



Drönare med CBRNE-sensorer för räddningstjänst

En kunskapsöversikt

HÅKAN WINGFORS, ANDREAS FORSBERG,
LARS LANDSTRÖM

Håkan Wingfors, Andreas Forsberg, Lars
Landström

Drönare med CBRNE- sensorer för räddningstjänst

En kunskapsöversikt

Titel	Drönare med CBRNE-sensorer för räddningstjänst – En kunskapsöversikt
Title	Drones with CBRNE-sensors for First Responders- review
Rapportnr/Report no	FOI-R--5640--SE
Månad/Month	Augusti
Utgivningsår/Year	2024
Antal sidor/Pages	36
ISSN	1650-1942
Uppdragsgivare/Client	Myndigheten för samhällskydd och beredskap
Forskningsområde	CBRN-frågor
FoT-område	Inget FoT-område
Projektnr/Project no	B4105
Godkänd av/Approved by	Niklas Brännström
Ansvarig avdelning	CBRN-skydd och säkerhet

Detta verk är skyddat enligt lagen (1960:729) om upphovsrätt till litterära och konstnärliga verk, vilket bl.a. innebär att citering är tillåten i enlighet med vad som anges i 22 § i nämnd lag. För att använda verket på ett sätt som inte medges direkt av svensk lag krävs särskild överenskommelse.

This work is protected by the Swedish Act on Copyright in Literary and Artistic Works (1960:729). Citation is permitted in accordance with article 22 in said act. Any form of use that goes beyond what is permitted by Swedish copyright law, requires the written permission of FOI.

Sammanfattning

I den här rapporten sammanställs kunskap om teknik- och applikationsfronten för användandet av drönare med sensorer för CBRNE det vill säga kemiska, biologiska, radionukleära och explosiva ämnen och hot. Den primära målbilden är att erhålla en bättre lägesbild där sensordata för CBRNE är integrerad. Information har främst sökts i vetenskapliga databaser, men även i publikationer och tekniska rapporter från expertorgan, branschorganisationer och i viss mån från företag. Resultatet av sökningen visar att det idag finns tillgänglig sensorteknik för CBRNE som är anpassad för integrering och montering på drönare. För några av bokstäverna är tekniken mer mogen, särskilt för mätning av radioaktivitet (R), och studier genomförda i fältmiljö visar att teknikkombinationen drönare och specifika sensorer generellt har en stor potential. Studierna visar också att flygmönster och spaningsmetodik skiljer sig väsentligt åt beroende på typ av ämne, vilket får konsekvenser vid en tänkt insats. En slutsats är att det finns ett utvecklingsbehov av mer scenariobaserade fältförsök för att utvärdera framtida drönarkoncept och för att träna operativ drönarflygning vid CBRNE händelse. Det finns vidare ett behov av att utveckla programvaror och användargränssnitt för hantering av sensordata anpassat för personal inom räddningstjänst och responskedja. Det pågår intressant forskning inom sensorteknik, men även inom maskininlärning och autonomi för exempelvis optimering av flygrutter och introduktion av svärmar av drönare.

Nyckelord: Drönare, UAV, CBRNE, detektion, autonomi, sensorintegrering

Summary

In this report, knowledge is compiled on technologies and applications for the use of drones with integrated sensors for CBRNE, *i.e.* chemical, biological, radionuclear and explosive agents and threats. The primary objective is to increase situational awareness with integrated sensor data for CBRNE. Information has been gathered through scientific databases, reports from expert bodies, drone organizations and to some extent manufacturers. The results show that there are sensor technologies available for CBRNE that are suitable for integration and mounting on drones. For some areas, especially R, sensor technology is more mature. Studies carried out in field environments show that the combination of drones and CBRNE-sensors in general has great potential. However, they also show that flight patterns and suitable reconnaissance methodology differ significantly depending on the type of agent, which would have significant implications in real operations. Therefore, future studies should be directed towards field trials that are more realistic to highlight these challenges in detail. There is also a need to develop software and user interfaces for processing sensor data customized for first responders. On-going research show great potential for novel sensors but also within machine learning for *e.g.* optimization of flight routes and possible introduction of autonomous swarms of drones.

Keywords: Drones, UAV, CBRNE, detection, autonomy, sensor integration

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
2	Metod.....	8
3	UAV och drönare.....	9
4	Sensorer.....	10
4.1	Sensorer för C.....	10
4.1.1	Önskvärda egenskaper.....	10
4.1.2	Små universella sensorer	11
4.1.3	Små sensorer för kemiska stridsmedel	13
4.2	UAV-tillämpningar med C-sensorer.....	15
4.3	Sensorer för B.....	16
4.3.1	Små- och handburna mättekniker för partiklar med biologiskt ursprung	17
4.4	UAV-tillämpningar med B-sensorer	18
4.5	Sensorer för R(N)	18
4.5.1	Önskvärda egenskaper hos R-sensorer på UAV	19
4.5.2	Spektrometrar	19
4.5.3	Doshastighetsmätande instrument.....	20
4.5.4	Kombinerade γ - och neutronsensorer	21
4.6	UAV-tillämpningar med R-sensorer.....	21
4.7	Sensorer för E.....	22
4.7.1	Små och handburna mättekniker.....	23
4.8	UAV-tillämpningar för E	24
5	Mätning med drönare-användarperspektiv.....	25
6	Slutsatser och framtida forskningsbehov.....	26
7	Referenser.....	28

1 Inledning

CBRNE-ämnen är i dess bredaste tolkning alla farliga ämnen som kan orsaka skador på människor, djur, växter och egendom, men ofta menas ett mer specifikt urval av kemiska, biologiska, radiologiska, nukleära och explosiva ämnen. I Sveriges gemensamma CBRNE-strategi¹ beskrivs att CBRNE-händelser omfattar allt från naturliga händelser och olyckor till medveten antagonistisk spridning av CBRNE-ämnen. Själva händelsen behöver initialt inte vara spektakulär, men kan över tid ge ett stort utbredningsområde och/eller orsaka stora störningar på samhället. En ytterligare förväntad negativ påverkan är en försämrad försvarsvilja till följd av den oro och rädsla en CBRNE-händelse ger upphov till. Även om dessa händelser på förhand både är svåra att karaktärisera och beräkna dess konsekvenser av behöver verktyg utvecklas för att hantera dem.

Drönare eller små fjärrstyrda obemannade luftfarkoster (eng. UAS/V, unmanned aircraft systems/vehicles) är exempel på verktyg som fått ökad användning inom räddningstjänst, polis och andra "first responders", för en rad olika syften. Några av anledningarna som ofta lyfts fram till att dessa insatsorganisationer har nytta av drönare är

- snabbare responstid
- tillgång till en bättre överblicksbild
- ökad säkerhet
- bättre möjlighet att använda proportionerliga åtgärder samt
- dess låga pris och relativt okomplicerade användning.

Att på avstånd i en säker miljö manövrera en kameraförsedd drönare för att undersöka ett potentiellt farligt område är en eftertraktad förmåga som ger många fördelar. En bemannad helikopter flyger ur risksynpunkt normalt inte på höjder under 150 m. Detta oavsett om det är en händelse som innefattar skogsbrand, kriminalitet eller en olycka till havs med kemiska ämnen. Det kan också innebära svårförutsägbara risker för helikopterpersonal i samband med CBRNE-händelser. En drönares kinetiska energi vid en eventuell kollision är dessutom betydligt lägre än för en helikopter. Ofta är en god överblicksbild relaterad till flyghöjd och där är en kameraförsedd drönare kanske det idag mest lättillgängliga och lämpligaste verktyget.

Allt talar också för att en kameraförsedd drönare skulle vara ett önskvärt verktyg vid en CBRNE-händelse. I ett initialt skede kan insatspersonal stanna utanför ett uppenbart riskområde, erhålla en överblick och planera för riktade insatser. Detta kan fås utan att utsätta någon för risker, eller ödsla dyrbar tid på att upprätta saneringsbanor för person- och materialsanering. En särskild utmaning avseende CBRNE-händelser är dock att de flesta ämnena inte är synliga för det mänskliga ögat och detta gäller exempelvis strålning, samt de flesta gaser, men även små luftburna partiklar innehållandes smittfarliga organismer eller högttoxiska ämnen. Många av dem är dessutom helt luktlösa. Bomber och explosivämnen kan vara gömda eller nedgrävda i ett område vilket utgör ytterligare en risk. Detta innebär att en CBRNE-händelse inte alltid är uppenbart avgränsad i tid och rum på samma sätt som en synlig brand eller en industriolycka. Inom CBRNE-området har därför en rad olika detektionsinstrument, ofta handburna, utvecklats för att ge insatspersonal möjlighet indikera eller detektera deras förekomst. Det pågår nu både kunskaps- och metodutveckling för att integrera CBRNE-sensorer på fjärrstyrda plattformar. Men eftersom teknikintegrationen är relativt ny finns det ännu mycket få rapporter som beskriver dess användning vid autentiska CBRNE-incidenter. En initial målbild för drönarintegration hos räddningstjänst kan vara att skapa bättre möjligheter att upptäcka farliga områden. Detta kan följas av mål avseende bättre övervakning samt styrning och ledning av riskreducerande åtgärder.

Den här kunskapsöversikten har till syfte att sammanställa information om teknik- och tillämpningsfronten där CBRNE-sensorer har integrerats på UAV eller små fjärrstyrda plattformar. Ytterligare ett syfte är att identifiera kunskapsluckor som kan ligga till grund fortsatt forskning och teknikutveckling.

2 Metod

Den här kunskapsöversikten bygger på litteratursökningar och bevakning av publikationer och litteratursammanställningar i öppna databaser. De databaser som främst har använts är *Web of Science*, *Scopus* och *Google Scholar*. Syftet har primärt varit att söka studier som beskriver användning av olika CBRNE-sensorer integrerade på drönare. De sökord som använts är "drone", "UAV", "RPAS" kombinerat med sökord såsom, "ionizing radiation", "radiological", "gamma", "neutron", "TIC", "CWA", "blister", "nerve agent", "mustard gas", "biological", "bacteria", "virus", "bioaerosol", "explosives", "HME", "IED".

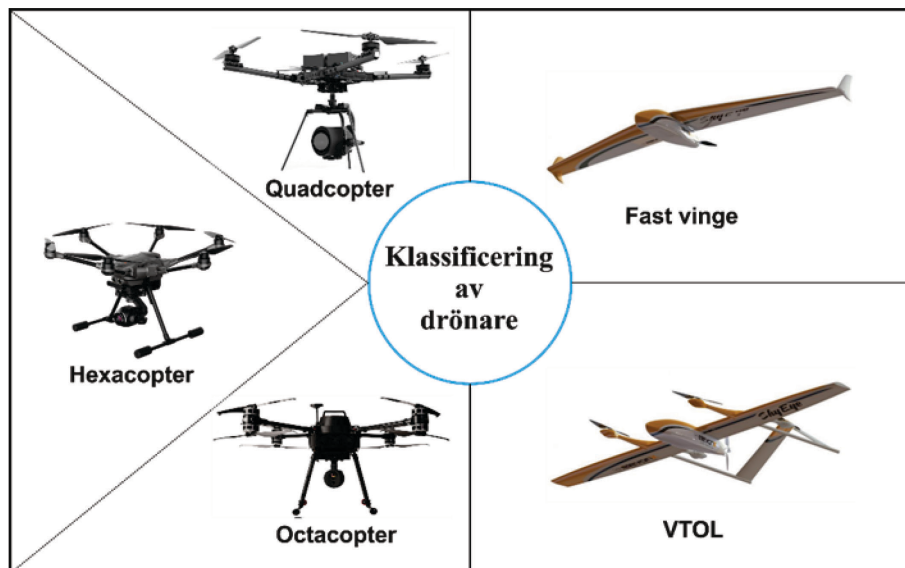
I viss mån har vi sökt öppen information från forskningsinstitut inom civil beredskap, räddningstjänst, samt information från nationellt och internationellt försvar. Inom EU-finansierad forskning har många nationsöverskridande samarbetsprojekt initierats och några källor har hittats där. I en del fall har vi använt information från olika företag som marknadsför produkter eller färdiga drönarsystem med integrerade sensorer. Några produkter och företag nämns vid namn men vi gör inte anspråk på en fullständig marknadsanalys och inte heller innebär nämndet en rekommendation om användning.

Den inledande ambitionen var att enbart inkludera studier och applikationer där sensorer med syfte att indikera förekomst av CBRNE-ämnen integrerats på drönare. Eftersom mycket få sådana studier hittades har en lite bredare definition av CBRNE-ämnen använts för att bättre kunna bedöma potentialen av sensorapplikationer. Därför har studier som innefattar användning av drönare och sensorer vid utsläpp av toxiska industrikemikalier, luftkvalité i urban miljö, vulkanutbrott, kärnkraftsolyckor, samt utsläpp från jordbrukssektorn också beaktats.

Det finns flera bra översiktsartiklar med generell inriktning på drönare, sensorintegrering och kamerateknik²⁻⁴, men också för övrig användning av drönare vid räddningstjänstarbete^{5,6}. Vi har valt att inte beskriva utvecklingen inom dessa teknik- eller applikationsområden i detalj här, men vi inser att en god översiktsbild måste integreras med bra kamerateknik (även till exempel vid mörker) vid alla typer av räddningsinsatser. Likaså behöver drönaren vara utrustad med en rad andra sensorer för navigering, höjdmätning och antikollisionssystem, och dessa sensorer bevakas inte heller i den här rapporten.

3 UAV och drönare

Här följer en mycket kort introduktion av drönarteknik lämpliga för mätuppdrag. Obemannade luftburna farkoster eller UAV (unmanned aerial vehicle) har fått många namn på grund av flera användningsområden, ”översatta förkortningar” eller discipliner. Andra namn som ofta förekommer är UAS (unmanned aerial system), RPAS (remotely piloted aircraft system) och drönare. Transportstyrelsen använder ordet drönare och har utfärdat regler och körkortskrav som gäller för flygning i Sverige⁶. Inom den *öppna kategorin* sker flygning med lägre risk. Detta innebär bland annat ett något enklare regelverk och detta gäller för drönare under 25 kg, flygning under 120 meter höjd, flygning inom synhåll och att övrig hänsyn tas till lokala flygrestriktioner. Det är alltid piloten som har ansvar för att flygningen sker säkert. För mer utförlig information om drönare, körkortskrav och regelverk hänvisas till transportstyrelsens hemsida (transportstyrelsen.se). För dessa mindre drönare finns det i princip tre typer av drönare och det är multirotor (fyra, sex eller åtta propellrar), vingförsedda, och hybrider vilka är vingförsedda drönare som klarar vertikal start och landning (VTOL), se figur 1 för några exempel på dessa. Skillnaderna ligger främst i hanterbarhet, flyghastighet, flygtid och lyftkapacitet. De allra vanligaste drönarna som används vid mätuppdrag är multirotor med modern batteridrift. Typiska flygtider för dessa är i dagsläget 20-30 minuter med sin nyttolast (sensorkapack) och hastigheter ligger runt 40 km/h⁷. Fördelen med multirotor är att de kan hovra i luften samtidigt som de samlar sensordata. Mer last och kallare temperaturer brukar resultera i kortare flygtider. Normal radoräckvidd för fjärrnavigation och signalöverföring beror på många faktorer, men i öppen terräng brukar en kilometer fungera bra för många kommersiella system. Storleken på drönaren är korrelerad till tyngden på nyttolasten, vilket behöver beaktas vid val av plattform. Den här kunskapsöversikten tar avstamp i att det är främst drönare under 25 kg som är aktuella för räddningstjänsten.



Figur 1. Exempel på drönare med multirotor, fast vinge, och hybrider med fast vinge med möjlighet för vertikal start och landning (VTOL). Bild från Wingfors mfl. 2023⁸.

4 Sensorer

Som nämnts ovan finns det en rad olika handburna och miniaturiserade sensortekniker som används för att upptäcka möjlig förekomst av CBRNE-ämnen. För en lyckad integration med en drönare behöver sensorn vara lätt, ha låg energiförbrukning och inte vara så skrymmande att den påverkar flygegenskaperna. Nu följer separata sektioner för varje bokstav i CBRNE, och de beskriver det nuvarande kunskapsläget avseende sensorteknik, egenskaper och applikationsfront.

4.1 Sensorer för kemiska ämnen (C)

All tillverkning, lagring och användning av kemiska stridsmedel (eng. CWA) är förbjuden enligt kemvapenkonventionen, och denna konvention har i stort sett alla världens länder ratificerat⁹. Trots detta finns misstanke om att vissa lager ännu inte har destruerats och det förekommer händelser där dessa används både i krig, vid terroraktioner eller kriminalitet¹⁰⁻¹². Kända vapensystem där kemiska stridsmedel integrerats som en verkansdel är främst för granater och robotar (missiler). De kan avfyras från mark eller flygplan och vid målet uppstår ett moln som dels består av ämnen i gasform och dels förekommer som luftburna partiklar eller vätskedroppar som kan deponera på marken¹³. Den primära effekten är ett högt skadeutfall för oskyddade personer som vistas i närområdet och den sekundära effekten är att området blir kontaminerat. Den sekundära effekten innebär också att molnet driver iväg och att en eventuell markbeläggning gör området obrukbart för en viss tid framöver. På grund av att kemiska stridsmedel har olika ångtryck och flyktighet kan proportionerna av de primära och sekundära effekterna variera. För ett högflyktigt ämne kommer det främst uppstå ett gasmoln och för ett lågflyktigt ämne kommer deponeringen på mark dominera. Vid vinterförhållanden förskjuts den här fördelningen mot sekundär effekt det vill säga att ämnen i högre grad faller till marken. En ytterligare befarad användning av kemiska stridsmedel är sabotage eller terrorhandling vid exempelvis ett gråzonsläge. Det finns därmed stora utmaningar för att mäta förekomst av dessa ofta luktlösa och toxiska ämnen. De flesta försvarsmakter har utvecklat metodik där sensorer och handburna indikeringsinstrument används för att upptäcka förekomst av kontaminerade atmosfärer och områden¹⁴, så att skyddsåtgärder kan vidtas. Några av dessa kan vara bättre anpassade att montera på en drönare på grund av låg vikt och låg strömförbrukning. Andra är mer lämpliga för att de kan upptäcka kemiska ämnen i låga halter, eller att de kan urskilja kemiska ämnen vid förekomst av störande ämnen. I följande avsnitt sammanställs information om de C-sensorer som har rapporterats att ha integrerats med drönare, med syfte att upptäcka, spåra eller kartlägga områden med kemiska agens. Huvudmålet är att fokusera på tillämpningar och studier där sensorer har integrerats med drönare för att detektera kemiska stridsmedel och similiämnen för dem. Vid behov tas även indikering av toxiska industrikemikalier (TIC, eng. toxic industrial chemicals) upp eftersom det ibland även inkluderas som hotämnen i konfliktsituationer¹⁵.

4.1.1 Önskvärda egenskaper

Eftersom attacker eller olyckor med kemiska ämnen inträffar väldigt sällan bör de sensorer och indikeringsinstrument som används kunna lagras och behålla sin prestanda under långa tider. De bör vidare vara lätta att starta, enkla att kalibrera och ge tydlig och begriplig information för användaren. De ska reagera på de kemiska ämnen de är avsedda för i relevanta och hälsoskadliga koncentrationsintervall. För flera kemiska stridsmedel kan detta innebära koncentrationer i mycket låga halter (1-100 ppb) och sensorerna ska därmed ha låg detektionsgräns (låg LOD, limit of detection). De ska inte larma i onödan, det vill säga ge larm när ämnet inte är närvarande (falskt positiv). Kemiska stridsmedel är kemiskt och fysikaliskt en relativt bred grupp av skadliga ämnen med olika ångtryck, kemisk struktur och sammansättning, vilket kan göra detta uppdrag komplicerat. Responstiden bör vara kort så att signal erhålls så tidigt som möjligt och signalen bör

också klinga av när koncentrationen sjunker. Detta tillsammans med en förutsägbar respons möjliggör övervakning av lokala skillnader av koncentrationsgradienter. De ska vidare fungera under flera olika miljöförhållanden, såsom vid olika temperaturer och luftfuktigheter. De ska även vara selektiva och inte ha korskänslighet och därmed ge signal vid förekomst av andra ämnen (falskt positiva). Det är givetvis även problematiskt om de inte larmar när ämnet är närvarande (falskt negativ).

För att möjliggöra integrering och montering på en flygande plattform bör mättekniken tåla vibrationer, ha låg energiförbrukning och inte heller vara så tung eller skrymmande så att flygegenskaperna förändras. I de allra flesta fall innebär detta att kvalitén på insamlat data från ett detektionsinstrument är sämre och mindre tillförlitlig än data från mätningar med referensmetoder utförda på laboratorier¹⁶. Med detta i åtanke är just mobiliteten och möjligheten till realtidsdata de absolut största fördelarna gentemot analys på laboratorium.

4.1.2 Små universella sensorer

I den här kategorin ryms sensorer som inte är specifika för kemiska stridsmedel, men de bör nämnas eftersom de kan ha en viss respons, eller korskänslighet, framförallt i högre koncentrationsintervall¹⁵. Ytterligare en anledning är att det i stor utsträckning är den här typen av sensorer som har monterats på drönare^{16, 17}. Universella små gassensorer används bland annat i industrimiljöer för att varna för läckage eller driftstörningar, och de är lätta, robusta och relativt billiga (kallas ibland "low cost sensors")¹⁸. I tabell 1 har ett urval av små sensorer för kemiska ämnen och luftburna partiklar sammanställts. De bygger på olika mättekniker. Amperometrisk sensorer, även benämnda elektrokemiska, bygger på att gasen oxideras eller reduceras vid en arbetselektrod varpå en strömförändring som är proportionerlig mot gaskoncentrationen uppstår. Med hjälp av filter, olika katalysatorer eller modifieringar, kan en hög selektivitet och känslighet uppnås för oorganiska gaser (O_2 , CO , SO_2 , NO , NO_2 , NH_3 , H_2S). En annan typ av gassensorer bygger på att syre binder och bildar anjoner på ytan av en upphettad (till exempel $400\text{ }^\circ\text{C}$) halvledande tunnfilm av metalloxid (MOX). När en främmande gas oxideras eller reduceras på den här ytan förändras resistensen hos materialet och detta registreras som en mätbar signal. Dessa kallas för MOS (metal organic semiconductor) eller MOX-sensorer och fungerar för en rad olika organiska och oorganiska gaser. Generellt är dock selektiviteten låg.

Icke-dispersiv infraröd detektion (eng. NDIR) bygger på att olika gaser absorberar ljus med olika våglängd och detta fungerar i princip för alla molekyler med ett dipolmoment (oorganiska och vissa flyktiga organiska gaser). Med hjälp av optiska filter kan specificiteten ökas. De kan dessutom tillverkas i mycket små format. En annan universell sensor baseras på att UV-ljus med en viss energi joniserar gasmolekyler till positivt laddade joner. Dessa joner detekteras som en ström som är proportionerlig mot koncentrationen och tekniken fungerar bra för många flyktiga organiska ämnen. Dessa kallas ofta för PID-detektorer (photo ionization detector), men på grund av hög korskänslighet kan den betraktas som en universell gassensor för organiska gaser.

Det är vanligt att dessa fyra mättekniker ofta sätts samman i så kallade flergasvarnare. Dessa används i industrimiljöer eller inom räddningstjänst för att upptäcka hälsofarliga eller explosiva atmosfärer. En annan typ av flergasvarnare utgör så kallade elektroniska näsor som bygger på att flera sensorer integrerats där mönsterigenkänning används för att identifiera förekomst av exempelvis illaluktande luftföroreningar^{19, 20}. Ett av de beskrivna problemen är en komplicerad kalibrering, men de har tillämpats för att med drönare studera exempelvis luftföroreningar^{21, 22}. En intressant mätteknik som skiljer sig från ovanstående är absorptionsmätning med hjälp av bakåtspridd laser²³. Tekniken är väl lämpad för upptäckt av metanutsläpp, och eftersom tekniken mäter ljus är den inte beroende av att drönaren befinner sig i gasmolnet men gasen måste finnas i siktlinjen.

För luftburna partiklar eller aerosoler finns det också små enkla optiska partikelräknare som bygger på mätning av ljusspridning. De allra minsta är i storleken av en tändsticksask och väger under 100 gram. Dessa mäter ofta aerosoler i området $0,3\text{ }\mu\text{m}$ till $10\text{ }\mu\text{m}$ och storleksfördelningen kan ofta utläsas i flera intervall²⁴.

Tabell 1. Samanställning av mättekniker för kemiska ämnen och partiklar som monterats på drönare (uppdaterad från Wingfors mfl 20238).

Sensortyp	Ämnen	LOD, mätområde	Vikt sensor	RPAS-anpassning	Referenser	Selektivitet
AGS, Amperometrisk gas sensor	Främst olika TIC	ppm, $\sim 10^3$	< 100 gram	Ja, konceptstudier	21, 25-28	Hög för vissa TICs
MOX, metalloxid sensor	Främst olika TIC	ppm, $\sim 10^2$	< 100 gram	Ja, konceptstudier	29-31	medel
NDIR, icke-dispersiv infraröd sensor	Främst olika TIC	ppm, $\sim 10^2$	< 100 gram	Ja, konceptstudier	32-34	medel
PID, Fotojonisations-detektor	Generell gassensor	ppb, $\sim 10^4$	< 100 gram	Ja, konceptstudier	17, 29, 35	låg
Optisk partikelräknare	antal partiklar, 0,3-20 μm	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ $\sim 0 - 10^6$ partiklar/s	~ 100 gram	Ja, konceptstudier	24, 36-40	medel
FPD, Flamfotometri	CWA + vissa TIC	låga ppb, $\sim 10^5$	~ 1.4 kg	Påbörjat,	15, 41, 42	Hög för CWA
IMS, Jonrörlighet	CWA + vissa TIC	låga ppb, $\sim 10^3$	0,5-1 kg	Påbörjat, konceptstudier	15, 42-46	Hög för CWA + vissa TICs

CWA=chemical warfare agent, TIC=toxic industrial chemicals, LOD=limit of detection, RPAS=remotely piloted aircraft system

4.1.3 Små sensorer för kemiska stridsmedel

Många kemiska stridsmedel, såsom nervgaserna, som togs fram efter första världskriget är egentligen lågflyktiga vätskor som enbart i mindre utsträckning befinner sig i gasform. Detta gör att de är svårare att detektera med luftindikering än rena gaser. För dessa ändamål har känslig detektion baserad på flamfotometri och jonrörlighet varit de två huvudsakliga och vanligaste mätteknikerna^{15, 42, 47}. Fördelen med detektionsinstrument som använder flamfotometri är att de är känsliga för svavel och fosforinnehållande föreningar i luftprover. Detta uppnås genom att luftens komponenter förbränns i en vätgasflamma så att exciterade ämnen med svavel och fosfor bildas (S_2^* och HPO^*). Dessa avger sedan ljus i karakteristiska våglängder vilka optiskt filtreras och sedan detekteras. Detta gör tekniken känslig och selektiv för fosfor och svavelinnehållande ämnen. Eftersom nästan alla nervgaser innehåller fosfor och några även innehåller även svavel är detta en mycket lämplig teknik för snabb detektion i fält. Känsligheten är relativt hög för CWA, men det går inte att utläsa vilket kemiskt stridsmedel det är, eller om luften innehåller andra svavelhaltiga (t.ex. H_2S) eller fosforinnehållande ämnen (t.ex. PH_3). Det finns egentligen bara en tillverkare av handburna flamfotometers (Proengin, Frankrike) och de har även möjlighet för samtidig detektion av arsenik- och kväveinnehållande kemiska stridsmedel med hjälp av andra optiska filter. Ytterligare har en uppgradering av en enhet för ytprovtagning och detektion av mer svårflyktiga ämnen genomförts. Det senaste är att det finns ett instrument anpassat för mobila enheter (UAV/UGV) som bland annat är mindre och lättare (AP4C+).

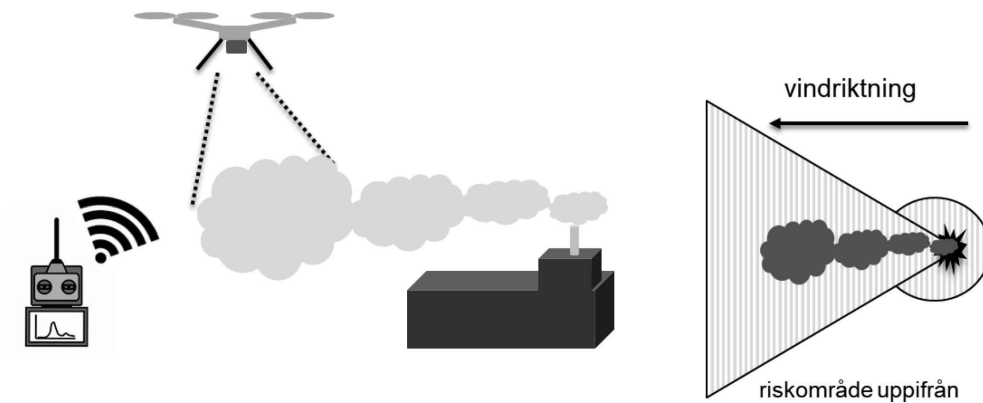
Jonrörlighetsspektroskopi (IMS, mobility spectroscopy) är den vanligaste mättekniken i handburna instrument för att detektera kemiska stridsmedel, och det finns många olika instrument tillgängliga⁴⁷. Luften sugas in i instrumentet där molekyler joniseras och dessa joner leds periodiskt in i en flyktkammare eller drifttub. Flyktkammaren har en elektrisk potential, och ofta ett motsatt luftflöde, så att de bildade jonerna får en viss drifttid innan de detekteras i en jonsamlare. Denna signal förstärks och omvandlas för att sedan

visualiseras i ett drifttidsspektrum (IMS-spektrum). Joner kan ha olika storlek, form och laddning vilket påverkar deras drifttid, vilket ger en viss selektivitet. I instrumentet finns ett bibliotek i vilket signaturen i spektrumet jämförs emot. Det finns många ämnen som kan analyseras med IMS och tekniken kan beskrivas som känslig (ppb), men också semiselektiv. En ökad grad av selektivitet kan uppnås genom att styra joniseringen och att kontrollera parametrar som styr drifttiden. Men det finns även en risk att andra ämnen i miljön ger upphov till signaler som liknar kemiska stridsmedel, så att instrumentet ger falska larm.

En annan sensortyp är där interaktioner mellan en adsorberad gas eller ånga på en yta (en piezoelektrisk kristall) studeras med hjälp av en inducerad akustisk ytvåg. Den frekvensförändring som sker när ytan förändras av ett gasupptag läses av och dessa sensorer kallas SAW (surface acoustic wave sensor)⁴⁸. Det finns flera exempel där fenomenet har applicerats för att mäta kemiska stridsmedel i gasform⁴⁹⁻⁵¹ och några få handburna instrument finns tillgängliga på marknaden⁵². En stor fördel med sensorerna är att de är små och lätta vilket kan möjliggöra montering på drönare. Det är dock centralt att ytan på kristallen har en selektivitet för ämnet som ska detekteras. Ingen studie har dock hittats där sensortekniken monterats på en drönare.

För ämnen som uteslutande befinner sig som fasta luftburna partiklar, eller är i vätskeform, finns det idag få instrument för direktindikering på avstånd. Här används företrädesvis detektionspapper med tillsatta färgreagens eller enzymer där deponerade droppar ger färgomslag⁵³. Tekniken lämpar sig för visuell avläsning och har inte tillämpats på drönare. Det finns handburna tekniker som använder Raman eller FTIR, men detta innebär att instrumentet behöver vara nära den kontaminerade ytan.

En sensortyp som potentiellt är intressant för drönarapplikationer och för att detektera kemiska stridsmedel är som bygger på halvledare (MOX eller MOS)^{54, 55}. Mätprincipen bygger ofta på att resistensen förändras när en gas adsorberas på halvledarens yta och dessa sensorer kan göras mycket små. De flesta har en halvledare bestående av oxider av tenn (SnO_2), zink (ZnO) eller volfram (WO_3), och deras sensoregenskaper kräver relativt höga temperaturer (200-500 °C). Sensorer med andra halvledarmaterial såsom kisel, organiska polymerer och kolnanomaterial fungerar i normala omgivningstemperaturer. För att möjliggöra detektion av låga halter av kemiska stridsmedel görs flera typer av modifieringar av materialen och mättekniken för att uppnå högre känslighet och selektivitet. Flera nyligen utgivna litteratursammanställningar har belyst fördelar och utmaningar för dessa intressanta mättekniker med avseende på CWA-detektion⁵⁵⁻⁵⁷. I dessa presenteras även ett flertal andra sensortekniker vilka baseras på elektrisk konduktivitet alternativt resistans, kapacitans eller andra förändringar orsakade av ett upptag av massa på en yta. Även biosensorer kan vara intressanta när interaktionen mellan kemiska stridsmedel och ytor belagda med enzymer eller antikroppar studeras⁵⁸. För dessa sensortyper är det selektiva upptaget av kemiska stridsmedel på en yta den stora utmaningen. Även om känsligheten för ett visst ämne kan förbättras kan det vara svårt att undvika att sensorn inte samtidigt reagerar på andra ämnen. För biosensorer finns det utmaningar avseende stabilitet för ytorna, samt sämre tillämplighet för detektion av gasformiga ämnen.



Figur 2. Schematisk bild över hur en drönare kan användas för att karaktärisera utsläpp från en punktkälla. Till höger i bilden visas ett exempel på ett riskområde.

4.2 UAV-tillämpningar med C-sensorer

Ett sätt att dela in olika typer av potentiella mätuppdrag är att karaktärisera dem utifrån källans egenskaper. En kontinuerlig punktkälla med en viss källstyrka kommer exempelvis ge en plym när det blåser, där koncentrationen sjunker med avstånd och riktning. Typiska och initiala riskområden får då ofta formen av en triangulär sektor. I figur 2 ges en schematisk bild över hur en drönare övervakar utsläpp från en kontinuerlig punktkälla och hur ett eventuellt riskområde kan ritas upp sett ovanifrån. Vid vindstilla kan koncentrationen byggas upp i fler riktningar och riskområdet blir mer svårbedömt. Ett förorenat eller belagt område kommer att avge flyktiga ämnen i ett mer diffust mönster då källan utgör en area. En ytterligare typ av källa är utsläpp från en väg, vilket ibland kallas linjekälla. En rekognosering för att mäta ett riskområde utifrån ovanstående källor kommer att kräva olika flygmönster.

Det finns flera fördelar att mäta förekomst av olika ämnen i luft med hjälp av sensorförsedda drönare. Jämfört med markbunden mätning erhålls en ökad spatial och temporal upplösning, där man snabbt eller i realtid kan kartlägga koncentrationsgradienter i ett område. Man kan också få koncentrationsprofiler i både sid- och höjdded, vilket en studie visade när partikelhalter övervakades vid en motorväg⁵⁹. Det finns flera exempel där mätning har utförts i stadsmiljö, med syfte att övervaka och karaktärisera luftföroreningar⁶⁰⁻⁶⁴. I dessa studier har både tids- och rumsupplöst information med framgång kunnat korreleras med större och mindre utsläppskällor, såsom kolkraftverk, mindre industrier och trafik. Gemensamt i dessa studier är att drönare av modelltypen multirotor och enklare gas- och partikelräknare har använts. Gemensamt är också att utsläppskällornas huvudsakliga position har varit känd oavsett om de varit skorstenar, industriområden eller vägsträckor. Vid en olycka eller ett avsiktligt utsläpp kan räddningsstyrkan inte på samma sätt förlita sig på att den informationen finns. Vid en mer förutsättningslös sökning av källor kan mätning baserad på bakåtspridd laser alternativt passiv IR ge fördelar då de inte är beroende av att drönaren finns i utsläppsområdet^{23, 65, 66}. Detta fungerar väl för övervakning av metanutsläpp^{23, 65}. Känsligheten av dessa optiska system är troligtvis inte tillräcklig för mätning av relevanta halter av CWA med drönare⁶⁷.

Vid övervakning av områden med mer diffusa källor har en del mätningar gjorts med drönare över jordbruksfastigheter och avfallsanläggningar, för att lokalisera källor för illaluktande ämnen (främst ammoniak, svavelväte, nitrösa gaser)^{20-22, 68}. För detta syfte har en mer förutsättningslös mätning med "elektroniska näsor" kunnat tillämpas. Även här är användning av multirotordrönare vanligast, då sensorerna har relativt långa responstider (~30 sekunder), med resultatet att antalet mätningar per flygning blir begränsat.

Det finns idag ett tiotal olika kommersiella lösningar för drönarövervakning av främst luftföroreningar¹⁶. Flera av studierna som nämnts ovan har däremot inneburit någon form av egenutvecklad sensorintegrering.

Ett av de problem som tidigt identifierades var det faktum att drönarens propellrar skapar en nedåtriktad luftström (downwash), vilken kan försvåra detektion med en monterad sensor som suger in luft^{46, 69-73}. Det är svårt att utifrån publicerade artiklar utröna om det råder en konsensus om den här effekten, men problemet verkar oftare vara observerat vid mätning i närheten av punktkällor. Olika förslag till lösningar har presenterats där sensorn monteras på ovansidan av drönaren eller att luft sugas in via ett rör eller en hängande slang. På detta sätt eftersträvas det att samla in luft från turbulensfria områden. Andra uppenbara problem är svårigheten att genomföra mätning under olika väderförhållanden och i komplexa miljöer (t. ex. bebyggelse, skog) där vindförhållanden är svårförutsägbara.

Det finns också flera utmaningar med att genomföra mätning eller övervakning med hjälp av en fjärrstyrd sensor. Förutom att piloten (fjärrpilot) ska ha uppsikt och kontroll över omgivningen (miljö, flygsäkerhet, batterinivåer, kommunikation etc.) ska sensordata i förhållande till position samtidigt övervakas. Här finns det pågående forskning inom både autonomi och maskininlärning, för att underlätta flygning och övervakning^{23, 74, 75}. Detta skulle också på sikt kunna innefatta användning av svärmar av drönare med mätutrustning, men vi har inte hittat något kommersiellt tillgängligt system.

Vi har inte hittat någon färdig drönarlösning för att specifikt mäta kemiska stridsmedel, men det finns IMS-sensorer där fjärrkommunikationen redan är löst, vilket möjliggör en plattformsoberoende montering (exempelvis ChemProX, Bertin-Environics). Det finns några få studier som direkt syftar till att mäta utsläpp av kemiska stridsmedel eller deras simili med hjälp av drönare^{29, 46, 76-78}. Många av de tidigare arbetena beskriver koncept där en viss typ av sensor, eller en viss konfiguration av sensorer och drönare beskrivs. Allers med kolleger⁴⁶ har däremot ett upplägg där olika mätstrategier jämförs med en IMS monterad på en multirotordrönare. Instrumentet är mycket känsligt och har detektionsgränser kring 100 ppt (0,1 ppb) och har snabba responstider (< fem sekunder) för många kemiska stridsmedel. Först testade de hovring nära ett kontinuerligt utsläpp av similiämne i gasform, jämfört med sakta genomflygning. IMS-sensorn svarade bra vid hovring i plymen (vind kring 1 m/s) men upprepade försök med genomflygning gav ingen respons, vilket förklarades med effekten av downwash och att källstyrkan var för svag. När en puls av ämnet släpptes ut (200 ml) i både gas- och vätskeform, simulerande en explosion, undersöktes detektorsvaret ca 70 meter därifrån och på 10 meters höjd. Vid tre av sex experiment fick man en positiv respons och de drog slutsatsen att vindförhållanden och utspädning hade en stor inverkan. De testade också en simulerad markbeläggning där en öppen behållare med similiämne placerades. Här visades det sig också att effekten av propellrarna försvårade detektionen och det var först när drönaren landade och slog av propellrarna som tydliga signaler erhöles. Trots vissa begränsningar i de mängder som användes i studien visade försöken både på utmaningar och möjligheter med teknikcombinationen. De drog slutsatsen att småskaliga utsläpp kombinerat med stora vindvariationer kommer vara utmanande, även om en mycket känslig mätteknik används⁴⁶. För att utveckla fungerande mätkoncept kommer fler liknande och mer storskaliga fältförsök vara nödvändiga i framtiden. Ett sätt kan vara att med similiämnen sätta upp försök som liknar tidigare beskrivna C-typfall för räddningstjänst under höjd beredskap⁷⁹.

4.3 Sensorer för biologiska ämnen (B)

Användning av biologiska vapen är förbjuden enligt konventionen mot biologiska vapen (FN) och enligt internationella krigslagar. Det fanns mer eller mindre kända B-vapenprogram av stormakter efter andra världskriget, men vad man vet har dessa aldrig använts. Japan spred dock kolera och tyfus i vattenbrunnar i Kina under andra världskriget⁸⁰. I övrigt är den huvudsakliga tänkta spridningsmetoden av B-vapen i form av en bioaerosol¹³. Några möjliga biologiska stridsmedel är de patogener som orsakar mjältbrand, tularemi, smittkoppor och pest^{81, 82}. En stor principiell skillnad mellan kemiska, nukleära och biologiska stridsmedel är att för den senare är effekten oftast fördröjd, med en inkubationstid innan sjukdomssymtom utvecklas. Detta gör det svårare att koppla smittkällan till en möjlig attack. Ett B-vapen, till skillnad från ett C-vapen, kan

vara självförstärkande på grund av levande organismer. Därav är sjukdomar orsakade av B inte koncentrationsberoende till samma grad som exponeringen för kemiska ämnen. Det vanligaste sättet att upptäcka (detektera) sjukdom orsakat av biologiskt ursprung är därför oftast först efter att personer har insjuknat. Vanliga skyddsåtgärder är isolering och smittspårning följt av riktad medicinsk behandling. För vissa sjukdomar finns det dessutom effektiva vaccin som vid en hög vaccinationsgrad i en befolkning kraftigt reducerar det biologiska hotet från sjukdomen.

En annan skillnad är att det inte finns specifika detektionsmetoder för B-stridsmedel i realtid. För att identifiera ett B-stridsmedel krävs ofta provtagning följt av antingen inspektion av odlade kolonier i mikroskop, analys med antigen/antikroppar eller med PCR (polymeraskedjereaktion), där både känslighet och specificitet är bättre. Den mest specifika metoden är en total sekvensering av det genetiska materialet, vilket tar längre tid⁸³. Det finns idag ingen möjlighet att snabbt eller i realtid bestämma identitet, levnadskraft (viabilitet) eller smittsamhet av luftburna smittämnen, trots ett omfattande forsknings- och utvecklingsarbete⁸⁴. En relativt nylig översiktsartikel av Šantl-Temkiv med flera (2020)⁸⁵ beskriver många av ovanstående utmaningar vid mätning av bioaerosoler i utomhusmiljö. De B-detektionsmetoder som idag marknadsförs som snabba, bygger på att påvisa luftburna partiklar med biologiskt innehåll och inte otvetydigt identifiering av en sjukdomsframkallande organism. De klarar inte av att skilja naturliga B-aerosoler från "onaturliga" men kan upptäcka variationer i halter över tid. Några av dessa metoder har utvecklats med ambitionen att användas i fältmiljö för att varna om möjliga luftburna B-hot och de beskrivs mer utförligt nedan.

4.3.1 Små- och handburna mättekniker för partiklar med biologiskt ursprung

När biologiska partiklar belyses med vissa våglängder, ofta från en laser, induceras fluorescens från aminosyror och enzymer i en B-aerosol. Genom att ett instrument mäter denna fluorescens fås en respons som motsvarar koncentrationen av partiklar med biologiskt innehåll^{81, 84}. Kwasny och kolleger⁸¹ beskriver ett tiotal fältpassade instrument för övervakning av bioaerosoler, som använder laser för att inducera fluorescens. Ingen av dessa är tillräckligt liten eller lätt för att kunna monteras på en normal drönare, utan är främst anpassade för att övervaka aerosolnivåer under längre tidsperioder på en plats.

En annan teknik, med viss selektivitet för aerosoler med biologiskt ursprung, är atomemission. I dessa instrument exciteras ämnen i bioaerosolen och utsänt ljus från några utvalda grundämnen såsom natrium, kalium och kalcium registreras. Biologiska aerosoler har andra kvoter av dessa grundämnen än aerosoler av till exempel mineralogiskt ursprung⁸⁶. Även här är instrumenten tunga och mer lämpade för stationär övervakning.

Den vanligaste strategin med ovanstående instrument är att den kontinuerliga realtidsövervakningen kombineras med en periodisk provtagning och analys. På detta sätt byggs platsspecifik kunskap upp om normala variationer av både nivåer och sammansättning av biologiska organismer. Baserat på den här variationen kan regler eller gränser sättas upp när avvikelser borde ge larm eller motsvara en nivå då provtagning och analys ska initieras. Även en optisk partikelräknare, som beskrivits ovan, har också potential att användas för att upptäcka avvikelser i partikelnivåer (se små sensorer 4.1.2)³⁹.

Det finns däremot ett företag (Teledyne FLIR) som har utvecklat ett fluorescensbaserat detektionsinstrument anpassat för montering på drönare. Sensorn väger under 1,5 kg och kan samtidigt samla in luftprover som kan analyseras när den har landat. Vi har inte hittat studier som visar dess prestanda i fältmiljö, men den har å andra sidan relativt nyligt introducerats på marknaden.

Gemensamt för ovanstående realtidssensorer är att risken för falskt positiva är hög, då både pollen, svampsporer men även döda och ofarliga bakterier förekommer normalt i luft.

Därför kommer förmågan att samla in B-aerosoler för efterföljande analys att vara en eftersträfvansvärd egenskap för drönarapplikationer.

4.4 UAV-tillämpningar med B-sensorer

Intresset för analys av B-aerosoler drivs delvis inom området miljöövervakning för att exempelvis studera spridning av växtsjukdomar eller biologiska aerosoler ovanför vattentäkter⁸⁷⁻⁸⁹. För att upptäcka ett drivande moln av biologiska aerosoler med hjälp av drönare är studierna färre. Av de försök som gjorts kan ett arbete från 1999 nämnas där Anderson med kolleger⁹⁰ konstruerade en sensor bestående av en fluorimeter och en partikelprovtagare. Den här monterades på en vingförsedd drönare (~65 km/h) och de genomförde fältförsök där en ofarlig bioaerosol (*Bacillus globigii*) spreds i fältmiljö. Efter flera flygförsök med varierande vindförhållanden lyckades de till slut flyga genom plymen och detektera bioaerosolen. Ett liknande utvecklingsarbete utfördes för en vingförsedd drönare med inriktning för provtagning av sporer⁹¹. Sporererna impakterades på en roterande tejpyta som kan analyseras med mikroskopi. Med kontroll av hastigheten på den rörliga tejpens och med kunskap om flygrutten kunde platsen geografiskt lokaliseras i efterhand. Det finns även andra arbeten som varit mer fokuserade på provtagning av bioaerosoler med drönare, än specifikt detektion med drönare⁹²⁻⁹⁵.

4.5 Sensorer för radioaktiva ämnen, R(N)

Det här kapitlet ger en översikt av strålningsdetektorer och applikationer med fokus på drönare som sensorbärare. "Sensor" och "detektor" används synonymt och med "strålning" avses joniserande strålning (R). För detektion av nukleära händelser (N) finns ytterligare detektionstekniker som inte baseras på strålningsdetektion såsom infraljud, seismologi, elektromagnetiska pulser etc. Dessa detektionstekniker beaktas inte i den här kunskapsöversikten.

Energien hos joniserande strålning är så hög att elektroner i atomer kan slås ut så att joner bildas. Detta är skadligt om det inträffar i biologisk vävnad och dess celler. Några olika strålslag som påträffas vid radioaktivt sönderfall och nukleära reaktioner är alfa- (α), beta- (β), neutron- och fotonstrålning. I fotonstrålning ingår både gamma- (γ) och karaktäristisk röntgenstrålning. α - och β -strålning har kort räckvidd i luft och medför i generella termer inte något stråldosbidrag som extern (utanför kroppen) strålkälla, för beklädda personer. Däremot kan de vid inandning och oralt intag ge betydande stråldoser. För att direkt detektera α - och β -strålning i miljön behöver en mätning ske nära radionukliderna. Vanligt är även filterprovtagning av kontaminerad luft, och provtagning av mark, vatten eller material med påföljande analys i laboratorium. Med anledning av detta finns provtagningsmässiga utmaningar gällande detektion av α - och β -strålning med flygande plattformar. Andra angreppssätt för att mäta α -strålning indirekt har utvärderats, exempelvis genom att nyttja radioluminesensen av α -emitterande partiklar i luft och undersöka den ultraviolette ljussignal (UV-C) som bildas^{96,97}. Känsligheten hos den här detektionstekniken är dock låg, och verkar med nuvarande teknik och kunskapsnivå kräva mycket höga markbeläggningar (tioalet gigabequerel (GBq) per kvadratmeter).

γ - och neutronstrålning saknar båda laddning och interagerar därför inte elektromagnetiskt med materia, och har därmed mycket längre räckvidder än α - och β -strålning. γ - och neutronstrålning står därför för merparten av den totala externa stråldosen för exponerade personer, framförallt då större områden är kontaminerade. Med anledning av dess räckvidd kan γ - och neutronstrålning också detekteras på stora avstånd från sin ursprungsplats, det vill säga den radioaktiva partikeln eller den nukleära reaktionen. Förutsättningarna för effektiva detektionsmetoder av radioaktiva ämnen med sensorer monterade på UAV är därför mycket goda. När det gäller radioaktivitet i omgivningen, som en konsekvens av en terrorhandling eller ett nedfall från en nukleär olycka är neutronstrålning av ett lägre intresse, framförallt eftersom förekomsten av γ -emitterande radionuklider i bägge fallen är mycket större.

Mätning av γ - och neutronstrålning kan göras med flera olika detektortekniker, med eller utan spektrometrisk information. Den information som beskrivs nedan berör främst detektion av γ -strålning.

4.5.1 Önskvärda egenskaper hos R-sensorer på UAV

En drönarplattform som bärare av sensorer för radioaktiva ämnen ger möjligheter till ett högre rekognoseringstempo, som tidigare inte varit möjligt för svåråtkomliga miljöer. Dessutom ges möjligheten att verka i ett höjdområde ovan mark som ligger både i och mellan arbetsområdet för bemannade flygfarkoster och markgående system. Det är dock viktigt att, som i alla mätuppdrag, välja rätt typ av sensor för uppdraget. Vissa sensorer har förmåga att klara en större mängd olika uppdrag än andra. En drönare sätter vissa yttre ramar för detektorsystemets vikt, storlek och energiförbrukning, som är snävare än för andra plattformar, exempelvis markgående fordon.

Det är viktigt att de aktörer som bevakar drönare som en sensorplattform för mätning av radioaktiv strålning funderar på i vilka fall man vill och kan använda dessa, och vilken information som är *tillräcklig* att ta reda på. Dessa fall är styrande för valet av sensortyp. Lowdon med flera ⁹⁸gjorde en jämförelse av olika detektorer för drönarapplikationer. Studien är dock inte uttömmande gällande vare sig typfall eller omfattning av olika detektortyper. Kumar med flera ⁹⁹ presenterade ett flertal olika detektortyper som är intressanta för drönare och drog slutsatsen att utvecklingen är aktiv gällande detektorer. Med utgångspunkt från resonemangen som getts går det ändå att lista vissa önskvärda krav som är generellt gällande för sensorer för radioaktiva ämnen då dessa ska bäras av en drönare. Alla dessa kan dock sällan uppfyllas av en enda detektortyp och en kompromiss mellan parametrarna bör då göras:

- känslighet som täcker in eller är anpassningsbar efter ett brett doshastighetsområde
- snabb respons i detektorsignal för att ge en bra temporal upplösning
- spektrometrisk förmåga
- ett arbetsområde som täcker ett stort omgivande temperaturspann.

4.5.2 Spektrometrar

En spektrometer har potential att ge information som gör att en radionuklid eller en uppsättning radionuklider kan identifieras. Eftersom olika radionuklider skiljer sig markant åt både vad gäller utsänd strålning och sönderfallstid, kan den spektrometriska informationen ibland vara viktig. Två vanliga typer av γ -spektrometrar är scintillationsspektrometrar och halvledarspektrometrar. Generellt sett har halvledarspektrometrar bättre upplösning än scintillationsspektrometrar. En spektrometer med bra upplösning är alltid bättre när det gäller identifiering och kvantifiering av radionuklider, framförallt om blandningen av radionuklider medför ett komplext energispektrum. Den upplösning som är tillräcklig är dock beroende av det specifika fallet. Ibland kan en natriumjodid-spektrometer (NaI-spektrometer), som är en oorganisk scintillationsspektrometer med en upplösning typiskt kring 7 % för ¹³⁷Cs, vara god nog för uppgiften. Andra exempel på oorganiska scintillationsspektrometrar är: LaBr₃(Ce), BaF₂, BGO (Bi₄Ge₃O₁₂), CsI(Tl), CLLBC (Cs₂LiLa(Br,Cl)₆:Ce) och CLYC (Cs₂LiYCl₆:Ce). Det finns fysikaliska begränsningar med organiska scintillationsmaterial för spektrometri. Användningsområdet för dessa är istället inom doshastighetsmätningar (se nedan 4.5.3).

Den teknik som benämns som *högupplöst* är kylda, högre germanium-detektorer (High Purity Germanium, HPGe), men forskningsfältet är aktivt gällande konkurrenskraftiga utmanare¹⁰⁰. En sådan är exempelvis CdZnTe-detektorn (Cadmium-Zinc-Tellurid) som kunnat uppvisa upplösning bättre än 1 % trots att de arbetar i normala omgivningstemperaturer¹⁰¹. En HPGe-detektors upplösning är dock fortfarande i särklass (kring 0,2 % upplösning) men utvecklingen på området med rumstemperatur-spektrometrar är spännande att följa, bland annat med tanke på drönarapplikationer.

Integration av mycket små (1 cm^3) CdZnTe-spektrometrar har gjorts på drönare^{102, 103}. Mätdata från en spektrometer kan alltid konverteras till doshastighet för en enklare tolkning för användaren¹⁰⁴⁻¹⁰⁷ och följande avsnitt behandlar instrument för detta.

4.5.3 Doshastighetsmätande instrument

Om uppgiften exempelvis är att undersöka en nivå av aktuell miljödosekvivalent på en olycksplats är istället en doshastighetsmätare (s.k. intensimeter, enhet mSv/h) tillräcklig. En doshastighetsmätare kan vara baserad på olika detektortyper. Vanligt är Geiger-räknare, som är en tålig detektortyp, och då ofta i en konfiguration som innehåller två eller fler olika storlekar av Geiger-Müller-rör (GM-rör) som inbördes hanterar olika nivåer av doshastighet. En nackdel med GM-rör är att de har en, relativt sett andra detektortyper, lång inbyggd dödtid (typiskt $50\text{--}100 \mu\text{s}$)¹⁰⁸ och hanterar därmed inte höga räknehastigheter (pulser/sekund). I en Geiger-räknare kan därför tillhörande elektronik och algoritmer användas för att förbättra hanteringen av höga räknehastigheter¹⁰⁹. Handburna Geiger-räknare behöver ofta en signal- och databehandlingsalgoritm som presenterar medelvärden över ett antal sekunder, typiskt mellan 2.5 till 40 sekunder¹, för att nå ett bra signal-till-brus förhållande. När det gäller UAV-applikationer är det rimligt med krav på snabbare responstid, gärna en sekunds upplösning eller bättre. Långa responstider medför svårigheter att rekognosera i högre flyghastigheter. Det finns teknik för att markant öka en Geiger-räknares förmåga att klara höga räknehastigheter¹¹⁰. Arbeten har gjorts som visar att det går att öka en Geiger-räknares förmåga till att hantera räknehastigheter uppemot 2×10^5 pulser per sekund med hjälp av *active quenching*¹¹¹. Även applikationer där elektronegativ gas tillförts har visat sig minska dödtiden hos ett GM-rör¹¹². UAV-applikationer är möjligen ett område som kan inspirera till fortsatt utveckling kring detta, dock i stor utmaning av andra detektortyper. Geiger-räknaren är alltså ett instrument vars teknik inte är färdigutvecklad trots att principen funnits i över 100 år.

Scintillationsdetektorer kan också användas för doshastighetsmätning. Både organiska och oorganiska scintillationsmaterial kan användas. Geelen med flera¹¹³ har utvärderat en plastscintillator avsedd för stationära mätningar för UAV-applikationer. Arbetet visade tydligt effekten av breddning av mätsignalen och risker med att använda en detektor på ett annat sätt än den tillverkaren från början avsåg (i detta fall mobila mätningar med stora variationer i mätsignal över tid). Utvecklingen gällande scintillatorer är relevant att följa framgent, då nya material har potential att kunna göra dessa än mer formbara, bättre och billigare. Ett sådant material är polyetylen-naftalat (PEN), en polyester som uppvisar goda scintillationsegenskaper utan inblandning av fluorescerande material¹¹⁴.

En av de eftersökta egenskaperna hos en scintillationsdetektor är en kort scintillationspuls, typiskt några få nanosekunder, som tillsammans med en bra fotomultiplikator möjliggör en god linjäritet avseende registrerade pulser även vid höga räknehastigheter i detektorn. Detta innebär sin tur att en signal med låga osäkerheter kan utläsas på en kort integrationstid. För UAV-applikationer kan det översättas till en möjlighet för snabba flyghastigheter med minimal breddning av signalen. Dock är algoritmerna i instrumenten också gränssättande för detta, varför det kan vara problematiskt att rakt av integrera instrument avsedda för stationär mätning till system för mobil mätning.

Känsligheten hos samtliga detektortyper är justerbar genom att justera dess storlek. Detta innebär att en större sensor ofta har högre känslighet. Här behöver räddningstjänsten välja detektor utifrån sitt behov.

¹ Baserat på erfarenheter hämtat från några system på marknaden.

4.5.4 Kombinerade γ - och neutronsensorer

Sensorer för γ - och neutronstrålning är ofta av olika typer. LiBaF₃, CLYC och CLLBC² är dock exempel på detektorer med möjlighet till diskriminering av γ - och neutronstrålning¹¹⁵⁻¹¹⁷. Detta görs genom att särskilja utseendet av pulser genererade från olika stråltyper. Detektortypen har ingen etablerad benämning, men vanligt är att de kallas *dual mode scintillators*. Användningsområdena för diskrimineringsmöjligheten mellan γ - och neutronstrålning är mest fokuserade på icke-spridning och detektion av anrikat nukleärt material, då dessa material emitterar både γ - och neutronstrålning.

CLLBC har attraktiva egenskaper för UAV-applikationer även om det endast handlar om γ -detektion.

4.6 UAV-tillämpningar med R-sensorer

Åtskilliga exempel på tillämpningar av UAV med R-sensorer finns. Gong med flera¹¹⁸ presenterade en relativt billig sensorlösning bestående av ett GM-rör och NaI-detektor för lokalisering av strålkällor. Den monterades på en multirotordrönare och genomförde ett förutbestämt flygmönster i ett område där en ¹³¹I-källa ($3,7 \times 10^7$ Bq) var placerad. Med hjälp av en utvecklad sökalgoritm kunde positionen för källan sedan bestämmas med relativt god överensstämmelse. En annan studie fokuserade på att lokalisera nedgrävt kontaminerat material efter Tjernobylyolyckan (1986)¹¹⁹. Här användes en liknande detektorlösning (NaI-detektor) och drönare. Med hjälp av kompletterande mätning med multispektral kamera på en VTOL-drönare kunde tidigare okända nedgrävningsplatser lokaliseras. Implementeringar med ett flertal olika detektortyper har testats på såväl multirotordrönare och vingförsedda VTOL-drönare^{120, 121}. Utveckling kring optimeringsalgoritmer för radiologisk kartläggning via grupper av flygande drönare kan förväntas de kommande åren.

Vid en kärnkraftsolycka med radioaktiva utsläpp sprids ofta isotoperna ¹³⁴Cs och ¹³⁷Cs i närområdet och de avger beta och gammastrålning. Tillämpningar kring UAV med R-sensorer tog fart i större skala i efterdyningarna från tsunamin över Fukushima Daiichi kärnkraftverk (FDNPP), som orsakade en reaktorhärdsmläta med påföljande radioaktiva utsläpp över Japan^{122, 123}. Stora områden behövde då undersökas och obemannade flygande system ökades gradvis som en av rekognoseringsmetoderna¹²⁴. Dessa har potential att uppnå en högre spatial upplösning av dosnivåer än bemannade helikoptrar samt högre tempo i förhållande till person- och bilburna metoder. Ytterligare en uppenbar säregenskap är tillgänglighet till områden som är farliga, förbjudna eller komplicerade att rekognosera från exempelvis vanliga helikoptrar eller från marken. JAEA (Japan Atomic Energy Agency) använde obemannade helikoptrar för att undersöka områden upp till en radie om ungefär åtta kilometer omkring det drabbade kärnkraftverket¹²⁵. Flygningarna gjordes på 80 meters höjd i parallella linjer och med en hastighet om 8 m/s. Genom detta kunde fyra tidigare icke-upplösta kontaminationsområden ge indikation på hur utsläppet från kärnkraftverket hade gått till. Områdena gav indikationer på att fyra separata utsläpp hade ägt rum. Kontaminationsnivåerna, sönderfallskorrigerade till 20 mars 2013 för ¹³⁴Cs och ¹³⁷Cs, översteg i de höga områdena 10 MBq/m². I detta arbete gjordes jämförelsemätningar med ett handburet referensinstrument. I medeltal nåddes en bra överensstämmelse mellan beräknad dos en meter ovanför marknivå, så kallad 1 m AGL (Above Ground Level) och uppmätta doshastighetsnivåer vid motsvarande markposition, men i de mest extrema punkterna var avvikelserna tillsynes uppemot en faktor 7-8. Liknande avvikelser har hittats i fler studier¹²⁶. JAEA och IRSN (French Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety), som också gjorde undersökningar i området kring Fukushima Daiichi, har jämfört sina respektive rekonstruktionsmetoder för doshastigheter vid 1 m AGL från flygmätningar med obemannad helikopter¹²⁷. Rekonstruktionsmetoderna baserades på mätningar ovanför det undersökta området.

² CLLBC är en vidareutveckling av CLYC och har förbättrade egenskaper.

Resultaten visade att det är viktigt att använda samma rekonstruktionsmetod ifall värden ska jämföras med varandra. De ytor som undersöktes var dock så små och relativt homogena att slutsatser om rekonstruktionsmetodernas prestanda för större och mer heterogena ytor inte kan dras.

Området kring Tjernobyl har också undersökts för radioaktiva ämnen med hjälp av UAV, i detta fall av typen fast vinge som i kontrast till multirotor-UAV har högre flyghastigheter¹²⁸. Markhastigheter upp till 25 m/s registrerades tack vare medvind på vissa ställen, men målet var hastigheter mellan 14-17 m/s. Flygningarna skedde på 40 till 60 meters höjd i parallella linjer. Även i detta arbete gjordes referensmätningar med markburna instrument på en meters höjd. Den största avvikelsen mellan beräknad doshastighet vid 1 m AGL och uppmätt doshastighet för motsvarande markposition var här en faktor ca 600. Totalt undersöktes 15 kvadratkilometer på en total flygtid under tio timmar utspridd över sex dagar.

Några observationer kan göras från avvikelserna mellan de uppmätta värdena vid marknivå och beräknade värdena för en meter AGL från en viss flyghöjd som påvisats i studier. Detta innebär att kalibreringspunkten har betydelse och det är oklart hur detta bäst ska göras vid en radiologisk nödsituation eftersom dessa kalibreringspunkter inte kan vara kända på förhand. I fall då endast en indikering på strålning behövs kan dock kalibreringsfaktorn vara av lägre intresse eller ointressant.

En betydande mängd av de tillämpningar gällande UAV och sensorer för R som påvisats och de produkter som nått marknaden har i större utsträckning handlat om ingenjörsmässig och teknisk integration än att de handlat om forskningsmässiga insatser som berör effektivisering och optimering av metodik. Flera kommersiella implementeringar tyder på detta, exempelvis genom avsaknad av kalibreringsmöjligheter för systemen för stråldosnivåer vid 1 m AGL. Metoder för vissa idealfall såsom punktkällor¹²⁹ och oändligt utbredda källor finns¹³⁰. Dock saknas ännu universella metoder och ytterligare komplexitet tillförs mätningar i urbana områden och miljöer med varierande topografi. Mätningar med drönare utförs på sådan höjd ovan mark att detta har betydelse. Generellt gäller också att en kalibreringsfaktor endast är giltig för den geometri den genomförs i. Ett tydligt exempel kan utläsas ur en studie där man i sin metod beräknade kalibreringsfaktorer på olika höjder för naturliga radionuklider (utbredda källor) och punktkällor¹³¹. Kalibreringsfaktorerna skiljde sig tydligt åt. För UAV-applikationer kan man förvänta sig att mätgeometrin varierar. Mer avancerade beräkningsmetoder kan ge framkomliga vägar som gör att höjkalibreringen inte behöver genomföras explicit, utan att den är en inbyggd del av beräkningen¹³¹⁻¹³⁵. Lärdomar gällande rekonstruktionsmetoder för urbana miljöer kan också tas från studier där liknande utmaningar finns, exempelvis de med applikationer för kärnenergianläggningar¹³⁶. Utvecklingen inom så kallade *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) går framåt¹³⁷ och 3D-kombination av topografisk data och radiologisk data inhämtad med drönare har påvisats¹³⁸.

4.7 Sensorer för sprängämnen (E)

Vad gäller sensorer för explosivämnen finns det några likheter med sektion 4.1 Sensorer för kemiska ämnen, då det är specifika ämnen/kemikalier man vill finna. Ett problem med de flesta explosivämnen är att de har väldigt låg flyktighet¹³⁹, utmaningarna blir då än större jämför med kemiska stridsmedel, ifall mättekniken baseras på molekyler i gasfasen. Notera att vältränade hundar anses fortfarande den bästa detektorn för många explosivämnen i gasfas^{140, 141}.

Om det ges möjlighet till provtagning och efterföljande analys med exempelvis jonrörlighetsspektrometri (IMS, Ion Mobility Spectrometry – en ofta nyttjad metod vid t. ex. säkerhetskontroller på flygplatser) kan man på liknande sätt som redan nämnts i sektion 4.1 hitta en mängd olika ämnen. Denna procedur kräver så klart att provtagningen lyckas fånga partiklar av ämnet som söks¹⁴². Även så kallade spottester, där främst vätskor

appliceras på ytor, alternativt i ett prov, och eventuella färgomslag ger en inisning om vilka kemikalier det kan röra sig om¹⁴³⁻¹⁴⁶.

Olika optiska tekniker (främst raman- och IR-spektroskopi) kan också nyttjas för detektion av spårämnen av kemikalier eller sprängmedel. En fördel med dessa tekniker är att de oftast mäter beröringsfritt (utanför instrumentet) men det finns svårigheter att hitta rätt ställe att mäta på¹⁴⁷. För att snabba upp tiden att avsöka en yta bedrivs utveckling och testning av olika avbildande spektroskopiska metoder¹⁴⁸. Exempel på tekniker som nyttjas och studeras för detektion av själva explosivämnena är kärnkvaadrupolresonans (NQR, Nuclear Quadrupole Resonance, för fasta ämnen som bl a innehåller kväve, klor alternativt kalium)^{149, 150}, neutronanalys, till exempel Neutron Capture (främst för ämnen med kväve) och termiska neutroner (Thermal Neutron Analysis), för exempelvis kväve/syre-kvot¹⁵¹, samt terahertzspektroskopi¹⁵².

Ytterligare metodik som implementerats är baserat på indirekt detektion av explosiv-ämnen, där man istället letar efter höljen eller delar i tändkedjan (sprängkapsel, kablage, elektronik, etc.)¹⁵³, såsom exempelvis radartekniker (inkluderande harmonisk radar/non-linear junction detection)^{154, 155}, metalldetektorer/magnetometrar/gradiometrar¹⁵⁶, mikro- och mm-vågsavbildning samt avbildning via tillbakapridd röntgen¹⁵⁷. Även metoder att finna ”störd jord”, vilket kan indikera förekomst av nyss nedgrävda föremål, (eng. ”disturbed ground”) kan vara intressant. Detta görs via exempelvis radar- och polarisationsavbildning och ger en indikation var minor eller dylikt kan vara nergrävda^{158, 159}. Mindetektion via termisk avbildning är ytterligare ett exempel på en framgångsrik indirekt metod¹⁶⁰.

Ett annat exempel är när mer flyktiga ämnen i blandas i sprängdeg, såsom 2,3-dimetyl-2,3-dinitrobutan (DMNB), för att öka sannolikheten att indirekt detektera med gasfassensorer. Detta är i enlighet med Förenta Nationernas ”Convention on the Marking of Plastic Explosives for the Purpose of Detection”. Denna konvention kom till några år efter bombdådet mot Pan Am 103 över Lockerbie³.

Till sist kan nämnas att det finns företag som skapat databaser innehållandes en stor mängd bilder av stridsdelar, minor, granater, etc. via ”crowd-sourcing” i syfte att detektera och identifiera dessa via maskininlärningsalgoritmer.

4.7.1 Små och handburna mättekniker

Som nämnts ovan, kan gasfassensorer användas för explosivämnena, men då de flesta explosivämnena ej avger några högre koncentrationer i gasfasen blir det i praktiken omöjligt att hitta explosivämnena på detta sätt. I vissa fall kan flyktigare biprodukter (exempelvis DNT, dinitrotoluen) vara möjliga att detektera, samt om explosivämnet ”märks” med flyktigare kemikalier (exempelvis i sprängdeg).

Handhållna optiska instrument, oftast baserade på ramanspektroskopi, har möjlighet att detektera synliga mängder av de flesta explosivämnena, även i vissa fall genom olika ljusgenomsläppliga behållare (exempelvis, olika plast- och glasflaskor). En relativt ny produkt kan även analysera och hitta spårämnen (partiklar) i exempelvis fingeravtryck¹⁶¹.

Metalldetektorer kan vara relativt små, speciellt om man nyttjar optiska atommagnetometrar/gradiometrar, och även hyperspektrala kameror i olika våglängdsband kan vara små. Det innebär att de har potential att bäras med drönare. Viktigt att poängtera är att olika små instrument har testats och i vissa fall nyttjats monterade på markgående autonoma fordon (UGV).

³ Konventionen förhandlades fram under ICAO International Conference i Montreal, Kanada 1991 och trädde i kraft 1998. (35 stater har ratificerat konventionen).

4.8 UAV-tillämpningar för E

För direkt detektion av explosivämnen har enklare försöks gjorts med bland annat hyperspektral avbildning i NIR/SWIR-området ¹⁶². Denna typ av metod är inte särskilt specifik, men en anomali fångas upp och viss indikation fås om vilket ämne det rör sig om. Möjligheter kan också finnas med avbildande LWIR-kameror som nyligen utvecklats för just drönare (totalvikt under 25 kg) då explosivämnesdetektion har kunnat påvisas med denna typ av kamera ⁶⁶. Punktmätande optiska, små system (exempelvis ramanbaserade) bör också vara möjligt med drönare, men väldigt lite finns rapporterat kring eventuella tester på skarpa ämnen. Det kan vara värt att notera att USA har ett pågående program inom "Proximal Detection" där ett par olika system är under utveckling. Om möjlighet ges att ställa ner (alt. hovra) en drönare över ett litet område som ska undersökas har prototyper (< 2 kg utan batteri) baserade på NQR-tekniken utvecklats ¹⁶³.

Indirekt detektion av sprängmedel via radartechniker (exempelvis markpenetrerande radar) eller metalldetektorer utförs med hjälp av drönare i Ukraina idag ¹⁶⁴⁻¹⁶⁶, och denna typ av tillämpning förbättras kontinuerligt i skarpa miljöer. Även olika metalldetektorer har nyttjats för exempelvis mindetektion ^{167, 168}. Som nämnts ovan kan även termiska kameror monterade på drönare användas för exempelvis mindetektion ¹⁶⁰, och avbildning i syfte att hitta "störd jord" kan också nyttjas för att indikera föremål såsom minor eller andra nedgrävda föremål ¹⁶⁹.

Det är tydligt att kriget i Ukraina starkt påverkar utvecklingen av E-relaterad detektion med hjälp av drönare, och dessa tillämpningar behöver troligtvis verifieras innan de tillämpas av civila myndigheter. Möjligen kan de exempel som givits ovan ge viss inspiration till möjliga användningsområden.

5 Mätning med drönare-användarperspektiv

Intresset för användning av drönare med kamera har ökat inom en rad olika områden, och så även för räddningstjänst, polis och kustbevakning^{6, 170-175}. Uppdragen för dessa olika myndigheter skiljer sig åt avseende syften, önskemål och lagkrav, men också avseende aktuella tidsperspektiv. Exempelvis är sökandet efter en försvunnen person mer akut och tidskritisk än en rutinmässig övervakning av miljöparametrar. En händelse som innefattar CBRNE är troligtvis mycket komplex, kan innefatta många aktörer i responskedjan, och behoven av detektion och tidiga insatstätter kan vara svårbedömda.

Det finns en internationell räddningstjänstorganisation med fokus på att samla experter och deras erfarenheter när drönare har använts vid skydd och räddning. Organisationen heter IEDO (International Emergency Drone Organization) och de gav 2022 ut en rapport där man samlat de bästa erfarenheterna och taktikval vid olika typscenarier¹⁷⁶. De belyser att teknikutvecklingen inom drönare sker i ett snabbare tempo än utvecklingen av bra metodik lämplig för användare. Detta kallas *bästa praxis* (best practices) och i rapporten avhandlas allt från organisatoriska, utbildnings- och säkerhetsmässiga aspekter till krav avseende teknik och regelefterlevnad. Rapporten innehåller också några avsnitt som beskriver CBRNE och olyckor med industrikemikalier, men framförallt ger den ett användar- och nyttoperspektiv av teknikutvecklingen med drönare. Ofta är nytto-lasterna kameror och enklare sensorer men fokus är användbar metodik i fältmiljö. Exempel på användbar metodik är metoder som rör eftersök, evakuering, insatser, samt ledning och taktik med hundpatrull.

Den här kunskapsöversikten visar att det idag finns tillgänglig sensorteknik för CBRNE-applikationer som är anpassad för integrering och montering på drönare. För några av ämnena är tekniken mer mogen och studierna visar på en hög tillämpningsgrad. Vår kunskapsöversikt visar också att forskningsfältet är aktivt med flera nyss gjorda studier med stor potential. Däremot är det svårare att hitta rapporter där den faktiska nyttan för räddningstjänsten beskrivs. Flertalet av de mer tillämpade studierna är fokuserade på att demonstrera egenskaperna av den aktuella sensorn i en designad fältmiljö. Det är därför svårare att så här tidigt bedöma användarperspektivet av CBRNE-monterade sensorer på drönare på samma sätt som görs i rapporten från IEDO¹⁷⁶. Det finns några undantag där innovationsrika räddningstjänstorganisationer i till exempel USA, Frankrike och Italien framgångsrikt börjat öva och använda drönare med enkla sensorer i skarpa lägen. För att lyckas med att introducera drönarteknik med integrerade CBRNE-sensorer tror vi att en framgångsfaktor kan vara att först etablera metodik med kameraförsedda drönare vid "vanliga" insatser. Därefter kan mer specialiserade sensorpaket gradvis introduceras.

De olika ämnena i CBRNE är i realiteten inte speciellt lika med avseende på egenskaper eller potentiella spridningstekniker, vilket starkt påverkar valet av lämplig rekognoserings- och mätmetodik. Ett område med γ -strålkällor kan med dagens sensorteknik upptäckas på relativt säkra avstånd. Detta leder till att flygrutter och flygmönster kan planeras så att större områden kan undersökas. För att upptäcka ett mindre läckage av en gas eller aerosol kan det däremot krävas en mer noggrann och tidskrävande flygplanering, där förändringar i sensorsignal minutiöst måste bevakas. Här kan eventuellt flera konfirmerande mätningar vara nödvändiga för att bekräfta läckans position. En stark vind, eller nederbörd, skulle göra mätningen svårare. Ett sök efter nedgrävda minor skulle kräva ytterligare taktik och flygmönster anpassat efter terräng och sensorteknik. En uppenbar slutsats är att flygrutter och flygmönster kommer skilja sig åt beroende på händelse och omgivningsfaktorer.

6 Slutsatser och framtida forskningsbehov

För C-området finns det idag flera etablerade sensortekniker för att upptäcka relevanta halter av kemiska stridsmedel i gasform¹⁴. Detta rör främst jonrörlighetsspektrometri (IMS) och flamfotometrisk detektion (FPD) där produkter för drönarmontering antingen redan finns eller är nära att finnas tillgängliga på marknaden. Det finns i övrigt en potential för sensorer där interaktioner med halvledare, nanomaterial eller olika biosensorer studeras. Här finns det ännu inga kommersiella produkter anpassade för kemiska stridsmedel tillgängliga, men fördelar finns i att dessa sensorer har potential att göras små, lätta och energieffektiva. De har också potential att vara billigare än IMS och FPD. Ovanstående sensortekniker innebär att drönaren, eller sensorenheten, behöver befinna sig i den kontaminerade atmosfären för att kunna ge respons. I framtiden skulle ett instrument med möjlighet för avståndsdetektion troligtvis vara mycket användbart då flygmönster skulle tillåta att större områden övervakas.

Även om teknikområdet i sig skulle ha nytta av bättre C-sensorer, såsom bättre känslighet, selektivitet och möjlighet för avståndsdetektion, så är frågan om inte behovet av användbara mätkoncept är minst lika trängande. Tillgången på relevanta studier genomförda i fältmiljö är begränsad till ett fåtal konceptstudier där källorna är väl definierade. Det finns även en brist på studier med försöksupplägget att förutsättningslöst med enbart C-sensors respons identifiera kemiska utsläppskällor i ett område. Även om algoritmer för autonomi och maskininlärning förbättras tror vi att en ”bästa praxis” behöver utvecklas tillsammans med användare, där övrig lägesbild kan sammanlänkas med sensorutveckling inom C-området. Idag drivs dessa frågor i stort sett uteslutande inom miljöområdet och för olika industri- och jordbruksapplikationer där det fortlöpande presenteras nya studier^{16, 17}. Om den här typen av tillämpad utvecklingsverksamhet initieras kan användbara mätkoncept tas fram för framtagna typscenarier⁷⁹.

Det finns idag en stor utmaning att detektera och identifiera B-aerosoler i realtid. Även om det finns bärbar sensorteknik för att varna om möjliga B-hot är området relativt utforskat avseende integrering på flygande plattformar. Komplexiteten av möjliga B-hot och förekomsten av naturlig bakgrund gör det svårt att bedöma när en tillräckligt snabb och tillförlitlig B-sensor finns tillgänglig för drönarapplikationer.

Det mest tekniskt mogna området rör sensorer för att upptäcka γ -strålning i ett område. Sensorerna är tillräckligt känsliga, specifika och lätta för att dels medge respons på relevanta avstånd men också vara kompatibla för integrering på drönare. Det finns vidare ett betydande stöd i form av rapporter som visat på framgångsrik användning vid efterdyningar av till exempel kärnkraftsolyckor. Ett område för utveckling är att ta fram enkla och inbyggda kalibreringsmetoder för stråldos på en meter över mark (AGL) då spaningsrutter ofta är på högre höjd. Det finns även andra möjligheter att driva på forskningsmässiga framsteg på området. Det arbetet bör lämpligen baseras på kunskap kring typfall och vilka krav som därigenom är lämpliga att ställa på drönarmonterade sensorer. Kunskapsuppbyggnaden gäller dels sensorförståelsen i sig men även utveckling av algoritmer för att optimera rekognoseringsmetodik. Exempel på sådana studier är optimering av flygrutter, kunskap kring extrahering av värdefull information från spektrum, mer sofistikerade dosberäkningsmodeller och rekognosering i urbana miljöer.

För E-området är utmaningarna ännu större jämfört med C vad gäller att detektera ämnet i gasfas på grund av generellt väldigt låga ångtryck samt att ämnet oftast är inkapslat. Spårmängder av explosivämnen, vilket kan förväntas på exempelvis hemmagjorda bomber, blir även dessa svåra att detektera med hjälp av drönarmonterade sensorer. För indirekt detektion av explosivämnen (exempelvis minor) har olika metoder nyttjats i skarpa miljöer i exempelvis Ukraina.

En annan aspekt är att vi bedömer att det med dagens sensorteknik skulle vara svårt att konstruera ett tillräckligt lätt sensorpaket som klarar att detektera alla ämnena i CBRNE samtidigt. Ett modulärt system bestående av utbytbara enheter för C, B, R och E kan däremot vara mer nära förestående, då det redan finns kommersiella lösningar för några av kombinationerna. Ett ytterligare användningsområde är att använda drönare som datainsamlare eller kommunikationsnod för ett sensornätverk¹⁷⁷. I studier har man undersökt hur flygmönster eller algoritmer kan optimeras för att samla in data från sensornoder på marken på ett effektivt sätt¹⁷⁸⁻¹⁸⁰. Dessa studier har gjorts oberoende av vilken typ av sensor som används på marken, och skulle troligtvis gälla även för CBRNE sensorer. I detta fall bär då inte drönaren någon egen mätsensor. Tillämpningar har exempelvis visats för jordbruk¹⁸¹⁻¹⁸³ och då även med sensorer nedgrävda i marken.

7 Referenser

- (1) MSB, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, CBRNE-strategi. Advant: Karlstad, 2023.
- (2) Colomina, I.; Molina, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2014, 92, 79-97. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013.
- (3) Quamar, M. M.; Al-Ramadan, B.; Khan, K.; Shafiullah, M.; El Ferik, S. Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology-A Review. *Remote Sensing* 2023, 15 (20). DOI: 10.3390/rs15205039.
- (4) Balestrieri, E.; Daponte, P.; De Vito, L.; Lamonaca, F. Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview. *Sensors* 2021, 21 (4). DOI: 10.3390/s21041518.
- (5) Al-Dosari, K.; Hunaiti, Z.; Balachandran, W. Systematic Review on Civilian Drones in Safety and Security Applications. *Drones* 2023, 7 (3). DOI: 10.3390/drones7030210.
- (6) Melin, T. *Vägledning 2.0 – Obemannade luftfartyg i kommunal räddningstjänst*; Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2020.
- (7) Marques, L.; Vale, A.; Vaz, P. State-of-the-Art Mobile Radiation Detection Systems for Different Scenarios. *Sensors* 2021, 21 (4). DOI: 10.3390/s21041051.
- (8) Wingfors, H.; Gradmark, P.-Å.; Tengel, T.; Tjärnhage, T.; Wästerby, P.; Granström, M.; Lidström, K.; Ågren, G.; Nord, S.; Bergqvist, E. *Omvärldsbevakning, CBRN-sensorer och RPAS*; FOI-R--5393--SE; 2023.
- (9) OPCW. Chemical Weapons Convention, Convention on the Prohibition of the Development, Production, Stockpiling and Use of Chemical Weapons and on their Destruction. OPCW, Ed.; https://www.opcw.org/sites/default/files/documents/CWC/CWC_en.pdf, 2020.
- (10) OPCW. Report Of The Fact-Finding Mission Regarding The Incident Of Alleged Use Of Toxic Chemicals As A Weapon In Douma, Syrian Arab Republic, ON 7 APRIL 2018. 2019.
- (11) Nakagawa, T.; Tu, A. T. Murders with VX: Aum Shinrikyo in Japan and the assassination of Kim Jong-Nam in Malaysia. *Forensic Toxicology* 2018, 36 (2), 542-544. DOI: 10.1007/s11419-018-0426-9.
- (12) Brunka, Z.; Ryl, J.; Brushtulli, P.; Gromala, D.; Walczak, G.; Zieba, S.; Piesniak, D.; Anand, J. S.; Wiergowski, M. Selected Political Criminal Poisonings in the Years 1978-2020: Detection and Treatment. *Toxics* 2022, 10 (8). DOI: 10.3390/toxics10080468.
- (13) Robinson, J. P. *The problem of chemical and biological warfare*; Almqvist&Wiksell, 1971.
- (14) Sferopoulos, R. *A Review of Chemical Warfare Agent (CWA) Detector Technologies and Commercial-Off-The-Shelf Items*; DSTO-GD-0570; Human Protection and Performance Division, DSTO Defence Science and Technology Organisation, 506 Lorimer St, Fishermans Bend, Victoria 3207 Australia 2009.
- (15) Sun, Y.; Ong, K. Y. *Detection Technologies for Chemical Warfare Agents and Toxic Vapors*; CRC Press LLC, 2005.
- (16) Jonca, J.; Pawnuk, M.; Bezyk, Y.; Arsen, A.; Sówka, I. Drone-Assisted Monitoring of Atmospheric Pollution-A Comprehensive Review. *Sustainability* 2022, 14 (18). DOI: 10.3390/su141811516.
- (17) Burgues, J.; Marco, S. Environmental chemical sensing using small drones: A review. *Science of the Total Environment* 2020, 748. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141172.
- (18) Karagulian, F.; Gerboles, M.; Barbiere, M.; Kotsev, A.; Lagler, F.; Borowiak, A. *Review of sensors for air quality monitoring*; EUR 29826; Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019. DOI: doi:10.2760/568261.
- (19) Burgués, J.; Doñate, S.; Esclapez, M. D.; Saúco, L.; Marco, S. Characterization of odour emissions in a wastewater treatment plant using a drone-based chemical sensor system. *Science of the Total Environment* 2022, 846. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.157290.
- (20) Burgués, J.; Esclapez, M. D.; Doñate, S.; Marco, S. RHINOS: A lightweight portable electronic nose for real-time odor quantification in wastewater treatment plants. *Iscience* 2021, 24 (12). DOI: 10.1016/j.isci.2021.103371.
- (21) Araujo, J. O.; Valente, J.; Kooistra, L.; Munniks, S.; Peters, R. J. B. Experimental Flight Patterns Evaluation for a UAV-Based Air Pollutant Sensor. *Micromachines* 2020, 11 (8). DOI: 10.3390/mi11080768.

- (22) Pobkrut, T.; Eamsa-Ard, T.; Kerdcharoen, T.; Ieee. Sensor Drone for Aerial Odor Mapping for Agriculture and Security Services. *2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (Ecti-Con)* 2016.
- (23) Iwaszenko, S.; Kalisz, P.; Slota, M.; Rudzki, A. Detection of Natural Gas Leakages Using a Laser-Based Methane Sensor and UAV. *Remote Sensing* 2021, *13* (3). DOI: 10.3390/rs13030510.
- (24) Taylor, M. D.; Nourbakhsh, I. R. A low-cost particle counter and signal processing method for indoor air pollution. *Air Pollution Xxiii* 2015, *198*, 337-348. DOI: 10.2495/air150291.
- (25) Kaliszewski, M.; Wlodarski, M.; Mlynczak, J.; Jankiewicz, B.; Auer, L.; Bartosewicz, B.; Liszewska, M.; Budner, B.; Szala, M.; Schneider, B.; et al. The Multi-Gas Sensor for Remote UAV and UGV Missions-Development and Tests. *Sensors* 2021, *21* (22). DOI: 10.3390/s21227608.
- (26) Mawrence, R.; Munniks, S.; Valente, J. Calibration of Electrochemical Sensors for Nitrogen Dioxide Gas Detection Using Unmanned Aerial Vehicles. *Sensors* 2020, *20* (24). DOI: 10.3390/s20247332.
- (27) Guan, R. Q.; Yu, J.; Li, M. Y.; Yan, J. L.; Liu, Z. C. Preparation of electrochemical sensor assisted unmanned aerial vehicles system for SO₂, O₃, NO₂, CO and PM_{2.5}/PM₁₀ detection in air. *International Journal of Electrochemical Science* 2021, *16* (10). DOI: 10.20964/2021.10.28.
- (28) Stetter, J. R.; Li, J. Amperometric gas sensors - A review. *Chemical Reviews* 2008, *108* (2), 352-366. DOI: 10.1021/cr0681039.
- (29) Fumian, F.; Chierici, A.; Bianchelli, M.; Martellucci, L.; Rossi, R.; Malizia, A.; Gaudio, P.; D'Errico, F.; Di Giovanni, D. Development and performance testing of a miniaturized multi-sensor system combining MOX and PID for potential UAV application in TIC, VOC and CWA dispersion scenarios. *European Physical Journal Plus* 2021, *136* (9). DOI: 10.1140/epjp/s13360-021-01858-2.
- (30) Burgues, J.; Hernandez, V.; Lilienthal, A. J.; Marco, S. Smelling Nano Aerial Vehicle for Gas Source Localization and Mapping. *Sensors* 2019, *19* (3). DOI: 10.3390/s19030478.
- (31) Dey, A. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review. *Materials Science and Engineering B-Advanced Functional Solid-State Materials* 2018, *229*, 206-217. DOI: 10.1016/j.mseb.2017.12.036.
- (32) Reuter, M.; Bovensmann, H.; Buchwitz, M.; Borchardt, J.; Krautwurst, S.; Gerilowski, K.; Lindauer, M.; Kubistin, D.; Burrows, J. P. Development of a small unmanned aircraft system to derive CO₂ emissions of anthropogenic point sources. *Atmospheric Measurement Techniques* 2021, *14* (1), 153-172. DOI: 10.5194/amt-14-153-2021.
- (33) Liu, Y. S.; Paris, J. D.; Vrekoussis, M.; Antoniou, P.; Constantinides, C.; Desservettaz, M.; Keleshis, C.; Laurent, O.; Leonidou, A.; Philippon, C.; et al. Improvements of a low-cost CO₂ commercial nondispersive near-infrared (NDIR) sensor for unmanned aerial vehicle (UAV) atmospheric mapping applications. *Atmospheric Measurement Techniques* 2022, *15* (15), 4431-4442. DOI: 10.5194/amt-15-4431-2022.
- (34) Dinh, T. V.; Choi, I. Y.; Son, Y. S.; Kim, J. C. A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction. *Sensors and Actuators B-Chemical* 2016, *231*, 529-538. DOI: 10.1016/j.snb.2016.03.040.
- (35) Pang, X. B.; Chen, L.; Shi, K. L.; Wu, F.; Chen, J. M.; Fang, S. X.; Wang, J. L.; Xu, M. A lightweight low-cost and multipollutant sensor package for aerial observations of air pollutants in atmospheric boundary layer. *Science of the Total Environment* 2021, *764*. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142828.
- (36) Girdwood, J.; Stanley, W.; Stopford, C.; Brus, D. Simulation and field campaign evaluation of an optical particle counter on a fixed-wing UAV. *Atmospheric Measurement Techniques* 2022, *15* (7), 2061-2076. DOI: 10.5194/amt-15-2061-2022.
- (37) Liu, Z. X.; Osborne, M.; Anderson, K.; Shutler, J. D.; Wilson, A.; Langridge, J.; Yim, S. H. L.; Coe, H.; Babu, S.; Satheesh, S. K.; et al. Characterizing the performance of a POPS miniaturized optical particle counter when operated on a quadcopter drone. *Atmospheric Measurement Techniques* 2021, *14* (9), 6101-6118. DOI: 10.5194/amt-14-6101-2021.
- (38) Tengel, T.; Gradmark, P.-Å.; Mören, L.; Wingfors, H. *Realtidsövervakning av aerosolmoln med drönarburen provtagare*; FOI, 2021.

- (39) Buteau, S.; Beckman, B.; Nadeau, D.; Fairbrother, B. Biological Detection, Identification and Monitoring (Bio DIM) in Contested Urban Environment: leveraging standoff, point and UAS mounted particle counter/collector payload. In *Conference on Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XXI held at SPIE Defense + Commercial Sensing Conference*, Electr Network, Apr 27-May 08, 2020; 2020; Vol. 11416. DOI: 10.1117/12.2558183.
- (40) Pochwala, S.; Gardecki, A.; Lewandowski, P.; Somogyi, V.; Anweiler, S. Developing of Low-Cost Air Pollution Sensor-Measurements with the Unmanned Aerial Vehicles in Poland. *Sensors* 2020, 20 (12). DOI: 10.3390/s20123582.
- (41) Valpolini, P. *Teamworking: Novadem NX 160 with Proengin AP4C+ chemical detector, but not only*. European Defence Review, 2021. (accessed 2022-10-05).
- (42) Sferopulos, R. A Review of Chemical Warfare Agent (CWA) Detector Technologies and Commercial-Off-The-Shelf Items. Department of Defence, A., Ed.; DSTO Defence Science and Technology Organisation, Victoria 3207 Australia: 2009; Vol. DSTO-GD-0570.
- (43) Fumian, F.; Di Giovanni, D.; Martellucci, L.; Rossi, R.; Gaudio, P. Application of Miniaturized Sensors to Unmanned Aerial Systems, A New Pathway for the Survey of Polluted Areas: Preliminary Results. *Atmosphere* 2020, 11 (5). DOI: 10.3390/atmos11050471.
- (44) Marinelli, W. J.; Schmit, T.; Dupuis, J. R.; Mulhall, P.; Croteau, P.; Manegold, D.; Beshay, M.; Lav, M. Cooperative use of standoff and UAV sensors for CBRNE detection. In *16th Meeting of the Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing part of the SPIE Defense, Security plus Sensing Symposium*, Baltimore, MD, Apr 21-23, 2015; 2015; Vol. 9455. DOI: 10.1117/12.2177023.
- (45) Di Giovanni, D.; Fumian, F.; Chierici, A.; Bianchelli, M.; Martellucci, L.; Carminati, G.; Malizia, A.; d'Errico, F.; Gaudio, P. Design of Miniaturized Sensors for a Mission-Oriented UAV Application: A New Pathway for Early Warning. *International Journal of Safety and Security Engineering* 2021, 11 (4), 435-444.
- (46) Allers, M.; Ahrens, A.; Hitzemann, M.; Bock, H.; Wolf, T.; Radunz, J.; Meyer, F.; Wilsenack, F.; Zimmermann, S.; Ficks, A. Real-Time Remote Detection of Airborne Chemical Hazards with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Carrying an Ion Mobility Spectrometer. *Ieee Sensors Journal* 2023, 23 (15), 16562-16570. DOI: 10.1109/jsen.2023.3287448.
- (47) Puton, J.; Namiesnik, J. Ion mobility spectrometry: Current status and application for chemical warfare agents detection. *Trac-Trends in Analytical Chemistry* 2016, 85, 10-20. DOI: 10.1016/j.trac.2016.06.002.
- (48) Aslam, M. Z.; Zhang, H.; Sreejith, V. S.; Naghdi, M.; Ju, S. Advances in the surface acoustic wave sensors for industrial applications: Potentials, challenges, and future directions: A review. *Measurement* 2023, 222. DOI: 10.1016/j.measurement.2023.113657.
- (49) Grabka, M.; Witkiewicz, Z.; Jasek, K.; Piwowarski, K. Acoustic Wave Sensors for Detection of Blister Chemical Warfare Agents and Their Simulants. *Sensors* 2022, 22 (15). DOI: 10.3390/s22155607.
- (50) Fahim, F.; Mainuddin, M.; Mittal, U.; Kumar, J.; Nimal, A. T. Novel SAW CWA Detector Using Temperature Programmed Desorption. *Ieee Sensors Journal* 2021, 21 (5), 5914-5922. DOI: 10.1109/jsen.2020.3042766.
- (51) Barreca, D.; Maccato, C.; Gasparotto, A. Metal Oxide Nanosystems As Chemoresistive Gas Sensors for Chemical Warfare Agents: A Focused Review. *Advanced Materials Interfaces* 2022, 9 (14). DOI: 10.1002/admi.202102525.
- (52) Nimal, A. T.; Mittal, U.; Singh, M.; Khaneja, M.; Kannan, G. K.; Kapoor, J. C.; Dubey, V.; Gutch, P. K.; Lal, G.; Vyas, K. D.; et al. Development of handheld SAW vapor sensors for explosives and CW agents. *Sensors and Actuators B-Chemical* 2009, 135 (2), 399-410. DOI: 10.1016/j.snb.2008.08.040.
- (53) Lobotka, M.; Pitschmann, V.; Matejovsky, L. Detection Papers with Metal Complexes with Triphenylmethane Dyes for the Detection of G-Series Nerve Agents (Sarin, Soman, Cyclosarin) in the Liquid Phase. *Chemosensors* 2019, 7 (4). DOI: 10.3390/chemosensors7040059.
- (54) Nikolic, M. V.; Milovanovic, V.; Vasiljevic, Z. Z.; Stamenkovic, Z. Semiconductor Gas Sensors: Materials, Technology, Design, and Application. *Sensors* 2020, 20 (22). DOI: 10.3390/s20226694.
- (55) Witkiewicz, Z.; Jasek, K.; Grabka, M. Semiconductor Gas Sensors for Detecting Chemical Warfare Agents and Their Simulants. *Sensors* 2023, 23 (6). DOI: 10.3390/s23063272.

- (56) Hong, S.; Wu, M.; Hong, Y.; Jeong, Y.; Jung, G.; Shin, W.; Park, J.; Kim, D.; Jang, D.; Lee, J. H. FET-type gas sensors: A review. *Sensors and Actuators B-Chemical* 2021, 330. DOI: 10.1016/j.snb.2020.129240.
- (57) Ratandee, S. L.; Arya, B.; Rastogi, K.; Verma, M.; Rani, S.; Kumar, S. P.; Singh, M. R.; Singh, W. R.; Hooda, S. Recent advances in sensing toxic nerve agents through DMMP model simulant using diverse nanomaterials-based chemical sensors. *Talanta* 2024, 272.
- (58) Diaudin, F. N.; Rashid, J. I. A.; Knight, V. F.; Yunus, W.; Ong, K. K.; Kasim, N. A. M.; Halim, N. A.; Noor, S. A. M. A review of current advances in the detection of organophosphorus chemical warfare agents based biosensor approaches. *Sensing and Bio-Sensing Research* 2019, 26. DOI: 10.1016/j.sbsr.2019.100305.
- (59) Samad, A.; Florez, D. A.; Chourdakis, I.; Vogt, U. Concept of Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for 3D Investigation of Air Quality in the Atmosphere-Example of Measurements Near a Roadside. *Atmosphere* 2022, 13 (5). DOI: 10.3390/atmos13050663.
- (60) Chodorek, A.; Chodorek, R. R.; Yastrebov, A. The Prototype Monitoring System for Pollution Sensing and Online Visualization with the Use of a UAV and a WebRTC-Based Platform. *Sensors* 2022, 22 (4). DOI: 10.3390/s22041578.
- (61) Cichowicz, R.; Dobrzanski, M. Spatial Analysis (Measurements at Heights of 10 m and 20 m above Ground Level) of the Concentrations of Particulate Matter (PM₁₀, PM_{2.5}, and PM_{1.0}) and Gaseous Pollutants (H₂S) on the University Campus: A Case Study. *Atmosphere* 2021, 12 (1). DOI: 10.3390/atmos12010062.
- (62) Sowka, I.; Cichowicz, R.; Dobrzanski, M.; Bezyk, Y. Analysis of Air Pollutants for a Small Paintshop by Means of a Mobile Platform and Geostatistical Methods. *Energies* 2023, 16 (23). DOI: 10.3390/en16237716.
- (63) De Fazio, R.; Dinoi, L. M.; De Vittorio, M.; Visconti, P. A Sensor-Based Drone for Pollutants Detection in Eco-Friendly Cities: Hardware Design and Data Analysis Application. *Electronics* 2022, 11 (1). DOI: 10.3390/electronics11010052.
- (64) Cichowicz, R.; Dobrzanski, M. Modeling Pollutant Emissions: Influence of Two Heat and Power Plants on Urban Air Quality. *Energies* 2021, 14 (17). DOI: 10.3390/en14175218.
- (65) Olaguer, E. P.; Jeltima, S.; Gauthier, T.; Jermalowicz, D.; Ostaszewski, A.; Batterman, S.; Xia, T.; Raneses, J.; Kovalchick, M.; Miller, S.; et al. Landfill Emissions of Methane Inferred from Unmanned Aerial Vehicle and Mobile Ground Measurements. *Atmosphere* 2022, 13 (6). DOI: 10.3390/atmos13060983.
- (66) Carrock, J.; Dumont, A.; Saute, B.; Norman, M.; Lariviere-Bastien, M.; Chamberland, M. Telops Hyper-Cam Nano next generation LWIR hyperspectral imaging system. *Proc. Spie*: 2024.
- (67) Jindal, M. K.; Mainuddin; Veerabuthiran, S.; Kumar, A. Design Analysis of Mid IR DIAL System for Detection of Hazardous Chemical Species. *Defence Science Journal* 2023, 73 (6), 712-721. DOI: 10.14429/dsj.73.6.18829.
- (68) Burgues, J.; Esclapez, M. D.; Donate, S.; Pastor, L.; Marco, S. Aerial Mapping of Odorous Gases in a Wastewater Treatment Plant Using a Small Drone. *Remote Sensing* 2021, 13 (9). DOI: 10.3390/rs13091757.
- (69) Villa, T. F.; Salimi, F.; Morton, K.; Morawska, L.; Gonzalez, F. Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. *Sensors* 2016, 16 (12). DOI: 10.3390/s16122202.
- (70) Zhou, X. C.; Aurell, J.; Mitchell, W.; Tabor, D.; Gullett, B. A small, lightweight multipollutant sensor system for ground-mobile and aerial emission sampling from open area sources. *Atmospheric Environment* 2017, 154, 31-41. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.01.029.
- (71) Brinkman, J. L.; Johnson, C. E. Effects of Downwash from a 6-Rotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) on Gas Monitor Concentrations. *Mining Metallurgy & Exploration* 2021, 38 (4), 1789-1800. DOI: 10.1007/s42461-021-00436-5.
- (72) Brinkman, J. L.; Davis, B.; Johnson, C. E. Post-movement stabilization time for the downwash region of a 6-rotor UAV for remote gas monitoring. *Heliyon* 2020, 6 (9). DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e04994.
- (73) Taupe, P.; Litzenberger, M.; Rothbacher, D.; Monetti, D. Dealing with UAV-downwash Effects during Airborne Detection of Localised Gas Plumes. *Ercim News* 2023, (133), 40-41.
- (74) Sonkar, S. K.; Kumar, P.; George, R. C.; Philip, D.; Ghosh, A. K. Detection and Estimation of Natural Gas Leakage Using UAV by Machine Learning Algorithms. *Ieee Sensors Journal* 2022, 22 (8), 8041-8049. DOI: 10.1109/jsen.2022.3157872.

- (75) Liu, J. L.; Liao, X. H.; Ye, H. P.; Yue, H. Y.; Wang, Y.; Tan, X.; Wang, D. L. UAV Swarm Scheduling Method for Remote Sensing Observations during Emergency Scenarios. *Remote Sensing* 2022, 14 (6). DOI: 10.3390/rs14061406.
- (76) Altenbaugh, R.; Barton, J.; Chiu, C.; Fidler, K.; Hiatt, D.; Hawthorne, C.; Marshall, S.; Mohos, J.; McHugh, V.; Nicoloff, B. Application of the Raven UAV for Chemical and Biological Detection. In *Conference on Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing XI*, Orlando, FL, Apr 06-08, 2010; 2010; Vol. 7665. DOI: 10.1117/12.850334.
- (77) Marques, M. M.; Carapau, R. S.; Rodrigues, A. V.; Lobo, V.; Gouveia-Carvalho, J.; Antunes, W.; Goncalves, T.; Duarte, F.; Verissimo, B.; Ieee. GammaEx project: A solution for CBRN remote sensing using Unmanned Aerial Vehicles in maritime environments. *Oceans 2017 - Anchorage* 2017.
- (78) Kim, J. S.; Lee, M. J.; Nam, H.; Do, S.; Lee, J. H.; Park, M. K.; Park, B. H. Indoor and Outdoor Tests for a Chemi-capacitance Carbon Nanotube Sensor Installed on a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle for Dimethyl Methylphosphonate Detection and Mapping. *Acs Omega* 2021, 6 (24), 16159-16164. DOI: 10.1021/acsomega.1c02104.
- (79) Börjegen, S.; Larsson, A.; Liljedahl, B. *Underlag för hantering av C-händelser för räddningstjänst under höjd beredskap - RUHB*; FOI-R-5135-SE; FOI Totalförsvarets forskningsinstitut, 1 64 90 Stockholm, 2021.
- (80) Frischknecht, F. The history of biological warfare - Human experimentation, modern nightmares and lone madmen in the twentieth century. *Embo Reports* 2003, 4, S47-S52. DOI: 10.1038/sj.embor.embor849.
- (81) Kwasny, M.; Bombalska, A.; Kaliszewski, M.; Wlodarski, M.; Kopczynski, K. Fluorescence Methods for the Detection of Bioaerosols in Their Civil and Military Applications. *Sensors* 2023, 23 (6). DOI: 10.3390/s23063339.
- (82) Kortepeter, M. G.; Parker, G. W. Potential biological weapons threats. *Emerging Infectious Diseases* 1999, 5 (4), 523-527. DOI: 10.3201/eid0504.990411.
- (83) Srikrishna, D. Pentagon Found Daily, Metagenomic Detection of Novel Bioaerosol Threats to Be Cost-Prohibitive: Can Virtualization and AI Make It Cost-Effective? *Health Security* 2024, 22 (2), 108-129. DOI: 10.1089/hs.2023.0048.
- (84) Huffman, J. A.; Perring, A. E.; Savage, N. J.; Clot, B.; Crouzy, B.; Tummon, F.; Shoshanim, O.; Damit, B.; Schneider, J.; Sivaprakasam, V.; et al. Real-time sensing of bioaerosols: Review and current perspectives. *Aerosol Science and Technology* 2020, 54 (5), 465-495. DOI: 10.1080/02786826.2019.1664724.
- (85) Santl-Temkiv, T.; Sikoparija, B.; Maki, T.; Carotenuto, F.; Amato, P.; Yao, M. S.; Morris, C. E.; Schnell, R.; Jaenicke, R.; Pöhlker, C.; et al. Bioaerosol field measurements: Challenges and perspectives in outdoor studies. *Aerosol Science and Technology* 2020, 54 (5), 520-546. DOI: 10.1080/02786826.2019.1676395.
- (86) Saari, S.; Jarvinen, S.; Reponen, T.; Mensah-Attipoe, J.; Pasanen, P.; Toivonen, J.; Keskinen, J. Identification of single microbial particles using electro-dynamic balance assisted laser-induced breakdown and fluorescence spectroscopy. *Aerosol Science and Technology* 2016, 50 (2), 126-132. DOI: 10.1080/02786826.2015.1134764.
- (87) Powers, C. W.; Hanlon, R.; Grothe, H.; Prussin, A. J.; Marr, L. C.; Schmale, D. G. Coordinated Sampling of Microorganisms Over Freshwater and Saltwater Environments Using an Unmanned Surface Vehicle (USV) and a Small Unmanned Aircraft System (sUAS). *Frontiers in Microbiology* 2018, 9. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01668.
- (88) Kemppinen, O.; Laning, J. C.; Mersmann, R. D.; Videen, G.; Berg, M. J. Imaging atmospheric aerosol particles from a UAV with digital holography. *Scientific Reports* 2020, 10 (1). DOI: 10.1038/s41598-020-72411-x.
- (89) West, J. S.; Kimber, R. B. E. Innovations in air sampling to detect plant pathogens. *Annals of Applied Biology* 2015, 166 (1), 4-17. DOI: 10.1111/aab.12191.
- (90) Anderson, G. P.; King, K. D.; Cuttino, D. S.; Whelan, J. P.; Ligler, F. S.; MacKrell, J. F.; Bovais, C. S.; Indyke, D. K.; Foch, R. J. Biological agent detection with the use of an airborne biosensor. *Field Analytical Chemistry and Technology* 1999, 3 (4-5), 307-314. DOI: 10.1002/(sici)1520-6521(1999)3:4/5<307::aid-fact9>3.0.co;2-m.
- (91) Gonzalez, F.; Castro, M. P. G.; Narayan, P.; Walker, R.; Zeller, L. Development of an Autonomous Unmanned Aerial System to Collect Time-Stamped Samples from the Atmosphere and Localize Potential Pathogen Sources. *Journal of Field Robotics* 2011, 28 (6), 961-976. DOI: 10.1002/rob.20417.

- (92) Bieber, P.; Seifried, T. M.; Burkart, J.; Gratzl, J.; Kasper-Giebl, A.; Schmale, D. G.; Grothe, H. A Drone-Based Bioaerosol Sampling System to Monitor Ice Nucleation Particles in the Lower Atmosphere. *Remote Sensing* 2020, 12 (3). DOI: 10.3390/rs12030552.
- (93) Kobziar, L. N.; Pingree, M. R. A.; Watts, A. C.; Nelson, K. N.; Dreaden, T. J.; Ridout, M. Accessing the Life in Smoke: A New Application of Unmanned Aircraft Systems (UAS) to Sample Wildland Fire Bioaerosol Emissions and Their Environment. *Fire-Switzerland* 2019, 2 (4). DOI: 10.3390/fire2040056.
- (94) Seifried, T. M.; Bieber, P.; Kunert, A. T.; Schmale, D. G.; Whitmore, K.; Fröhlich-Nowoisky, J.; Grothe, H. Ice Nucleation Activity of Alpine Bioaerosol Emitted in Vicinity of a Birch Forest. *Atmosphere* 2021, 12 (6). DOI: 10.3390/atmos12060779.
- (95) Cole, B.; Krafthefer, B.; Knee, D.; Fulton, V.; Law, K. Honeywell's organic air vehicle CB sensing platform. In *Optically Based Biological And Chemical Sensing For Defence*, 2004; Vol. 5617, pp 399-406.
- (96) Krasniqi, F.; Kerst, T.; Leino, M.; Eishah, J.; Toivonen, H.; Röttger, A.; Toivonen, J. Standoff UV-C imaging of alpha particle emitters. In *Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors And Associated Equipment*, 2021; Vol. 987.
- (97) Royo, P.; Vargas, A.; Guillot, T.; Saiz, D.; Pichel, J.; Rabago, D.; Duch, M.; Grossi, C.; Luchkov, M.; Dangendorf, V.; et al. The Mapping of Alpha-Emitting Radionuclides in the Environment Using an Unmanned Aircraft System. In *Remote Sensing*, 2024; Vol. 16.
- (98) Lowdon, M.; Martin, P. G.; Hubbard, M. W. J.; Taggart, M. P.; Connor, D. T.; Verbelen, Y.; Sellin, P. J.; Scott, T. B. Evaluation of Scintillator Detection Materials for Application within Airborne Environmental Radiation Monitoring. *Sensors* 2019, 19 (18). DOI: 10.3390/s19183828.
- (99) Kumar, K.; Sundaram, G.; Sharma, B.; Venkatesh, S.; Thiruvengadathan, R. Advances in gamma radiation detection systems for emergency radiation monitoring. *Nuclear Engineering And Technology*, 2020; Vol. 52, pp 2151-2161.
- (100) Alam, M.; Nasim, S.; Hasan, S. Recent progress in CdZnTe based room temperature detectors for nuclear radiation monitoring. *Progress In Nuclear Energy*, 2021; Vol. 140.
- (101) Bolotnikov, A.; Camarda, G.; Chen, E.; Cheng, S.; Cui, Y.; Gul, R.; Gallagher, R.; Dedic, V.; De Geronimo, G.; Giraldo, L.; et al. CdZnTe position-sensitive drift detectors with thicknesses up to 5 cm. *Applied Physics Letters*, 2016; Vol. 108.
- (102) Sálek, O.; Matolín, M.; Gryc, L. Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry. *Journal Of Environmental Radioactivity*, 2018; Vol. 182, pp 101-107.
- (103) Munsie, T.; Beckman, B.; Fawkes, R.; Shippen, A.; Fairbrother, B.; Green, A. Unmanned air/ground vehicle survey following a radiological dispersal event. *Journal Of Field Robotics*, 2024.
- (104) Casanovas, R.; Prieto, E.; Salvadó, M. Calculation of the ambient dose equivalent H*(10) from gamma-ray spectra obtained with scintillation detectors. *Applied Radiation And Isotopes*, 2016; Vol. 118, pp 154-159.
- (105) Tsuda, S.; Saito, K. Spectrum-dose conversion operator of NaI(Tl) and CsI(Tl) scintillation detectors for air dose rate measurement in contaminated environments. *Journal Of Environmental Radioactivity*, 2017; Vol. 166, pp 419-426.
- (106) Grasty, R.; Walters, B.; Hovgaard, J.; LaMarre, J. Calibration of a 7.6 cm x 7.6 cm (3 inch x 3 inch) sodium iodide gamma ray spectrometer for air kerma rate. *Radiation Protection Dosimetry*, 2001; Vol. 94, pp 309-316.
- (107) Camp, A.; Vargas, A. Ambient Dose Estimation H10 From Labr₃(Ce) Spectra. *Radiation Protection Dosimetry*, 2014; Vol. 160, pp 264-268.
- (108) Knoll, G. F. *Radiation Detection and Measurement*; John Wiley & Sons, 2010.
- (109) Brovchenko, V.; Kirichenko, A.; Tsygankov, M. A circuit for external quenching of the discharge in the Geiger-Muller counter. *Instruments And Experimental Techniques*, 2002; Vol. 45, pp 175-177.
- (110) DiIanni, E. J. *Radiation Measuring Apparatus*. USA 1986.
- (111) Vagle, O.; Olsen, O.; Johansen, G. A simple and efficient active quenching circuit for Geiger-Muller counters. *Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors And Associated Equipment*, 2007; Vol. 580, pp 358-361.

- (112) Perazic, L.; Belic, C.; Arbutina, D. Application Of An Electronegative Gas As A Third Component Of The Working Gas In The Geiger-Mueller Counter. *Nuclear Technology & Radiation Protection*, 2018; Vol. 33, pp 268-274.
- (113) Geelen, S.; Camps, J.; Olyslaegers, G.; Schroeyers, W. Drone-borne dosimetry in a radiological or nuclear scenario. *Radiation Measurements*, 2024; Vol. 170.
- (114) Nakamura, H.; Shirakawa, Y.; Takahashi, S.; Shimizu, H. Evidence of deep-blue photon emission at high efficiency by common plastic. *EPL*, 2011; Vol. 95.
- (115) Knitel, M.; Dorenbos, P.; deHaas, J.; vanEijk, C. LiBaF₃, a thermal neutron scintillator with optimal n-gamma. *Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors And Associated Equipment*, 1996; Vol. 374, pp 197-201.
- (116) Combes, C.; Dorenbos, P.; van Eijk, C.; Krämer, K.; Güdel, H. Optical and scintillation properties of pure and Ce³-doped Cs₂LiYCl₆ and Li₃YCl₆:Ce³ crystals. *Journal Of Luminescence*, 1999; Vol. 82, pp 299-305.
- (117) Guss, P.; Stampahar, T.; Mukhopadhyay, S.; Barzilov, A.; Guckes, A. Scintillation properties of a Cs₂LiLa(Br₆)_{90%}(Cl₆)_{10%}:Ce³ (CLLBC) crystal. *Radiation Detectors: Systems And Applications Xv*, 2014; Vol. 9215.
- (118) Gong, P.; Tang, X. B.; Huang, X.; Wang, P.; Wen, L. S.; Zhu, X. X.; Zhou, C. Locating lost radioactive sources using a UAV radiation monitoring system. *Applied Radiation and Isotopes* 2019, 150, 1-13. DOI: 10.1016/j.apradiso.2019.04.037.
- (119) Briechle, S.; A., S.; Tretyak, O.; Antropov, V.; Molitor, N.; Krzystek, P. UAV-based Detection of Unknown radioactive Biomass Deposits in Chernobyl's Exclusion Zone. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2018, XLII-2, 163-169.
- (120) Vargas, A.; Costa, D.; Macias, M.; Royo, P.; Pastor, E.; Luchkov, M.; Neumaier, S.; Stöhlker, U.; Luff, R. Comparison of airborne radiation detectors carried by rotary-wing unmanned aerial systems. *Radiation Measurements*, 2021; Vol. 145.
- (121) Woodbridge, E.; Connor, D. T.; Verbelen, Y.; Hine, D.; Richardson, T.; Scott, T. B. Airborne gamma-ray mapping using fixed-wing vertical take-off and landing (VTOL) uncrewed aerial vehicles. *Frontiers in Robotics and Ai* 2023, 10. DOI: 10.3389/frobt.2023.1137763.
- (122) UNSCEAR. *Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami*; 2014.
- (123) IAEA. *The Fukushima Daiichi Accident*; GC(59)/14; International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 2014.
- (124) IAEA. *IAEA International Fact Finding Expert Mission of the Fukushima DAI-ICHI NPP Accident following the Great East Japan Earthquake and Tsunami*; Vienna, Austria, 2011.
- (125) Sanada, Y.; Sugita, T.; Nishizawa, Y.; Kondo, A.; Torii, T. The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Progress in Nuclear Science and Technology* 2014, 4, 76-80.
- (126) Kurihara, T.; Tanada, K.; Kataoka, J.; Hosokoshi, H.; Mochizuki, S.; Tagawa, L.; Okochi, H.; Gotoh, Y. Precision spectroscopy of cesium-137 from the ground to 150 m above in Fukushima. *Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors And Associated Equipment*, 2020; Vol. 978.
- (127) Ochi, K.; Barker, E.; Nakama, S.; Gleizes, M.; Manach, E.; Faure, V.; Sanada, Y. Comparative Study of Radiation Mapping Technologies for Nuclear Disaster Assessment. *Journal Of Disaster Research*, 2024; Vol. 19, pp 429-445.
- (128) Connor, D. T.; Wood, K.; Martin, P. G.; Goren, S.; Megson-Smith, D.; Verbelen, Y.; Chyzhevskiy, I.; Kiriciev, S.; Smith, N. T.; Richardson, T.; et al. Radiological Mapping of Post-Disaster Nuclear Environments Using Fixed-Wing Unmanned Aerial Systems: A Study From Chornobyl. *Frontiers in Robotics and Ai* 2020, 6. DOI: 10.3389/frobt.2019.00149.
- (129) MacFarlane, J.; Payton, O.; Keatley, A.; Scott, G.; Pullin, H.; Crane, R.; Smilion, M.; Popescu, I.; Curlea, V.; Scott, T. Lightweight aerial vehicles for monitoring, assessment and mapping of radiation anomalies. *Journal Of Environmental Radioactivity*, 2014; Vol. 136, pp 127-130.
- (130) IAEA. *Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, 2003.
- (131) Ohera, M.; Gryc, L.; Novakova, M.; Cespirova, I.; Sas, D. Application of unmanned aerial vehicles in emergency radiation monitoring. *Radiation Measurements*, 2024; Vol. 174.

- (132) Zhang, S.; Liu, R.; Zhao, T. Mapping radiation distribution on ground based on the measurement using an unmanned aerial vehicle. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2018; Vol. 193, pp 44-56.
- (133) Sasaki, M.; Ishizaki, A.; Sanada, Y. Development of analysis method for airborne radiation monitoring using the inverse problem solutions. *Progress in Nuclear Science and Technology* 2019, 6, 63-67.
- (134) Sasaki, M.; Sanada, Y.; Katengeza, E.; Yamamoto, A. New method for visualizing the dose rate distribution around the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant using artificial neural networks. *Scientific Reports*, 2021; Vol. 11.
- (135) Leong, A.; Skvortsov, A. Estimation of scalar field distribution in the Fourier domain. *Digital Signal Processing*, 2024; Vol. 145.
- (136) Zhou, Y.; Gao, A.; Yan, S.; Xiong, Z. A new equivalent radiation source method for the reconstruction of nuclear radiation field. *Annals of Nuclear Energy* 2024, 206.
- (137) Gupta, A.; Fernando, X. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) and Data Fusion in Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Challenges. *Drones*, 2022; Vol. 6.
- (138) Martin, P.; Kwong, S.; Smith, N.; Yamashiki, Y.; Payton, O.; Russell-Pavier, F.; Fardoulis, J.; Richards, D.; Scott, T. 3D unmanned aerial vehicle radiation mapping for assessing contaminant distribution and mobility. *International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation*, 2016; Vol. 52, pp 12-19.
- (139) Östmark, H.; Wallin, S.; Ang, H. Vapor Pressure of Explosives: A Critical Review. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2012; Vol. 37, pp 12-23.
- (140) Furton, K. G.; Myers, L. J. The scientific foundation and efficacy of the use of canines as chemical detectors for explosives. *Talanta* 2001, 54 (3), 487-500. DOI: 10.1016/s0039-9140(00)00546-4.
- (141) Mören, L.; Bergström, F.; Brantlind, M.; Wingfors, H. Rapid changes in profiles from stored materials used in scent training of explosive detection dogs. *Science & Justice*, 2022; Vol. 62, pp 657-665.
- (142) Mäkinen, M.; Nousiainen, M.; Sillanpää, M. Ion Spectrometric Detection Technologies For Ultra-Traces Of Explosives: A Review. *Mass Spectrometry Reviews*, 2011; Vol. 30, pp 940-973.
- (143) McDougall, J. L.; Simkins, R. J. *Identification of Traces of Explosives by Field Spot Tests*; Explosives Research and Development Establishment, Waltham Abbey, United Kingdom 1973.
- (144) McRae, D.; Haywood, W.; Powell, J.; Harris, B. *High Explosive Spot Test Analyses of Samples from Operable unit (OU) 1111*; LA-12753-MS; 1995.
- (145) Baytos, J. F. *Field spot-test kit for explosives*; LA-12071-MS; 1991.
- (146) Peters, K.; Corbin, I.; Kaufman, L.; Zreibe, K.; Blanes, L.; McCord, B. Simultaneous colorimetric detection of improvised explosive compounds using microfluidic paper-based analytical devices (μPADs). *Analytical Methods*, 2015; Vol. 7, pp 63-70.
- (147) Pellegrino, P. M.; Holthoff, E. L.; Farrell, M. E. *Laser-Based Optical Detection of Explosives*; CRC Press, 2015.
- (148) Küçük, M.; Geneci, I.; Özdemir, O.; Koz, A.; Esentürk, O.; Çetin, Y.; Alatan, A. Ground-Based Hyperspectral Image Surveillance System for Explosive Detection: Methods, Experiments, and Comparisons. *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 2023; Vol. 16, pp 8747-8763.
- (149) Garroway, A.; Buess, M.; Yesinowski, J.; Miller, J.; Krauss, R. Explosives Detection By Nuclear-Quadrupole Resonance (Nqr). *Cargo Inspection Technologies*, 1994; Vol. 2276, pp 139-149.
- (150) Barras, J.; Gaskell, M.; Hunt, N.; Jenkinson, R.; Mann, K.; Peddar, D.; Shilstone, G.; Smith, J. Detection of ammonium nitrate inside vehicles by Nuclear Quadrupole Resonance. *Detection Of Bulk Explosives: Advanced Techniques Against Terrorism*, 2004; Vol. 138, pp 125-125.
- (151) Singh, S.; Singh, M. Explosives detection systems (EDS) for aviation security. *Signal Processing*, 2003; Vol. 83, pp 31-55.
- (152) Liu, H.; Chen, Y.; Bastiaans, G.; Zhang, X. Detection and identification of explosive RDX by THz diffuse reflection spectroscopy. *Optics Express*, 2006; Vol. 14, pp 415-423.
- (153) Robledo, L.; Carrasco, M.; Mery, D. A survey of land mine detection technology. *International Journal Of Remote Sensing*, 2009; Vol. 30, pp 2399-2410.

- (154) Garcia-Fernández, M.; López, Y.; Andrés, F. Airborne Multi-Channel Ground Penetrating Radar for Improvised Explosive Devices and Landmine Detection. *IEEE Access*, 2020; Vol. 8, pp 165927-165943.
- (155) Cha, K.; Oh, S.; Hong, H.; Park, H.; Hong, S. Detection of Electronic Devices Using FMCW Nonlinear Radar. *Sensors*, 2022; Vol. 22.
- (156) Czipott, P.; Iwanowski, M. Magnetic sensor technology for detecting mines, UXO, and other concealed security threats. *Terrorism And Counterterrorism Methods And Technologies*, 1997; Vol. 2933, pp 67-76.
- (157) Moulder, W.; Krieger, J.; Majewski, J.; Coldwell, C.; Nguyen, H.; Maurais-Galejs, D.; Anderson, T.; Dufilie, P.; Herd, J.; IEEE. Development of a High-Throughput Microwave Imaging System for Concealed Weapons Detection. *2016 IEEE International Symposium On Phased Array Systems And Technology (Past)*, 2016.
- (158) Gurton, K.; Felton, M. Detection of disturbed earth using passive LWIR polarimetric imaging. *Polarization Science And Remote Sensing IV*, 2009; Vol. 7461.
- (159) Reigber, A.; Scheiber, R.; Jäger, M.; Prats-Iraola, P.; Hajnsek, I.; Jagdhuber, T.; Papathanassiou, K.; Nannini, M.; Aguilera, E.; Baumgartner, S.; et al. Very-High-Resolution Airborne Synthetic Aperture Radar Imaging: Signal Processing and Applications. *Proceedings Of The IEEE*, 2013; Vol. 101, pp 759-783.
- (160) Kaya, S.; Leloglu, U. Buried and Surface Mine Detection From Thermal Image Time Series. *IEEE Journal Of Selected Topics In Applied Earth Observations And Remote Sensing*, 2017; Vol. 10, pp 4544-4552.
- (161) Guicheteau, J.; Tripathi, A.; Hung, K.; Roese, E.; Wilcox, P.; Moon, R.; Emmons, E. Portable Chemical Fingerprint Identification System (PCFIS). *Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, And Explosives (CBRNE) Sensing XXIII*, 2022; Vol. 12116.
- (162) Languirand, E. R. Low-level anomaly detection for trace explosives using the threat anomaly detection (ThreAD) analysis. *Proc. of SPIE* 2023, 12541. DOI: 10.1117/12.2662854.
- (163) Begus, S.; Jazbinsek, V.; Pirnat, J.; Trontelj, Z. A miniaturized NQR spectrometer for a multi-channel NQR-based detection device. *Journal Of Magnetic Resonance*, 2014; Vol. 247, pp 22-30.
- (164) Bechtel, T.; Truskavetsky, S.; Pochanin, G.; Capineri, L.; Sherstyuk, A.; Viatkin, K.; Byndych, T.; Ruban, V.; Varyanitzia-Roschupkina, L.; Orlenko, O.; et al. Characterization of Electromagnetic Properties of In Situ Soils for the Design of Landmine Detection Sensors: Application in Donbass, Ukraine. *Remote Sensing*, 2019; Vol. 11.
- (165) Baur, J. Ukraine is Riddled with Land Mines: Drones and AI Can Help. *IEEE Spectrum* 2024, 61, 42-49.
- (166) Hutsul, T.; Khobzei, M.; Tkach, V.; Krulikovskiy, O.; Moisiuk, O.; Ivashko, V.; Samila, A. Review of approaches to the use of unmanned aerial vehicles, remote sensing and geographic information systems in humanitarian demining: Ukrainian case. *Heliyon*, 2024; Vol. 10.
- (167) Yoo, L.; Lee, J.; Lee, Y.; Jung, S.; Choi, Y. Application of a Drone Magnetometer System to Military Mine Detection in the Demilitarized Zone. *Sensors*, 2021; Vol. 21.
- (168) Poliachenko, I.; Kozak, V.; Bakhmutov, V.; Cherkes, S.; Varava, I. Preliminary results of UAV magnetic surveys for unexploded ordnance detection in Ukraine: effectiveness and challenges. *Geofizicheskij Zhurnal-Geophysical Journal*, 2023; Vol. 45, pp 126-140.
- (169) Parrott, E.; Panter, H.; Morrissey, J.; Bezombes, F. A Low Cost Approach to Disturbed Soil Detection Using Low Altitude Digital Imagery from an Unmanned Aerial Vehicle. *Drones*, 2019; Vol. 3.
- (170) Nagy, M.; Bauer, P.; Hiba, A.; Gáti, A.; Drotár, I.; Lattes, B.; Kisari, A. The Forerunner UAV Concept for the Increased Safety of First Responders. *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems (Vehits)* 2021, 362-369. DOI: 10.5220/0010408203620369.
- (171) Cook, Z.; Zhao, L.; Lee, J.; Yim, W.; Ieee. Unmanned Aerial System for First Responders. In *12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, Goyang, SOUTH KOREA, Oct 28-30, 2015; 2015; pp 306-310.
- (172) Janik, P.; Zawistowski, M.; Fellner, R.; Zawistowski, G. Unmanned Aircraft Systems Risk Assessment Based on SORA for First Responders and Disaster Management. *Applied Sciences-Basel* 2021, 11 (12). DOI: 10.3390/app11125364.

- (173) Halbgewachs, M.; Angermann, L.; Wieland, M.; Kippnich, U.; Lechner, K.; Ieee. Using Uav Data To Improve The Situational Awareness For First Responders In Disaster Management: The Example Of Flooding In The Ahr Valley, Germany. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Pasadena, CA, Jul 16-21, 2023; 2023; pp 934-937. DOI: 10.1109/igarss52108.2023.10283061.
- (174) Lega, M.; Kosmatka, J.; Ferrara, C.; Russo, F.; Napoli, R. M. A.; Persechino, G. Using Advanced Aerial Platforms and Infrared Thermography to Track Environmental Contamination. *Environmental Forensics* 2012, 13 (4), 332-338. DOI: 10.1080/15275922.2012.729002.
- (175) Beg, A.; Qureshi, A. R.; Sheltami, T.; Yasar, A. UAV-enabled intelligent traffic policing and emergency response handling system for the smart city. *Personal and Ubiquitous Computing* 2021, 25 (1), 33-50. DOI: 10.1007/s00779-019-01297-y.
- (176) Ferreira, J.; Aspelin, M.; Clicques, V. *International report on best practices in robotics*; IEDO, <https://www.iedo-drone.org/home>, 2022.
- (177) Nguyen, M.; Nguyen, C.; Do, H.; Hua, H.; Tran, T.; Nguyen, A.; Ala, G.; Viola, F. UAV-Assisted Data Collection in Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey. *Electronics*, 2021; Vol. 10.
- (178) Nguyen, M.; Teague, K.; Rahnavard, N. CCS: Energy-efficient data collection in clustered wireless sensor networks utilizing block-wise compressive sensing. *Computer Networks*, 2016; Vol. 106, pp 171-185.
- (179) Niculescu, V.; Palossi, D.; Magno, M.; Benini, L. Fly, Wake-up, Find: UAV-based Energy-efficient Localization for Distributed Sensor Nodes. *Sustainable Computing- Informatics & Systems*, 2022; Vol. 34.
- (180) Lv, C.; Yang, L.; Zhang, X.; Li, X.; Wang, P.; Du, Z. Unmanned Aerial Vehicle-Based Compressed Data Acquisition for Environmental Monitoring in WSNs. *Sensors*, 2023; Vol. 23.
- (181) Cariou, C.; Moiroux-Arvis, L.; Pinet, F.; Chanet, J. Data Collection from Buried Sensor Nodes by Means of an Unmanned Aerial Vehicle. *Sensors*, 2022; Vol. 22.
- (182) Holtorf, L.; Titov, I.; Daschner, F.; Gerken, M. UAV-Based Wireless Data Collection from Underground Sensor Nodes for Precision Agriculture. *Agriengineering*, 2023; Vol. 5, pp 338-354.
- (183) Bernier-Vega, A.; Barton, K.; Olson, I.; Rodriguez, J.; Cantu, G.; Ozcelik, S. Remote Data Acquisition Using UAVs and Custom Sensor Node Technology. *Drones*, 2023; Vol. 7.

