب به شمال شهرک، در نهایت باعث شده است که سطح بالایی تمام ساختمان‌ها در دید مستقیم<sup>۱</sup> هواگردهای تهاجمی قرار گیرد و به‌طور قابل ملاحظه‌ای آسیب‌پذیری مجموعه افزایش یابد.



شکل (۱۱): محل قرارگیری سه مجموعه مسکونی هدف قرار گرفته (دوایر قرمز) در بستر تراز ارتفاعی تهران. ماخذ: [۵۴]؛ تحلیل و افزوده‌ها: نگارندگان.

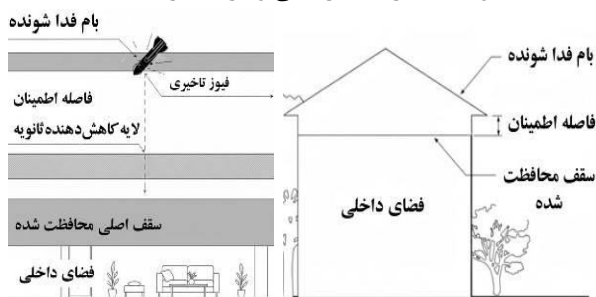
## ▪ مقیاس ساختمان

در مقیاس ساختمان، شناخت تکنیک‌های نشانه‌گذاری ساختمان<sup>۲</sup> که امکان شناسایی و مشخص کردن بخش‌های کلیدی ساختمان را چه از طریق پلان بام و چه از طریق نما برای عملیات هدف‌گیری توسط هواگرد فراهم می‌سازند، از اهمیت بسیاری برخوردار است.

<sup>۱</sup> Line of Sight (LOS)

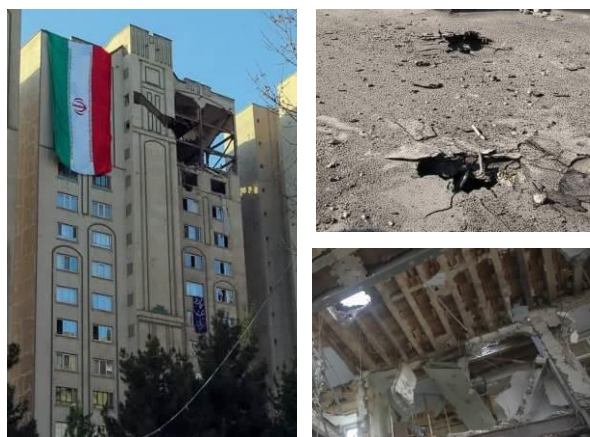
<sup>۲</sup> Building Marking Technique(s)

در سطح راهکارهای سازه‌ای پیشرفته، طراحی سیستم‌های سقف دولایه (شامل سقف شیب‌دار فداشونده<sup>۱</sup> بر فراز یک سقف محافظت‌شده<sup>۲</sup>) و سقف‌های چندلایه، با ایجاد اختلال در عملکرد فیوزهای تأخیری، تاب‌آوری سازه را در برابر تسلیحات دقیق افزایش می‌دهند. همچنین سامانه سازه‌ای مناسب برای مقابله با تهدید انفجاری روی بام، «بتن مسلح درجا ریخته‌شده»<sup>۳</sup> و «قاب‌های فولادی همراه با دال بتنی و عرشه فلزی» است [۵۸].



شکل (۱۵): سقف‌های فدا شونده دو لایه (سمت راست) و چند لایه (سمت چپ) و اجزای آن در بام‌های شیب‌دار و مسطح [۵۸].

بررسی حمله موشکی به واحد مسکونی شهید فریدون عباسی در شهرک شهید محلاتی نشان داد که قرارگیری واحد در طبقه سیزدهم (یک طبقه مانده به آخر)، فقدان سازه حفاظتی بر روی بام و استفاده از سیستم سقف با مقاومت کم (تیرهای فولادی و بلوک‌های سفالی)، امکان نفوذ موشک مجهز به فیوز تأخیری از دو سطح سخت (بام و سقف طبقه سیزدهم) و انفجار آن در داخل واحد را فراهم ساخته است.

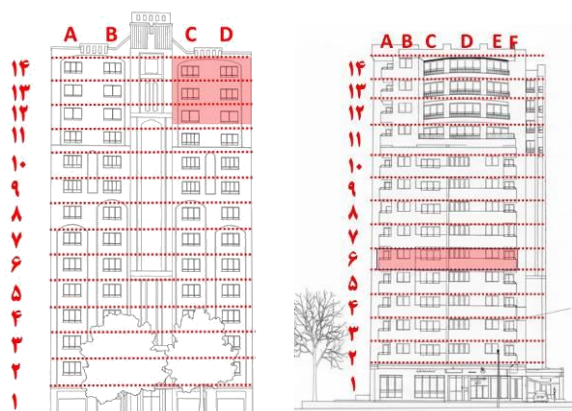


شکل (۱۶): اصابت موشک‌های دارای فیوز تأخیری به پشت‌بام

ساختمان. به ترتیب از بالا و سمت راست: حفره‌های ایجاد شده در بام. تخریب در نمای ساختمان و سوراخ ایجاد شده از درون. شهرک شهید محلاتی [۵۹] [۶۰].

در فاز نخست حملات، شهرک شهید چمران هدف شدیدترین تهاجمات هوایی قرار گرفت؛ حمله‌ای که به انهدام

در نمای ساختمان‌ها نیز، ترکیب این هندسه منظم با سادگی پلان سبب می‌شد تا تعیین دقیق طبقات و بازشوهای مورد نظر (مانند پنجره‌ها) جهت اجرای حمله، با سرعت و دقت بسیار بالاتری انجام شود. این ویژگی به‌ویژه در عملیات مشترک زمینی و هوایی و هنگام به‌کارگیری نشانه‌گذار هوایی و زمینی، کارایی قابل توجهی دارد.



شکل (۱۴): بخش‌های آسیب‌دیده در نمای ساختمان‌های

هدف‌قرارگرفته؛ به ترتیب از راست به چپ (و بالا به پایین): مجتمع سرو، شهرک شهید محلاتی و شهرک شهید چمران.

### ■ مقیاس عناصر

عناصر ساختمانی از منظر آسیب‌پذیری در برابر تهدیدات هوایی به سه حوزه اصلی شامل بام (سطح افقی فوقانی)، جداره (بدنه اصلی ساختمان و بازشوها) و پوشش نما (لایه خارجی و غیرسازه‌ای) تقسیم می‌شوند. اتخاذ تدابیر دفاعی مؤثر برای حفاظت از هر یک از این بخش‌ها، نقش کلیدی در افزایش تاب‌آوری کل سازه ایفا می‌کند.

بام‌ها به‌عنوان نخستین و اصلی‌ترین هدف حملات هوایی، در اولویت اقدامات محافظتی قرار دارند. برای اخلال در عملیات پهباده‌ها و محدودسازی امکان نشست و مانور آن‌ها، اتخاذ راهکارهایی نظیر تعبیه سطوح زاویه‌دار، استفاده از مصالح نامناسب برای فرود و به حداقل رساندن تجهیزات حیاتی در معرض دید الزامی است.

<sup>۱</sup> Sacrificial Sloping Roof

<sup>۲</sup> Protected Ceiling

<sup>۳</sup> Poured-in-place Reinforced Concrete

آشکار با اصول طراحی ایمن قرار دارد؛ اصولی که بر استفاده از پنجره‌های باریک، فرورفته در نما و دارای آستانه شیب‌دار تأکید می‌کنند [۵۸، ۶۲].



شکل (۱۸): آسیب پرتابه انفجاری به نمای جنوبی ساختمان. مجتمع مسکونی سرو [۶۳].

#### ○ پوشش نما:

پوشش خارجی ساختمان، آسیب‌پذیرترین بخش در برابر تهدیدات انفجاری است و از دو جنبه‌ی «رنگ» و «جنس مصالح»، در فرآیند شناسایی و هدف‌گذاری توسط هواگردها اهمیت دارد. برای کاهش وضوح بصری و استتار برجستگی‌های ساختمان، باید از مصالح و پوشش‌هایی با رنگ‌های خاکی استفاده شود [۵۸]. با این حال، بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که در دو ساختمان مجتمع‌های «سرو» و «چمران» (شکل‌های ۱۷ و ۱۸)، به‌کارگیری ترکیب رنگ قرمز بر روی اجزای برجسته (نظیر بالکن‌ها، خط بام و گوشه‌ها) و رنگ قهوه‌ای در بدنه اصلی، به تمایز بصری بنا انجامیده است. همچنین، در ساختمان هدف قرار گرفته در شهرک شهید محلاتی (شکل ۱۶)، کادربندی‌های سبزرنگ پیرامون پنجره‌ها و لبه‌های ساختمان بر روی پس‌زمینه قهوه‌ای، این تضاد و تمایز بصری را تشدید کرده است.

افزون بر این، جنس مصالح نما مستقیماً بر عملکرد مهمات لیزر به سامانه هدایت لیزری نیمه‌فعال (که متکی به بازتاب پرتو لیزر هستند) تأثیر می‌گذارد. نشانه‌گذاری لیزری به دلیل اثر بازتاب یا انحراف<sup>۲</sup> نباید روی سطوحی نظیر آب ساکن، شیشه تخت، آینه، یخ لعاب‌دار، صفحات پلکسی<sup>۳</sup> یا هر بازتابنده آینه‌ای دیگر تابانده شود [۶۴]. به طور خاص تاباندن لیزر بر روی پنجره‌ها چالش‌برانگیز است؛ زیرا علاوه بر احتمال انحراف و بازتاب پرتو به سوی یک هدف کاذب، می‌تواند به پدیده‌ی «به دام افتادن لیزر»<sup>۴</sup> در فضای داخلی ساختمان و گم‌شدن لکه یا نقطه لیزری منجر گردد [۱۶].

این در حالی است که در سطح نمای هر سه ساختمان مورد بررسی، به جز پنجره‌ها (که ذاتاً در برابر پرتابه‌ها آسیب‌پذیرند)، هیچ‌گونه مصالح بازتاب‌دهنده آینه‌ای برای ایجاد اختلال در

بخش محل سکونت شهید منصور عسکری در یک ساختمان ۱۵ طبقه و شهادت دست‌کم ۶۰ نفر انجامید. مقاومت ذاتی بالای سیستم دال بتن مسلح در سقف‌ها و جداره‌های این سازه، مانعی جدی در برابر تسلیحات سبک ایجاد کرده بود. همین استحکام ساختاری، مهاجمان را ناگزیر ساخت تا برای غلبه بر سختی سازه و نفوذ و تخریب کامل آن، از تسلیحات سنگین با قابلیت تهاجم مستقیم<sup>۱</sup> بهره‌گیرند. با این وجود، علی‌رغم مقاومت مطلوب بتن مسلح به‌عنوان سیستم سازه‌ای اولیه، این ساختمان فاقد لایه‌های حفاظتی ثانویه در برابر تهدیدات انفجاری بود. فقدان این تمهیدات دفاعی، چه در نما و چه در بام ساختمان، تاب‌آوری سازه را در برابر انرژی آزادشده از مهمات سنگین به‌شدت تنزل داد و زمینه‌ساز آسیب‌های گسترده کالبدی گردید.



شکل (۱۷): تخریب کامل بخش مورد هدف در ساختمان ۱۵ طبقه. شهرک شهید چمران [۶۱].

#### ○ جداره:

جداره‌های بیرونی ساختمان (دیوارپیرامونی و بازشوها) پس از بام، دومین لایه دفاعی در برابر تهدیدات هوایی محسوب می‌شوند. کارکرد اصلی این سطوح، ممانعت از نفوذ پرتابه‌ها، استهلاک انرژی امواج انفجار و جلوگیری از تولید آوارهای ثانویه است.

بر اساس دستورالعمل‌های معتبر بین‌المللی، در سناریوهای با سطح تهدید بالا، جایگزینی مصالح بنایی ترد و شکننده و دیوارهای پرده‌ای با سیستم‌های «بتن مسلح درجا»، «دیوارهای مقاوم در برابر انفجار» و «پانل‌های فداشونده»، به‌منظور ارتقای شکل‌پذیری سازه و کاهش حجم آوار الزامی است.

بررسی حمله موشکی به ساختمان محل سکونت شهید محمدمهدی تهرانی در مجتمع سرو نشان می‌دهد که اگرچه قرارگیری واحد هدف در طبقه ششم و هم‌جواری آن با فضای باز، امکان برخورد مستقیم پرتابه به جداره اصلی را تسهیل کرده است، اما عامل بنیادین در تخریب گسترده‌ی آن، استفاده از مصالح «سفالی» فاقد مقاومت و تعبیه شش بازشوی بزرگ‌مقیاس در نمای اصلی بوده است. این پیکربندی آسیب‌پذیر، در تقابل

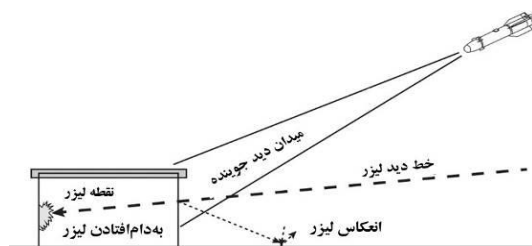
<sup>۲</sup> Laser Reflection

<sup>۳</sup> Plexiglas

<sup>۴</sup> Laser Entrapment

<sup>۱</sup> Heavy Direct-Attack Weaponry

نشانه‌گذاری لیزری به کار نرفته است.



شکل (۱۹): اثر بازتاب و اثر به دام افتادن لیزر در تعیین هدف با لیزر [۱۶].

از سوی دیگر، نشانه‌گذاری لیزری بر روی سطوح ناهموار<sup>۱</sup> نیز به دلیل ایجاد «بازتاب پخش‌ی»<sup>۲</sup> نامطلوب است؛ چراکه پرتو بازتاب یافته به جای تمرکز، در تمام جهات پراکنده شده و در نتیجه، سیگنال بازگشتی ضعیف و غیرقابل رهگیری خواهد بود [۲۳].

پوشش نمای هر سه ساختمان هدف قرار گرفته، از نوع «بتن نمایان» بوده است. بتن به طور معمول ۱۰ تا ۱۵ درصد از انرژی لیزر نشانه‌گذار را بازتاب می‌دهد. اگرچه این میزان بازتابندگی از سایر مصالح رایج نما در ایران—مانند آلومینیوم صیقل نیافته (۵۵ درصد) و آجر (۵۵ تا ۹۰ درصد)—کمتر است، اما در مجموع برای حسگر موشک‌های هدایت‌شونده کفایت می‌کند تا پالس‌های کدگذاری‌شده بازتابی را تشخیص داده و پرتابه را به سمت مرکز انرژی منعکس‌شده (نقطه لیزری) هدایت نماید [۶۵].

## ۶- نتایج و بحث

ظهور و تنوع روزافزون پهپادها از اوایل دهه ۹۰ میلادی، چالش‌های نوینی را در محیط‌های شهری رقم زده است. ویژگی‌هایی چون کاهش خطر برای نیروی انسانی مهاجم و قابلیت نفوذ به فضاهای حساس، پهپادها را به تهدیدی راهبردی علیه ساختمان‌ها، زیرساخت‌های کلیدی و تجمعات انسانی بدل ساخته و ضرورت بازنگری در راهکارهای دفاعی در سکونتگاه‌های شهری را دوچندان کرده است.

فقدان نظارت هوایی و خلأ پشتیبانی پدافندی در فضای هوایی کلاس G (ارتفاع زیر ۲۱۳ متر)، به بروز شکاف امنیتی در پهپادهای شهری انجامیده و بستر عملیاتی مساعدی را برای بهره‌برداری هواگردهای مهاجم فراهم ساخته است. با توجه به نبود راهکار یگانه‌ای برای تأمین امنیت مطلق در این لایه پروازی، ایجاد نظام دفاعی کارآمد مستلزم اتخاذ رویکردی چندلایه است؛ رویکردی که سامانه‌های کشف و رهگیری، قوانین و سیاست‌گذاری‌های کلان را با طرح‌ریزی کالبدی شهر پیوند دهد.

راهکارهای دفاعی در محیط‌های شهری، ترکیبی منسجم از «پاسخ‌های فوری» و «برنامه‌ریزی‌های بلندمدت» را می‌طلبد. در بخش تدابیر فوری، سامانه‌های سدکننده فیزیکی (با توجه به جرم و سرعت پرتابه) به دو دسته «تورهای منعطف» و «شبکه‌های صلب» تقسیم می‌شوند تا انرژی تهدید را پیش از اصابت به هدف مستهلک کنند. در کنار این اقدامات، تدابیر بلندمدت با اتخاذ دیدگاهی کلان‌نگر، الزامات امنیتی را در کالبد شهر (اعم از عناصر سطحی و روسطحی) نهادینه می‌سازند. این رویکرد با ایجاد تعادل میان تسهیل تردد پهپادهای مجاز و انسداد مسیرهای دسترسی غیرقانونی، تاب‌آوری سکونتگاه‌های شهری را در برابر تهدیدات هوایی به شکل مؤثری ارتقا می‌دهد.

در بُعد فضاهای سطحی، تعریف دالان‌های هوایی مشخص برای پروازهای مجاز، تمرکز نظارتی را افزایش داده و شناسایی پهپادهای متخاصم را تسهیل می‌کند. همچنین، مکان‌یابی هوشمند ابنیه حساس در فواصل دور از شریان‌های اصلی، سامانه‌های ناوبری بصری مهاجم را (به‌ویژه در صورت اختلال سامانه‌های موقعیت‌یاب جهانی) ناکارآمد ساخته و از دقت حملات می‌کاهد. در بُعد فضاهای روسطحی، بازنگری در ضوابط شهرسازی به نفع الگوهای ارتفاعی متغیر، جهت شکل‌گیری «اثر سکو» و متعاقب آن اختلال در قفل‌گذاری لیزری، ضروری می‌نماید. در نهایت، در مقیاس معماری و عناصر ساختمانی، بهره‌گیری از هندسه‌های پیچیده و فرم‌های نامتقارن، در کنار استفاده از فناوری‌های حفاظتی (نظیر سقف‌های فداشونده چندلایه، جداره‌های بتن مسلح و پوشش‌های مختل‌کننده بازتاب مانند شیشه، آینه و صفحات پلکسی)، دقت هدف‌گیری و احتمال اصابت موثر تسلیحات هواگرد مهاجم شده را کاهش می‌دهد.

در پایان، برخلاف تصور رایج مبنی بر ناکارآمدی راهکارهای دفاع غیرعامل کالبدی در برابر مهمات سنگین (نظیر آنچه در مجتمع شهید چمران رخ داد)، باید تأکید کرد که یک دفاع شهری کارآمد، تنها در سایه پیوند نظام‌مند میان «دفاع عامل» و «دفاع غیرعامل» محقق می‌شود. این تدابیر کالبدی، حتی در مواجهه با جنگ‌افزارهای نسل پنجم نیز نقش خود را ایفا می‌کنند؛ چراکه مهاجم را وادار به انتخاب میان «پنهان‌کاری» و «ظرفیت تسلیحاتی» می‌سازند. به عنوان نمونه، محدودیت جنگنده پنهان‌کار F-35 در حمل تنها دو بمب سنگین (در حالت رادارگریز)، دشمن را ناگزیر به افزایش سورتی‌های پروازی می‌کند؛ راهبردی که مستقیماً خطر شناسایی و احتمال درگیری با سامانه‌های پدافندی را بالا برده و زنجیره تهاجم را با چالش‌های جدی و بازدارنده مواجه می‌سازد.

جدول (۴)، راهکارهای دفاعی بلندمدت در برابر تهاجم هواگردها را در دو بخش سطحی و روسطحی تشریح می‌کند:

<sup>۱</sup> Rough Surface

<sup>۲</sup> Diffuse Reflection

جدول (۴): خلاصه‌ی راهکارهای بلندمدت دفاع غیرعامل در عرصه شهری با تأکید بر مقابله با تهاجمات هوایی

| عرصه  | مقیاس طراحی       | عنصر مورد نظر                   | چالش/آسیب‌پذیری اصلی                                                | راهکار دفاعی توصیه شده                                         | هدف نهایی                                                                                      |
|-------|-------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| سطحی  | شهری (شبکه معابر) | مدیریت فضای هوایی (ترافیک مجاز) | تداخل پروازهای مجاز و غیرمجاز و کاهش زمان واکنش پدافند              | برنامه‌ریزی دالان‌های پروازی مجزا (تکفیک زمانی/مکانی)          | گسترش لایه امنیتی، افزایش زمان واکنش و ایجاد منطقه عایق بصری و الکترونیک                       |
|       |                   | مکانیابی ساختمان‌های مهم        | سهولت ناوبری بصری هواگردها به دلیل همجواری ساختمان‌ها با معابر عریض | فاصله‌گذاری ساختمان‌های مهم از معابر اصلی و عریض               | اخلال در ناوبری متکی بر به‌روزرسانی بصری (در شرایط قطعی جی‌پی‌اس و جنگ الکترونیک)              |
| روسطی | شهری (بلوک)       | الگوی ارتفاعی ساختمان‌ها        | سهولت هدف‌گیری در خط آسمان همسان به دلیل عدم تشکیل «اثر سکو»        | بازنگری در کدهای ارتفاعی یکنواخت و اعمال الگوی ارتفاعی ناهمگون | محدودسازی مانورپذیری، کاهش بردار تقرب هواگرد و محدودیت هدف‌یابی، شلیک و مسیر یابی تسلیحات دقیق |
|       | ساختمان           | فرم کالبدی بنا                  | سادگی فرم‌های متقارن (مربع/مستطیل) و سهولت نشانه‌گذاری اضلاع        | طراحی حجم‌های نامنظم، غیرمتقارن و چندوجهی                      | ایجاد ابهام کالبدی و اخلال در کشف و نشانه‌گذاری زوایای هدف                                     |
|       |                   | آرایش بازشوها و نما             | نظم شبکه‌ای پنجره‌ها و بازشوها و امکان انطباق سریع نقاط هدف متناظر  | طراحی نماهای نامنظم با آرایش، ابعاد و اشکال نامنظم             | مخدوش‌سازی الگوی بصری شبکه نما و عدم امکان تشخیص دقیق واحد هدف                                 |
|       | عناصر ساختمان     | پوشش بام                        | آسیب‌پذیری در برابر اصابت مستقیم و تسلیحات دارای فیوزهای تأخیری     | احداث سقف‌های چندلایه و لایه‌های شیب‌دار فداشونده              | تحریک زودرس یا اخلال در فیوز مهمات و کاهش توان نفوذ به فضاهای داخلی                            |
|       |                   | جداره پیرامونی                  | آسیب‌پذیری بالای مصالح ترد (سفال) در برابر موج انفجار و تولید آوار  | به‌کارگیری بتن مسلح درجا، پانل‌های فداشونده و دیوارهای انفجاری | جذب انرژی موج انفجار، ارتقای شکل‌پذیری سازه و جلوگیری از آوار مرگبار                           |
|       |                   | رنگ و پوشش نما                  | تمایز بصری بالا و شناسایی عناصر سازه‌ای در نما                      | استفاده از پوشش‌ها و رنگ‌های خاکی، مات و همپوشان با بستر       | کاستن از نمایانی بصری و کاهش کنتراست هدف با محیط پیرامون                                       |
|       |                   | مصالح بازتابنده نما             | -                                                                   | به‌کارگیری عناصر آینه‌ای و صیقلی (شیشه تخت، آینه، پلکسی‌گلاس)  | انحراف یا به دام انداختن پرتو لیزر                                                             |
|       |                   | بافت سطح نما                    | بازتاب منظم انرژی لیزر از سطوح نما و قفل حسگرهای نیمه‌فعال          | استفاده از سطوح و بافت‌های ناهموار                             | ایجاد بازتاب پخشی و تضعیف سیگنال بازگشتی لیزر                                                  |

[https://www.army.mil/article/280364/munitions\\_modernization\\_the\\_family\\_of\\_drone\\_munitions](https://www.army.mil/article/280364/munitions_modernization_the_family_of_drone_munitions) (accessed).

- [16] ALSA, MULTI-SERVICE TACTICS, TECHNIQUES, AND PROCEDURES FOR AVIATION URBAN OPERATIONS Aviation Operations. US Air Force at US Air Force Center for Doctrine Development and Education, 2022.
- [17] DOD, Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms. Department of Defense, 2025.
- [18] S. Y. Alaba, "GPS-IMU sensor fusion for reliable autonomous vehicle position estimation," arXiv preprint arXiv:2405.08119, 2024, doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.08119>.
- [19] Economist, "When GPS fails, how can weapons find their targets?," ed, 2023.
- [20] A. Mohamadi, H. Nahavandchi, and A. Khodabandeh, "Phase-Only positioning in urban environments: assessing its potential for mass-market GNSS receivers," Journal of Spatial Science, pp. 1-13, 2025, doi: <https://doi.org/10.1080/14498596.2025.2536567>.
- [21] F. Lu, S. Chen, M. Liu, J. Wang, F. Ma, and T. Yang, "A target recapturing method for the millimeter wave seeker with narrow beamwidth," in IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018: IEEE, pp. 2841-2844, doi: <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518402>.
- [22] L. P. Cecchini, E. Pizzingrilli, S. Russo, and U. F. D'Elia, "MMW active phased array seeker project for Hit To Kill engagement," in 2008 IEEE Radar Conference, 2008: IEEE, pp. 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720743>.
- [23] DOD, LASER RANGE SAFETY. USA Department of Defense, 2011.
- [24] JOINT-STAFF, METHODOLOGY FOR COMBAT ASSESSMENT. United States Department of Defense 2019.
- [25] U.S. Army, FM 3-34.214-Explosives and Demolitions. D. o. Headquar, 2007.
- [26] R. Shrestha, I. Oh, and S. Kim, "A survey on operation concept, advancements, and challenging issues of urban air traffic management", Frontiers in Future Transportation, vol. 2, p. 626935, 2021.
- [27] GAO, "Drone Operations." U.S. Government Accountability Office. <https://www.gao.gov/drone-operations> (accessed).
- [28] FAA, Aeronautical Information Manual. Federal Aviation Administration 2.011
- [29] FAA, "UTM Concept of Operations Version 2.0 (UTM ConOps v2.0)," 2022. [Online]. Available: <https://www.faa.gov/researchdevelopment/trafficmanagement/utm-concept-operations-version-20-utm-conops-v20>
- [30] SESAR, "SESAR concept of operations for U-Space," 2019. [Online]. Available: <https://www.sesarju.eu/node/3411>.
- [31] M. F. B. Mohamed Salleh et al., "Preliminary concept of adaptive urban airspace management for unmanned aircraft operations," in 2018 AIAA Information Systems-AIAA Infotech@ Aerospace, 2018, p. 2260.
- [32] H. Ushijima, "UTM project in Japan," in Proceedings of the Global UTM Conference, Montreal, QC, Canada, 2017, vol. 26.
- [33] J. M. Hoekstra, R. N. Van Gent, and R. C. Ruigrok, "Designing for safety: the 'free flight' air traffic management concept," Reliability Engineering & System Safety, vol. 75, no. 2, pp. 215-232, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00096-5](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00096-5).
- [34] X. Yang and P. Wei, "Autonomous on-demand free flight operations in urban air mobility using Monte Carlo tree search," in International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT), Barcelona, Spain, 2018, vol. 8.
- [35] EUROCONTROL, "UAS ATM Integration Operational Concept," 2018. [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/uas-atm-integration-operational-concept-v1.0-release%2020181128.pdf>
- [36] D.-S. Jang, C. A. Ippolito, S. Sankararaman, and V. Stepanyan, "Concepts of airspace structures and system analysis for uas traffic flows for urban areas," in AIAA Information Systems-AIAA Infotech@ Aerospace, 2017, p. 0449.

## ۷- تحقیقات بیشتر

۱. الگوهای بهینه کدهای ارتفاعی شهری منطبق بر الزامات کالبدی و عملکردی با هدف کاهش سطح آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها در برابر تهدیدات هوایی.
۲. تبیین الزامات طراحی و به‌کارگیری مصالح نوین برای کاهش سطح مقطع راداری و نشر حرارتی در ساختمان‌ها و زیرساخت‌های شهری در راستای ارتقا قابلیت پدافند غیرعامل در برابر تهدیدات هوایی.

## ۸- مراجع

- [1] A. Vidović, I. Štimac, T. Mihetec, and S. Patrlj, "Application of drones in urban areas," Transportation research procedia, vol. 81, pp. 84-97, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.11.010>.
- [2] PwC, "Drone Deliveries: Taking Retail and Logistics to New Heights," 2024. [Online]. Available: <https://cee.pwc.com/drone-powered-solutions/drone-deliveries-taking-retail-and-logistics-to-new-heights.html>
- [3] T. X. Hammes, "The Democratization of Airpower: The Insurgent and the Drone." War on the Rocks. <https://warontherocks.com/2016/10/the-democratization-of-airpower-the-insurgent-and-the-drone/> (accessed).
- [4] J. Łukasiewicz and A. Kobaszyńska-Twardowska, "Proposed method for building an anti-drone system for the protection of facilities important for state security," Security and Defence Quarterly, vol. 39, 2022, doi: <https://doi.org/10.35467/sdq/149268>.
- [5] A. Bitarafan, m. shahbazi, and f. habib, "Explaining the Indicators for Improving the Resilience of Residential Areas Against Man-Made Threats (Case Study: Evin Neighborhood)," Passive Defence, vol. 17, no. 1, pp. 103-122, 2026, doi: 10.47176/pd.2026.1562.
- [6] S. F. Lari, H. Beyti, and B. Shafaei, "Analysis of Design Components for Safe Residential Complexes with a Passive Defense Approach (A Case Study of Tabriz )," Passive Defence, vol. 17, no. 1, pp. 123-140, 2026, doi: 10.47176/pd.2026.1572.
- [7] U. D. o. Defense, "Unmanned aircraft systems roadmap 2005–2030," 2005.
- [8] S. O'Donnell, "A Not-So-Short History of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) ". [Online]. Available: <https://consortiq.com/uas-resources/short-history-unmanned-aerial-vehicles-uavs>
- [9] H. Sahami and A. Ramezani, "UAV Rout Optimization for Maximum Coverage in Images ,پدافند غیر عامل", vol. 9, no. 3, pp. 1-10, 2018. [Online]. Available: [https://pd.ihu.ac.ir/article\\_200757\\_4a467a964e6c6ebc0ec0c4cc8fc77ae1.pdf](https://pd.ihu.ac.ir/article_200757_4a467a964e6c6ebc0ec0c4cc8fc77ae1.pdf).
- [10] USAF, Command and Control of Joint Air Operations. The United States Air Force (USAF) Joint Publication 3-30, 2019.
- [11] G-7, "Missile Technology Control Regime Annex Handbook," 1987.
- [12] GAO, "Nonproliferation: Agencies could improve information sharing and end-use monitoring on unmanned aerial vehicle exports," United States Government Accountability Office, 2012.
- [13] H. Y. Grisaro, S. Turygan, and P. W. Sielicki, "Concrete slab damage and hazard from close-in detonation of weaponized commercial unmanned aerial vehicles," Journal of Structural Engineering, vol. 147, no. 11, p. 04021190, 2021, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0003158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003158).
- [14] K. Bondar, "Ukraine's Future Vision and Current Capabilities for Waging AI-Enabled Autonomous Warfare," CSIS Wadhvani AI Center, 2025.
- [15] M. K. Lima. "Munitions Modernization: The Family of Drone Munitions." army.mil.

- [49] L. Jackson, "A Look Inside the American Embassy in Baghdad," in The New York Times, ed, 2024.
- [50] A. Staalesen. "The drone war comes to Nornickel's company town in Kola Peninsula." <https://www.thebarentsobserver.com/news/the-drone-war-comes-to-nornickels-company-town-in-kola-peninsula/103450> (accessed october 9, 2025).
- [51] D. Zagore, "Murmansk steps up protection against drone attacks," in thebarentsobserver, ed, 2024
- [52] S. Vakulenko. "Have Ukrainian Drones Really Knocked Out 38% of Russia's Oil Refining Capacity?" Moscow Times. <https://www.themoscowtimes.com/2025/10/08/have-ukrainian-drones-really-knocked-out-38-of-russias-oil-refining-capacity-a90756> (accessed).
- [53] A. L. S. ApplicationCenter, AVIATION URBAN OPERATIONS. Air Land Sea Application Center, 2013.
- [54] Tehran-Municipality, "Detailed plan of Tehran," 2019 .
- [55] ALSA, MULTI-SERVICE TACTICS, TECHNIQUES, AND PROCEDURES FOR AVIATION URBAN OPERATIONS. US Air Force at US Air Force Center for Doctrine Development and Education, 2013.
- [56] Joint-Staff, JOINT LASER DESIGNATION PROCEDURES (J-LASER). 1991.
- [57] R. K. Nichols, H. C. Mumm, W. D. Lonstein, J. J. Ryan, C. Carter, and J.-P. Hood, Unmanned aircraft systems in the cyber domain. New Prairie Press, 2019.
- [58] FEMA, Reference manual to mitigate potential terrorist attacks against buildings. Government Printing Office, 2011.
- [59] Soraya. "Istade Dar Ghobar." Tv1.ir. <https://telewebion.com/program/0x125daac6> (accessed 12-12, 2025).
- [60] m. vanaei, "The home of the martyred nuclear scientist Fereydoun Abbasi," ed. Tehran: irna.ir, 2025.
- [61] SNN. "Removing debris from a residential building in Shahid Chamran town." Snn.ir. (accessed 14-6, 2025).
- [62] FEMA, Primer for design of commercial buildings to mitigate terrorist attacks (Risk management series FEMA. Federal Emergency Management Agency, Washington, DC). 2003.
- [63] Ahmadvand and Jafarnejad. "The effects of the Zionist regime's attack on the home of martyred scientist Dr. Tehranchi." ana.ir. (accessed 12-12, 2025).
- [64] RCC, LASER RANGE SAFETY. USA Range Commanders Council 1998.
- [65] LSSWG, RANGE LASER SAFETY. Department of Defense (DOD) Laser System Safety Working Group (LSSWG), 2011.
- [37] E. Sunil et al., "Metropolis: Relating airspace structure and capacity for extreme traffic densities," in ATM seminar 2015, 11th USA/EUROPE Air Traffic Management R&D Seminar, 2015 .
- [38] Z. Yang, "Food delivery by drone is just part of daily life in Shenzhen," MIT Technology Review, 2023.
- [39] X. He, L. Li, Y. Mo, Z. Sun, and S. J. Qin, "Air corridor planning for urban drone delivery: Complexity analysis and comparison via multi-commodity network flow and graph search," Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, vol. 193, p. 103859, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103859>.
- [40] Google\_Earth, "Tehran Map," ed: Google, 2025.
- [41] LockerArchitectural. "High Security Netting to Prevent Drone Access and Throw-Overs." <https://architecturalwiremesh.com/blog/anti-drone-security-netting/> (accessed).
- [42] Thinkdefence. "Counter Drone Nets." <https://www.thinkdefence.co.uk/2024/12/counter-drone-nets/> (accessed 202۵).
- [43] MO. "Russian Drones Burn Through Ukraine's Anti-Drone Nets." Министерство обороны. <https://voennoedelo.com/en/ampposts/id5893-russian-drones-burn-through-ukraine-s-anti-drone-nets> (accessed 29-11, 2025).
- [44] DefenseExpress. "Better Than Tires: russians Show New Anti-Drone Protection for Su-34 Bombers." [https://en.defence-ua.com/weapon\\_and\\_tech/better\\_than\\_tires\\_russians\\_show\\_new\\_anti\\_drone\\_protection\\_for\\_su\\_34\\_bombers-7900.html](https://en.defence-ua.com/weapon_and_tech/better_than_tires_russians_show_new_anti_drone_protection_for_su_34_bombers-7900.html) (accessed December 3, 2025).
- [45] N. Nikolaienko and I. Lovett, "Ukraine's Supply Runs Turn to Nightmares as Drones Menace Roads Far Beyond the Front," in wall street journal, ed, 2025.
- [46] DefenseExpress. "russians Stretch Anti-Drone Nets Near Bakhmut, and It Could Prove Effective." [https://en.defence-ua.com/news/russians\\_stretch\\_anti\\_drone\\_nets\\_near\\_bakhmut\\_and\\_it\\_could\\_prove\\_effective-8065.html](https://en.defence-ua.com/news/russians_stretch_anti_drone_nets_near_bakhmut_and_it_could_prove_effective-8065.html) (accessed December 6, 2025).
- [47] Meduza. "Russia's Belgorod covers kindergartens in anti-drone nets as children head back to school." <https://meduza.io/en/feature/2025/09/01/russia-s-belgorod-covers-kindergartens-in-anti-drone-nets-as-children-head-back-to-school> (accessed September 1, 2025).
- [48] D. Kandinskiy. "Oil Storage Tank Protected by Anti-Drone Netting." shutterstock. <https://www.shutterstock.com/image-photo/oil-storage-tank-protected-by-antidrone-2549216589> (accessed).