



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Ψηφιακός Πολιτισμός, Έξυπνες Πόλεις, IoT και Προηγμένες Ψηφιακές
Τεχνολογίες»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	Υποστήριξη υπηρεσιών διαχείρισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης με χρήση UAV (Unmanned Aerial Vehicles) σε περιβάλλοντα Έξυπνων Πόλεων Supporting emergency management services using UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) in Smart City environments
Ονοματεπώνυμο Φοιτητή	ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ ΚΑΡΑΔΗΜΗΤΡΗΣ
Πατρώνυμο	ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
Αριθμός Μητρώου	ΨΠΟΛ21021
Επιβλέπων	Σκόνδρας Εμμανουήλ, Διδάσκων ΠΜΣ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Δρ. Σκόνδρας
Εμμανουήλ
Διδάσκων ΠΜΣ

Δημήτριος
Δ. Βέργαδος
Καθηγητής

Δρ. Κωνσταντίνα
Σιούντρη
Διδάσκουσα ΠΜΣ

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Λέξεις-κλειδιά.....	5
Abstract	6
1. Εισαγωγή.....	7
1.1 Σχετικές εργασίες	9
1.1.1 Εφαρμογές UAV σε Έξυπνες Πόλεις.....	9
1.1.2 Ευφυείς Μεταφορές και Διαχείριση Κυκλοφορίας	10
1.1.3 Συνεργασία UAV–IoT και Συλλογή Δεδομένων	10
1.1.4 Ασφάλεια, Ιδιωτικότητα και Παρακολούθηση	10
1.1.5 Συγκριτική Αξιολόγηση Ερευνητικών Εργασιών	10
1.1.6 Σύνοψη Βιβλιογραφικής Επισκόπησης	13
1.2 Συνεισφορά της εργασίας	13
2. Επισκόπηση της συνεργασίας drones και IoT.....	14
2.1 Έξυπνα drones.....	15
2.2 Drone, ICT και IoT για έξυπνες πόλεις	16
2.2.1 Drones και RFID.....	17
2.2.2 Drones και αισθητήρες	17
2.2.3 Drones και 5G.....	19
3. Θέματα ιδιωτικότητας και ασφάλειας στη συνεργασία drones και IoT	22
4. Συνεργασία drone και IoT για ενεργειακή απόδοση	28
5. Συλλογή δεδομένων σε έξυπνες πόλεις με χρήση συνεργασίας drones και IoT.....	29
6. Συνεργασία drones και IoT για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής..	34
7. Συνεργατικά drones και IoT για τη δημόσια ασφάλεια στις έξυπνες πόλεις.....	36

8. Συνεργασία drone και IoT για διαχείριση καταστροφών	39
9. Εφαρμογές συνεργασίας drones και IoT	41
9.1 Υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και διαχείριση καταστροφών	45
9.2 Συλλογή δεδομένων	46
9.3 Παρακολούθηση της κυκλοφορίας	46
9.4 Παρακολούθηση πλήθους και ασφάλεια.....	47
9.5 Fog computing.....	47
9.6 Συζήτηση και μελλοντικές κατευθύνσεις.....	48
9.7 Σύνοψη της βιβλιογραφικής επισκόπησης.....	51
10. Μελέτη περίπτωσης: Αλγόριθμος επιλογής δικτύου για την υποστήριξη υπηρεσιών drone σε αρχιτεκτονικές δικτύων 5G	51
10.1 Στόχος και πλαίσιο της μελέτης	51
10.2 Ερευνητικό πλαίσιο.....	52
10.3 Ο αλγόριθμος DTFT-ACW όπως έχει προταθεί στη βιβλιογραφία...	53
10.4 Ρύθμιση και αποτελέσματα προσομοίωσης	57
11. Συμπεράσματα	70
Παράρτημα: Κατάλογος συντομογραφιών	71
Βιβλιογραφία	72

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει τη συνεργασία έξυπνων drones και Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) ως βασικό μηχανισμό ενίσχυσης της λειτουργικότητας των έξυπνων πόλεων. Αρχικά παρουσιάζεται μια συνθετική βιβλιογραφική επισκόπηση των κυριότερων εφαρμογών της συνεργασίας αυτής, με έμφαση στην ενεργειακή απόδοση, τη συλλογή δεδομένων, την ασφάλεια και ιδιωτικότητα, τη δημόσια ασφάλεια, τη διαχείριση καταστροφών και τη βελτίωση της ποιότητας ζωής. Στη συνέχεια, η εργασία εστιάζει σε μια μελέτη περίπτωσης που αφορά την επιλογή δικτύου σε αρχιτεκτονικές 5G για υπηρεσίες drone, μέσα από τη μελέτη του αλγορίθμου DTFT-ACW, όπως αυτός έχει προταθεί στη σχετική επιστημονική βιβλιογραφία. Με τον τρόπο αυτό, το κείμενο συνδέει το γενικό θεωρητικό πλαίσιο των έξυπνων πόλεων με ένα συγκεκριμένο παράδειγμα εφαρμογής σε περιβάλλον 5G, προσφέροντας μια πιο ολοκληρωμένη και συνεκτική αποτίμηση του αντικειμένου.

Λέξεις-κλειδιά

έξυπνες πόλεις, smart drones, IoT, 5G, δημόσια ασφάλεια, διαχείριση καταστροφών, συλλογή δεδομένων, ενεργειακή απόδοση, επιλογή δικτύου, DTFT-ACW

Abstract

This thesis examines the collaboration between smart drones and the Internet of Things (IoT) as a key mechanism for enhancing the functionality of smart cities. Initially, a comprehensive literature review is presented, highlighting the main applications of this collaboration, with emphasis on energy efficiency, data collection, security and privacy, public safety, disaster management, and the improvement of quality of life.

Subsequently, the study focuses on a case study concerning network selection in 5G architectures for drone services, through the analysis of the DTFT-ACW algorithm, as proposed in the relevant scientific literature. In this way, the thesis connects the general theoretical framework of smart cities with a specific application example in a 5G environment, providing a more complete and coherent evaluation of the subject.

Keywords

smart cities, smart drones, IoT, 5G, public safety, disaster management, data collection, energy efficiency, network selection, DTFT-ACW

1. Εισαγωγή

Στο πλαίσιο των έξυπνων πόλεων, η μέτρηση της ευφυΐας σχετίζεται με την ποιότητα ζωής, την υγιονομική περιήθηση, τη δημόσια ασφάλεια, τη διαχείριση καταστροφών, τις περιβαλλοντικές πτυχές (όπως η ενεργειακή απόδοση, η ποιότητα του αέρα, η παρακολούθηση της κυκλοφορίας κ.λπ.) και τις υπηρεσίες. Επομένως, οι προηγμένες και σύγχρονες τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ICT), η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και η ρομποτική παίζουν σημαντικό ρόλο για να γίνουν οι πόλεις πιο έξυπνες. Αυτές οι τεχνολογίες συμβάλλουν στη βελτίωση των υποδομών των έξυπνων πόλεων και καθιστούν δυνατές τις έξυπνες υπηρεσίες προκειμένου να βελτιωθεί η συνολική ποιότητα ζωής των κατοίκων. Μια σημαντική πτυχή των έξυπνων πόλεων είναι η παροχή αποτελεσματικών υποδομών και η μείωση του κόστους των υπηρεσιών, καθιστώντας παράλληλα αυτές τις υπηρεσίες και εγκαταστάσεις πανταχού παρούσες. Πρόσφατα, έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες για την ενίσχυση των χαρακτηριστικών των έξυπνων πόλεων σε διαφορετικούς τομείς και διαφορετικές πτυχές και με έμφαση στη βιωσιμότητα [1-7]. Ένα κοινό στοιχείο που υπάρχει σε όλες αυτές τις μελέτες είναι το γεγονός ότι απαιτείται αποτελεσματική ενσωμάτωση έξυπνων υπηρεσιών και λύσεων ICT. Πιο πρόσφατα, η τεχνολογία drone συνέβαλε σημαντικά στο να γίνει μια πόλη πιο έξυπνη. Επί του παρόντος, είναι δύσκολο να φανταστεί κανείς μια έξυπνη πόλη χωρίς υπηρεσίες drone [8].

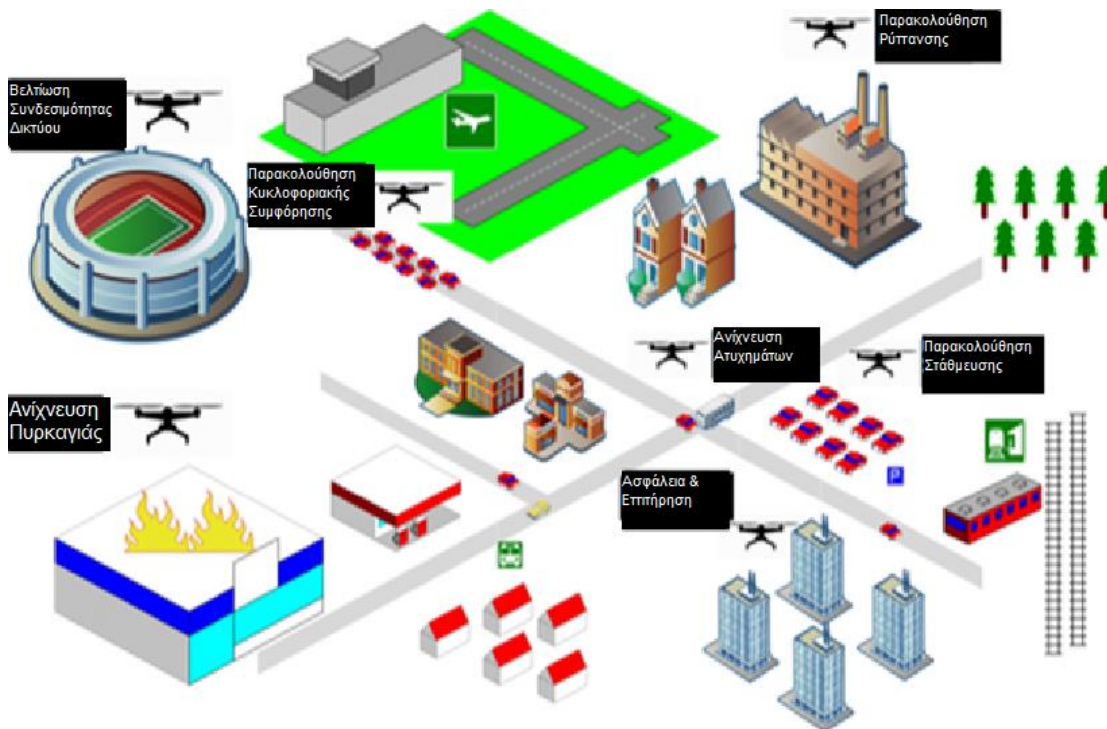
Τα drones είναι αυτόνομα ρομπότ που πετούν στον ουρανό και συνδέονται με διαφορετικές εφαρμογές στην κοινωνία των πολιτών, όπως η επικοινωνία, οι μεταφορές, η γεωργία, η ασφάλεια και η προστασία, η μείωση καταστροφών, η προστασία του περιβάλλοντος, η συλλογή πληροφοριών, η επιτήρηση και οι επιχειρήσεις αναγνώρισης. Τα drones είναι έτοιμα να γίνουν αναπόσπαστο μέρος των έξυπνων πόλεων και να βελτιώσουν τη συνολική εμπειρία ζωής με την έννοια της παρακολούθησης της ρύπανσης, της διερεύνησης ατυχημάτων, της πυρόσβεσης, της παράδοσης πακέτων, της υποστήριξης δραστηριοτήτων πρώτων ανταποκριτών, της παράδοσης φαρμάκων, της παρακολούθησης της κυκλοφορίας και της εποπτείας εργοταξίων. Η τεχνολογία των drones μπορεί να οδηγήσει περαιτέρω σε τεράστια δευτερεύοντα οφέλη, όπως η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, η εξοικονόμηση πόρων, η μείωση της ρύπανσης, η πρόσβαση σε επικίνδυνες περιοχές και περιοχές καταστροφών και η αύξηση της ετοιμότητας για καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Η πρόοδος στις τεχνολογίες στον τομέα των αισθητήρων, της επεξεργασίας δεδομένων και των επαναφορτιζόμενων μπαταριών έχει κάνει τα drones πιο προσιτά. Τα drones μπορούν επίσης να λειτουργήσουν ως εναέριος σταθμός βάσης (BS) για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας (τόσο uplink όσο και downlink) για τους συνδρομητές στο έδαφος. Η ευελιξία και η οπτική επαφή (LoS) είναι τα χαρακτηριστικά που έχουν κάνει τα drones να διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στο πλαίσιο του Internet of Things (IoT).

Η έλευση του IoT επέτρεψε σημαντικές προόδους σε εφαρμογές έξυπνων πόλεων όπως έξυπνα σπίτια, έξυπνοι δρόμοι, έξυπνος χώρος στάθμευσης, έξυπνα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας κ.λπ. Η κύρια ιδέα του IoT είναι ότι όλα μπορούν να συνδεθούν και να επικοινωνήσουν μέσω του Διαδικτύου, για παράδειγμα, smartphones, κτίρια, οικιακές συσκευές, οχήματα, ακόμη και φυσικά αντικείμενα, δημιουργώντας έναν έξυπνο κόσμο και τεράστια παγκόσμια υποδομή για μια κοινωνία που βασίζεται στην πληροφορία. Η ανάπτυξη τέτοιων εφαρμογών έχει καταστεί κρίσιμη για τον τρόπο ζωής μας, την οικονομία και το περιβάλλον. Εκτός από την οικονομική ανάπτυξη, η συνολική ανάπτυξη μιας γεωγραφικής ενότητας καθοδηγείται επίσης από πράσινες τεχνολογίες που προστατεύουν το περιβάλλον από επιβλαβείς εκπομπές και επικίνδυνα απόβλητα, διατηρούν τους φυσικούς πόρους, μετρίζουν τις συνέπειες της κλιματικής αλλαγής και μειώνουν τη ρύπανση και την κατανάλωση ενέργειας. Ένας τεράστιος αριθμός συσκευών IoT που μπορούν να συνεργάζονται, να επικοινωνούν και να μοιράζονται πληροφορίες, είναι ο απαραίτητος για τις σύγχρονες υποδομές έξυπνων πόλεων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι απαιτείται μεγάλος αριθμός διασυνδεδεμένων συσκευών, η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους και οι στρατηγικές εξοικονόμησης ενέργειας καθίστανται

όλο και πιο κρίσιμες [9-11]. Η εξισορρόπηση φορτίου διαδραματίζει επίσης ζωτικό ρόλο στη βελτίωση της διάρκειας ζωής του δικτύου μειώνοντας την υπερκατανάλωση ενέργειας από έξυπνες συσκευές.

Τα drones μπορούν να κινηθούν δυναμικά προς τις συσκευές IoT και να συλλέξουν δεδομένα, να δημιουργήσουν μια σύνδεση σε πραγματικό χρόνο, να επεξεργαστούν τα δεδομένα και να μεταδώσουν πληροφορίες στους κόμβους συλλογής ή σε άλλες συσκευές [12]. Η αποτελεσματική ανάπτυξη και κινητικότητα των drones για τη συλλογή δεδομένων από συσκευές IoT στο έδαφος με ελάχιστη ισχύ μετάδοσης και βελτιωμένη αξιοπιστία επικοινωνίας και συνδεσιμότητα διερευνήθηκαν στο [13, 14]. Αναφέρθηκε ότι η μεταδιδόμενη ισχύς του IoT μπορεί να μειωθεί κατά 45%, αυξάνοντας παράλληλα την απόδοση σε μέγιστο ποσοστό 28% [13]. Επίσης, σε μια άλλη σχετική εργασία, ένα drone θεωρήθηκε το ενδιάμεσο λογισμικό για ενεργειακά αποδοτική ανακάλυψη στα δίκτυα IoT και αισθητήρων [15]. Η προτεινόμενη τεχνική παρείχε ένα αποδοτικό ενεργειακό μοντέλο για να προσφέρει λύσεις δικτύου IoT και αισθητήρων. Επιπλέον, οι Motlagh και συν. [16] πρότειναν μια τεχνική διεύθυνσης μεταξύ πολλαπλών δικτύων 4G για τη διασφάλιση αξιοπιστής συνδεσιμότητας έξυπνων συσκευών με drones, η οποία υποστηρίζει υψηλή ποιότητα υπηρεσιών (QoS) και καταναλώνει αποδεκτή ποσότητα ενέργειας. Οι Mozaffari και συν. [17] πρότειναν μια τεχνική πολλαπλών συστάδων συσκευών IoT, όπου κάθε σύμπλεγμα εξυπηρετείται από ένα ή περισσότερα drone. Λόγω της χρήσης drones, η μεταδιδόμενη ισχύς των συσκευών IoT μειώθηκε κατά 56% σε σύγκριση με τη σταθερή μέθοδο ανάπτυξης Voronoi. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα drones χρησιμοποιήθηκαν για την ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης επειδή το εύρος μετάδοσης των συσκευών IoT ήταν περιορισμένο [18]. Επιπλέον, το συνεργατικό ασύρματο δίκτυο μεταξύ drones και συσκευών IoT διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην παροχή αποτελεσματικής λύσης στο πρόβλημα του βρόχου δρομολόγησης στα παραδοσιακά δίκτυα αισθητήρων και στην ενίσχυση της διάρκειας ζωής των αισθητήρων μέσω της βέλτιστης κατανομής του φορτίου. Ωστόσο, αυτές οι λύσεις βασίζονται στη διαμόρφωση ενός βέλτιστου σχήματος τοπολογίας και δρομολόγησης για την αξιοποίηση του συντονισμού μεταξύ των drones και του ασύρματου δικτύου αισθητήρων (WSN).

Εν συντομία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 1, μια συνεργασία μεταξύ drones και IoT μπορεί να προσφέρει ευρείες εφαρμογές σε έξυπνες πόλεις, όπως η παρακολούθηση μεγάλων περιοχών, η επιτήρηση των συνόρων, η συλλογή δεδομένων, η δημόσια ασφάλεια, η διαχείριση καταστροφών και η αποφυγή εμποδίων [19]. Το σχήμα 1 δείχνει τη συνεργασία των drones και του IoT για διάφορες εφαρμογές έξυπνων πόλεων, όπως η συλλογή δεδομένων από συσκευές IoT για ενεργειακή απόδοση, η συλλογή δεδομένων ρύπανσης και η πρόβλεψη της ποιότητας του αέρα, η παρακολούθηση αθλητικών εκδηλώσεων, η δημιουργία 3D χαρτών υψηλής ανάλυσης, η παροχή ασφάλειας, η διαχείριση καταστροφών για τη διάσωση ανθρώπινων ζωών, η παροχή υπηρεσιών όπως τρόφιμα και αίμα σε πραγματικό χρόνο, και την παρακολούθηση ατυχημάτων και θυμάτων.



Εικόνα 1: Συνεργατικό drone και IoT για τη βελτίωση της ευφυΐας των έξυπνων πόλεων.

1.1 Σχετικές εργασίες

Η συνεργασία των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων (UAVs) και του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) έχει προσελκύσει σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια, καθώς προσφέρει νέες δυνατότητες για την ανάπτυξη και υποστήριξη υπηρεσιών σε περιβάλλοντα Έξυπνων Πόλεων. Η διεθνής βιβλιογραφία περιλαμβάνει πληθώρα μελετών που εξετάζουν εφαρμογές των UAVs στη συλλογή δεδομένων, στις ευφυείς μεταφορές, στη δημόσια ασφάλεια, στη διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, καθώς και στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των δικτύων IoT.

Οι υφιστάμενες ερευνητικές προσπάθειες μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: εφαρμογές UAV σε Έξυπνες Πόλεις, ευφυή συστήματα μεταφορών, συνεργασία UAV–IoT για συλλογή και μετάδοση δεδομένων, καθώς και ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας.

1.1.1 Εφαρμογές UAV σε Έξυπνες Πόλεις

Οι Mohammed et al. [24] παρουσίασαν τις δυνατότητες αξιοποίησης των UAVs σε περιβάλλοντα Έξυπνων Πόλεων, αναδεικνύοντας εφαρμογές που σχετίζονται με την παρακολούθηση αστικών υποδομών, τη διαχείριση κυκλοφορίας, την περιβαλλοντική παρακολούθηση και τη δημόσια ασφάλεια. Αντίστοιχα, οι Alsamhi et al. [21] διερεύνησαν τη χρήση UAVs σε συνδυασμό με τεχνολογίες IoT και Green IoT, υπογραμμίζοντας τη συμβολή τους στη βελτίωση της βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας των έξυπνων αστικών περιβαλλόντων.

Υποστήριξη υπηρεσιών διαχείρισης καταστάσεων
Έκτακτης ανάγκης με χρήση UAV
(Unmanned Aerial Vehicles)
σε περιβάλλοντα Έξυπνων Πόλεων

1.1.2 Ευφυείς Μεταφορές και Διαχείριση Κυκλοφορίας

Στον τομέα των ευφυών μεταφορών, οι Menouar et al. [23] πρότειναν την αξιοποίηση UAVs για τη συλλογή και διαχείριση πληροφοριών κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο, ενώ οι Alam et al. [20] ανέλυσαν εφαρμογές που αφορούν τη διαχείριση στάθμευσης, τη βελτιστοποίηση της κινητικότητας και την υποστήριξη συστημάτων μεταφορών στις Έξυπνες Πόλεις.

1.1.3 Συνεργασία UAV-IoT και Συλλογή Δεδομένων

Μία ιδιαίτερα σημαντική κατηγορία μελετών αφορά τη συνεργασία UAVs και IoT. Οι Motlagh et al. [25], [26] πρότειναν αρχιτεκτονικές στις οποίες τα UAVs λειτουργούν ως κινητοί κόμβοι συλλογής δεδομένων και παροχής υπηρεσιών IoT. Παράλληλα, οι Mozaffari et al. [17], [18] μελέτησαν τη χρήση UAVs για τη συλλογή δεδομένων από συσκευές IoT, επιτυγχάνοντας βελτιώσεις στην ενεργειακή αποδοτικότητα και στη συνολική απόδοση του δικτύου. Αντίστοιχα, οι Sharma et al. [15] εξέτασαν μηχανισμούς ενεργειακά αποδοτικής ανακάλυψης συσκευών σε περιβάλλοντα 5G IoT με χρήση UAVs.

1.1.4 Ασφάλεια, Ιδιωτικότητα και Παρακολούθηση

Η ασφάλεια και η προστασία προσωπικών δεδομένων αποτελούν κρίσιμες προκλήσεις για την υιοθέτηση των UAVs στις Έξυπνες Πόλεις. Οι Guvens et al. [22] ανέλυσαν φυσικές και κυβερνοαπειλές που σχετίζονται με τη χρήση UAVs, ενώ οι Vattapparamban et al. [28] επικεντρώθηκαν σε ζητήματα κυβερνοασφάλειας και προστασίας προσωπικών δεδομένων. Επιπλέον, οι Kim et al. [29] παρουσίασαν ένα πλαίσιο παρακολούθησης Έξυπνων Πόλεων με χρήση έξυπνων drones, το οποίο αξιοποιεί δεδομένα πραγματικού χρόνου για την ενίσχυση της επιχειρησιακής επίγνωσης.

1.1.5 Συγκριτική Αξιολόγηση Ερευνητικών Εργασιών

Για τη διευκόλυνση της συγκριτικής αξιολόγησης των σημαντικότερων ερευνητικών εργασιών, ο Πίνακας 1 παρουσιάζει συνοπτικά τις βασικές εφαρμογές, τα πλεονεκτήματα και τα ερευνητικά πεδία που εξετάζονται στη σχετική βιβλιογραφία. Η σύγκριση αυτή επιτρέπει την καλύτερη κατανόηση των κυριότερων τάσεων και ερευνητικών κατευθύνσεων που ακολουθούνται στον χώρο της συνεργασίας UAV και IoT.

Πίνακας 1: Σύγκριση των ερευνητικών εργασιών και της παρούσας εργασίας.

Βιβλιογραφία	ΔΤΠ (IoT)	Drone (Drones)	Drone & ΔΤΠ	Έξυπνες	Ασφάλεια & ιδιωτικότητα	Κατανάλωση ενέργειας	Συλλογή δεδομένων	Δημόσια ασφάλεια	Ποιότητα	Διαχείριση καταστροφών	Σημαντικά σημεία
[17] (2016)	*	*	*			*	*				Σμήνη drone για συλλογή

										δεδομένων από συσκευές ΔΤΠ.
[18] (2016)	*	*	*			*	*			Συνδεσιμότητα drone και συσκευών ΔΤΠ.
[24] (2018)		*		*						Ενσωματωμένα drone σε έξυπνες πόλεις.
[23] (2017)		*		*					*	Έξυπνες μεταφορές με χρήση drone για μια έξυπνη πόλη.
[26] (2016)	*	*	*							Αρχιτεκτονική drone για παροχή υπ-πηρεσιών ΔΤΠ.
[21] (2018)	*			*		*			*	Τεχνολογίες που επιτρέπουν τη μείωση της ρύπανσης, της κατανάλωσης ενέργειας και της χρήσης πόρων του Δ.Π.
[20] (2018)	*			*			*		*	Διαχείριση κυκλοφορίας σε έξυπνες πόλεις.
[25] (2017)	*	*	*	*			*		*	Πλατφόρμα ΑΤΠ βασισμένη σε drone για επιτήρηση πλήθους σε έξυπνες πόλεις.
[29] (2018)		*					*			Παρακολούθηση έξυπνων πόλεων βασισμένη σε έξυπνα drone.
[32] (2016)	*	*	*	*			*	*		Συνεργασία μεταξύ drone και ΔΤΠ για τη δημόσια ασφάλεια σε έξυπνες πόλεις.
[33] (2016)	*			*			*			Συνεργασία μεταξύ του υπολογιστικού νέφους (fog cloud) συσκευών Δ.Π.

[34] (2016)	*	*	*	*				*	*	*	Drone που συνδέουν συσκευές ΑΤΠ σε εφαρμογές έξυπνων πόλεων.
[8] (2014)											Εφαρμογές και ευκαιρίες για drone σε έξυπνες πόλεις.
[28] (2016)		*		*	*			*			Χρήση drone για την ιδιωτικότητα, την κυβερνοασφάλεια και τη δημόσια ασφάλεια στο μέλλον των έξυπνων πόλεων.
[35] (2013)				*	*						Ενίσχυση της ιδιωτικότητας των πολιτών σε έξυπνες πόλεις.
[36] (2014)		*		*	*						Έλεγχοι drone, συν-ρύθμιση, αυτορ-ρύθμιση και τυπικοί νόμοι για διάφορες εφαρμογές.
[37] (2017)	*			*	*		*				Ενοποίηση διαφόρων τεχνολογιών για την ενεργοποίηση έξυπνων πόλεων όπως ς το ΔΤΠ, το υπολογιστικό νέφος και οι τεχνολογίες δικτύων επικοινωνίας.
[38] (2018)				*	*						Προκλήσεις ιδιωτικότητας και ασφάλειας σε έξυπνες πόλεις.
[39] (2018)	*	*	*	*	*		*		*		Ασφάλιση και αποκέντρωση της συμπε-ρυφοράς ομήγους drone για έξυπνες πόλεις

[21] (2018)	*	*		*		*	*		*	Τεχνολογία που επιτρέπει το "πράσινο" ΑτΠ για να κάνει τις έξυπνες πόλεις εξυπνότερες και πιο οικολογικές.
Αυτή η εργασία	*	*	*	*	*	*	*	*	*	Συνεργατικά drone και ΔτΠ για τη βελτίωση της εξυπνάδας των έξυπνων πόλεων.

1.1.6 Σύνοψη Βιβλιογραφικής Επισκόπησης

Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1, η συνεργασία UAV και IoT αποτελεί έναν ιδιαίτερα δυναμικό και ταχέως αναπτυσσόμενο ερευνητικό τομέα με εφαρμογές σε πολλούς τομείς των Έξυπνων Πόλεων. Οι περισσότερες μελέτες εστιάζουν στη συλλογή δεδομένων, στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας, στη δημόσια ασφάλεια και στη διαχείριση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Παρά τη σημαντική πρόοδο που έχει επιτευχθεί, εξακολουθούν να υπάρχουν ανοικτά ζητήματα που αφορούν την ασφάλεια των επικοινωνιών, την προστασία της ιδιωτικότητας, τη διαχείριση ετερογενών δικτύων και τη βέλτιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων. Οι προκλήσεις αυτές αναδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω έρευνας και ανάπτυξης στον συγκεκριμένο τομέα.

1.2 Συνεισφορά της εργασίας

Η κύρια συμβολή αυτής της εργασίας είναι η παροχή μιας ολοκληρωμένης επισκόπησης των συνεργατικών drones και των εφαρμογών IoT για έξυπνες πόλεις. Για το σκοπό αυτό, η προσέγγιση είναι να συγκεντρωθούν οι διαθέσιμες ερευνητικές συνεισφορές από την αραιή βιβλιογραφία σχετικά με το IoT που βασίζεται σε drone, η οποία αντιμετωπίζει τις εφαρμογές, τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες των συνεργασιών drone με πλαίσια IoT για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις έξυπνες πόλεις. Η παρούσα εργασία επιδιώκει να προσφέρει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της συνεργασίας UAV και IoT σε περιβάλλοντα Έξυπνων Πόλεων, αναδεικνύοντας εφαρμογές, προκλήσεις και ερευνητικές προοπτικές, καθώς και παρουσιάζοντας μια μελέτη περίπτωσης επιλογής δικτύου σε περιβάλλον 5G. Επίσης, επισημαίνουμε τις δυνατότητες του drone για την παροχή υπηρεσιών IoT από τον ουρανό. Προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος αυτής της εργασίας, εξετάζουμε τα ακόλουθα βασικά θέματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2:

- Στην ενότητα II, παρουσιάζουμε μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της συνεργασίας των drones και του IoT.
- Στην ενότητα III, παρέχουμε μια συζήτηση για θέματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας, καθώς και πολλά υποσχόμενες λύσεις που σχετίζονται με τη συνεργασία των drones και του IoT για την ενίσχυση της ευφυΐας των έξυπνων πόλεων.
- Στην ενότητα IV, συζητάμε πώς οι συνεργασίες μεταξύ drones και συσκευών IoT θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και την αύξηση της εξυπνάδας και του πρασίνου των έξυπνων πόλεων.

- Στην ενότητα V, περιγράφουμε τον κρίσιμο ρόλο της συνεργασίας μεταξύ drones και IoT στη συλλογή δεδομένων. Η συλλογή έξυπνων δεδομένων και η επεξεργασία επί του σκάφους σε πραγματικό χρόνο διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην ενίσχυση των εφαρμογών έξυπνης πόλης.
- Στην ενότητα VI, επισημαίνουμε πώς οι συνεργασίες IoT και drone θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής ελέγχοντας τους κινδύνους ρύπανσης των έξυπνων πόλεων.
- Στην ενότητα VII, συζητάμε θέματα που σχετίζονται με τη δημόσια ασφάλεια στις έξυπνες πόλεις και καθορίζουμε πώς μπορεί να βοηθήσει μια συμφωνία συνεργασίας μεταξύ drones και IoT.
- Στην ενότητα VIII, παρουσιάζουμε τη συνεργασία των drones και του IoT για τη διαχείριση καταστροφών σε έξυπνες πόλεις.
- Στην ενότητα IX, παρέχουμε μια περίληψη των εφαρμογών της συνεργασίας drone και IoT για έξυπνες πόλεις.
- Τέλος, η συζήτηση και οι μελλοντικές κατευθύνσεις επισημαίνονται στο τμήμα X



Εικόνα 2: Συνεισφορές στην έρευνα.

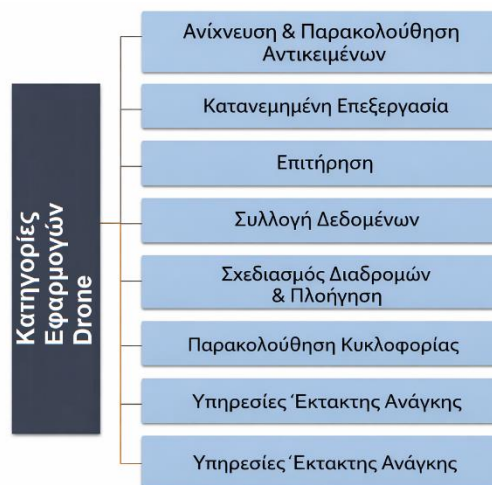
2. Επισκόπηση της συνεργασίας drones και IoT

Η συνεργασία μεταξύ προηγμένων τεχνολογιών αφορά την ανταλλαγή πληροφοριών για την εκτέλεση κοινών εργασιών αποτελεσματικά και αποδοτικά σύμφωνα με τις ανάγκες. Τα οφέλη και οι εφαρμογές των drones στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες παρουσιάστηκαν από τους Mozaffari και συν. στο [27]. Ως εκ τούτου, η συνεργασία συσκευών IoT για την ανίχνευση δεδομένων οδηγεί σε αύξηση της ακρίβειας της συλλογής δεδομένων αξιοποιώντας την ομοιότητα της λήψης δεδομένων από πολλαπλές συσκευές IoT [40]. Η συνεργασία εντός του νέφους ομίχλης των συσκευών IoT συζητήθηκε από τους Chiang και Zhang [33]. Οι Mohammed και συν. [8] παρουσίασαν τις εφαρμογές, τις προκλήσεις και τις ευκαιρίες για drones σε έξυπνες πόλεις. Συζητήθηκαν διάφορες προκλήσεις, όπως η ιδιωτικότητα, η ασφάλεια και η ηθική χρήση. Επιπλέον, τα θέματα της ασφάλειας στον

κυβερνοχώρο, της δημόσιας ασφάλειας και της ιδιωτικής ζωής των drones για έξυπνες πόλεις συζητήθηκαν από τους Vattapparamban και συν. [28].

2.1 Έξυπνα drones

Ένα drone έχει μοναδικά χαρακτηριστικά. Είναι δυναμικό, εύκολο στην επισκευή, εύκολο στην ανάπτυξη και ικανό να μετρήσει πλήθος ποσοτήτων από οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή. Είναι μια χαμηλού κόστους λύση για τη συλλογή και παράδοση πληροφοριών σε έξυπνους μηχανισμούς/λογισμικό ικανό να εκτελέσει την απαιτούμενη ανάλυση δεδομένων (όπως ανάλυση εικόνας ή βίντεο σε πραγματικό χρόνο). Η χρήση του drone θα διευκολύνει δραματικά την ανάπτυξη της γεωργίας, της άμυνας, της ασφαλιστικής επιθεώρησης, της επιβολής του νόμου, της βοήθειας έκτακτης ανάγκης, της παρακολούθησης της ρύπανσης, της αποκατάστασης καταστροφών, της παράδοσης δεμάτων και πολλών άλλων βιομηχανιών. Ως εκ τούτου, τα drones διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη σύνδεσή μας με την κοινωνία, καθώς και στη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις έξυπνες πόλεις. Ο αριθμός των drones στον αέρα αναμένεται να αυξηθεί ραγδαία τα επόμενα χρόνια. Τα drones έχουν τεράστιες δυνατότητες να επιτρέψουν πολλές εφαρμογές που σχετίζονται με στρατιωτικές, πολιτικές, κυβερνητικές και εμπορικές πτυχές, λόγω της ικανότητάς τους να εκτελούν πολύπλοκα καθήκοντα αποτελεσματικά και αποδοτικά σε πραγματικό χρόνο. Ο Jensen [41] εισήγαγε το φαινόμενο των drones και την πιθανή εφαρμογή του για έξυπνες πόλεις. Διερεύνησε τα ζητήματα συνδεσιμότητας που σχετίζονται με τα drones για έξυπνες πόλεις και συζήτησε πώς τα drones θα ενισχύσουν τις εφαρμογές έξυπνων πόλεων, όπως η παρακολούθηση, η επιτήρηση και η ανίχνευση αντικειμένων. εφαρμογή κατανεμημένης επεξεργασίας γενικού σκοπού· συλλογή δεδομένων; σχεδιασμός διαδρομής· ναυσιπλοΐα; και πρόληψη συγκρούσεων, όπως φαίνεται στην εικόνα 3. Επιπλέον, οι Alsamhi και συν. [42] συζήτησαν τη σύγκλιση διαφόρων τεχνικών μηχανικής μάθησης για τον σχεδιασμό διαδρομών αποτελεσματικά και αποδοτικά για την ενίσχυση της συνδεσιμότητας, της κινητικότητας και του QoS.



Εικόνα 3: Κατηγορίες εφαρμογών drone.

Μια ομάδα drones αντιπροσωπεύει ένα σύμπλεγμα που χρησιμοποιεί την τεχνολογία Flying Ad-hoc NETwork (FANET) για επικοινωνία μεταξύ των μελών του, καθώς και για την ανταλλαγή

δεδομένων που συλλέγονται (από τις συσκευές IoT επί του σκάφους) με άλλες συσκευές IoT στο έδαφος. Χρησιμοποιώντας τις εγγενείς ιδιότητες της ικανότητας, της κινητικότητας και της ευελιξίας, τα drones μπορούν να ενισχύσουν αποτελεσματικά το QoS των κυψελοειδών δικτύων 5G. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί για τη βελτίωση της ασύρματης χωρητικότητας και κάλυψης σε προσωρινές εκδηλώσεις όπως ο αθλητισμός, η αποκατάσταση καταστροφών, η παρακολούθηση του εγκλήματος κ.λπ. [43]. Τα drones έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για να επιτρέπουν την επικοινωνία όταν τα παραδοσιακά ασύρματα δίκτυα καταστρέφονται για την υποστήριξη δραστηριοτήτων ανακούφισης από καταστροφές [44]. Ομοίως, οι Merwaday και Guvenç [45] διερεύνησαν τη χρήση ενός drone BS ως προσωρινού σταθμού κατά τη διάρκεια μιας επιχείρησης ανακούφισης από καταστροφές. Εκτός από το έργο [44, 45], οι Bor-Yaliniz και Yanikomeroglu [46] οραματίστηκαν ένα κυψελοειδές δίκτυο drone το οποίο είναι ικανό να φέρει την παράδοση ασύρματων δικτύων οπουδήποτε με βάση τη ζήτηση και ανά πάσα στιγμή. Οι Kim και Lee [47] θεώρησαν το drone ως κόμβο νεροχύτη σε ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνίας για τη συλλογή δεδομένων από αισθητήρες. Διερευνήθηκε επίσης η βελτιστοποίηση της περιοχής εξυπηρέτησης του δικτύου drone.

Ένα ωφέλιμο φορτίο drone μπορεί να περιέχει έναν ενσωματωμένο υπολογιστή και αισθητήρες συνδεδεμένους με άλλες συσκευές, οι οποίοι επιτρέπουν στους ανθρώπους να το ελέγχουν. Επιπλέον, μπορεί να προγραμματιστεί για να εκτελεί εργασίες και να πετάει σύμφωνα με την καθοδήγηση των εσωτερικών του συστημάτων. Επίσης, μπορεί να ελεγχθεί με τη χρήση απομακρυσμένων υπολογιστών για την εκτέλεση των καθηκόντων φυσικής ασφάλειας και γεωργίας. Τα drones μπορούν επίσης να παρέχουν αποτελεσματική βοήθεια για την παρακολούθηση της αποψίλωσης των δασών και την παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων όπως η ποιότητα του αέρα και του νερού. Επιπλέον, μικρές συσκευές εντοπισμού, οι οποίες μπορούν να παρακολουθούνται μέσω drones, χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση και την ποσοτικοποίηση απειλούμενων ειδών.

Τα έξυπνα drones πρέπει να σχεδιαστούν για να επιτύχουν τη σύγκλιση τεσσάρων πτυχών που είναι τα δεδομένα, η συνδεσιμότητα, οι υπηρεσίες και ο τύπος των συσκευών που χρησιμοποιούνται. Τα έξυπνα drones χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των εργασιών των πρώτων ανταποκριτών, την τεκμηρίωση σκηνών ατυχημάτων και την παρακολούθηση εργοταξίων και, ως εκ τούτου, τα drones είναι έτοιμα να γίνουν αναπόσπαστο μέρος του δικτύου των έξυπνων πόλεων. Υποσχόμενα μια συνδεδεμένη κοινωνία και φθηνή αποθήκευση, επεξεργασία και ρομποτική, τα drones ανοίγουν το δρόμο προς μια επανάσταση στις έξυπνες πόλεις.

2.2 Drone, ICT και IoT για έξυπνες πόλεις

Οι τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών (ICT) έχουν εξελιχθεί σε ένα ποικίλο οικοσύστημα, το οποίο συνδυάζει ρομπότ, αισθητήρες, τεχνολογίες επικοινωνίας, λογισμικό, ανθρώπους και επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο. Για παράδειγμα, το Άμστερνταμ χρησιμοποιεί τις ICT για τη διατήρηση ενός βιώσιμου τρόπου ζωής, ενώ το Λονδίνο χρησιμοποιεί τις ICT για την επεξεργασία των αποβλήτων και τη διασφάλιση της ορθής χρήσης των πόρων. Επιπλέον, οι ICT διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη βελτίωση των έξυπνων πόλεων, αλλά οι προκλήσεις στον τομέα της ασφάλειας πρέπει να αντιμετωπιστούν λόγω του εγγενούς μέρους τους στις ICT [48-50]. Η τεχνολογία drone είναι το μέλλον του IoT και αναμένεται να προσφέρει μια επανάσταση στις εξελίξεις και τις εφαρμογές του IoT, ειδικά στις έξυπνες πόλεις. Μερικοί ερευνητές θεωρούν ακόμη ότι το drone είναι μια βασική συσκευή IoT [51,52]. Επιπλέον, οι συσκευές IoT έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση των δυνητικών καθηκόντων των μη επανδρωμένων αεροσκαφών σμήνους για την παροχή αυτόνομης συνεργασίας [53]. Με την πρόοδο στις ΤΠΕ, το IoT παρουσιάζει υψηλό δυναμικό για την ενίσχυση της οικονομικής και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας [9]. Αυτές οι θερμές και πράσινες τεχνολογίες, όπως οι επικοινωνίες μηχανής προς μηχανή (M2M), οι αισθητήρες, τα RFID, τα κυψελοειδή δίκτυα

5G κ.λπ., καθιστούν τις πόλεις πιο πράσινες και πιο έξυπνες [14]. Μια αξιολόγηση του αντίκτυπου των ICT σε σημαντικά ζητήματα που αφορούν το περιβάλλον (π.χ. κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές CO₂) παρουσιάστηκε στο [21, 54].

2.2.1 Drones και RFID

Η RFID θεωρείται ένα από τα πιο ελπιδοφόρα συστήματα ασύρματης επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται για την ενεργοποίηση του IoT. Επιπλέον, δεν χρειάζεται LoS και μπορεί να χαρτογραφήσει τον πραγματικό κόσμο σε έναν οπτικό χάρτη πολύ εύκολα [55]. Οι συσκευές RFID μπορούν να ταξινομηθούν ως παθητικές και ενεργητικές [55]. Η RFID διαδραματίζει ζωτικό ρόλο που βοηθά τον κόσμο να είναι πιο πράσινος μειώνοντας τις εκπομπές του οχήματος, εξοικονομώντας ενέργεια και βελτιώνοντας τη διάθεση αποβλήτων κ.λπ. Η μείωση του μεγέθους των ετικετών RFID και η παραγωγή ενεργειακά αποδοτικών αλγορίθμων για τη βελτιστοποίηση της εκτίμησης ετικετών απαιτούνται για την πράσινη RFID [55-59].

Ο Hubbard και συν. [60] συζήτησαν τον συνδυασμό τεχνολογιών drone και RFID και επικεντρώθηκαν στην ενίσχυση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας drone και της εμβέλειας ανίχνευσης αναγνώστη RFID. Το πλεονέκτημα του συνδυασμού drones και RFID είναι η παροχή πρόσθετων πληροφοριών που μπορούν να εφαρμοστούν σε συστήματα διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας. Ομοίως, οι Allegretti και Bertoldo [61] πρότειναν μια ανάλυση σκοπιμότητας για το πώς είναι δυνατόν να επαναφορτιστεί μια ετικέτα RFID πολλαπλών χρήσεων χρησιμοποιώντας ένα drone σε μια επιχείρηση περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Επιπλέον, η μελέτη των Greco και συν. [62] παρουσίασε μια λύση για την παρακολούθηση της λειτουργίας σε σκληρά περιβάλλοντα χρησιμοποιώντας RFID με drone. Πρότεινε ένα σύνολο ετικετών RFID που μπορούν να εξοπλιστούν με διάφορα σύνολα αισθητήρων και να διανεμηθούν στην περιοχή παρακολούθησης με έναν αναγνώστη εγκατεστημένο στο drone. Η κύρια ιδέα της χρήσης ενός drone είναι η συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες RFID που είναι διάσπαρτοι σε όλη την περιοχή, πλησιάζοντάς τους απευθείας, πετώντας πάνω τους και κατεβάζοντας δεδομένα μετρήσεων [62]. Προηγούμενα ευρήματα δείχνουν ότι το σύστημα λειτουργεί συνεκτικά και οι ετικέτες μπορούν να αποτελέσουν ισχυρά μέσα παρακολούθησης, ειδικά όταν η παρακολούθηση είναι απαραίτητη για μια μεγάλη περιοχή ή ένα σκληρό περιβάλλον. Οι Choi και συν. [63] μελέτησαν την τεχνική εντοπισμού εσωτερικού χώρου drone χρησιμοποιώντας παθητικά συστήματα RFID μακρινού πεδίου υπερυψηλής συχνότητας (UHF). Η μελέτη στόχευε στην επίτευξη απλής και οικονομικά αποδοτικής παρακολούθησης και εντοπισμού drone.

2.2.2 Drones και αισθητήρες

Ένας κόμβος αισθητήρων είναι ένας συνδυασμός ενός τεράστιου αριθμού μικρών συσκευών ανίχνευσης, πηγών ενέργειας, εξοπλισμού επεξεργασίας και μονάδας επικοινωνίας, ο οποίος έχει συζητηθεί λεπτομερώς από τους Prabhu και συν. [64]. Κόμβοι αισθητήρων αναπτύσσονται σε όλο τον κόσμο για τη μέτρηση τοπικών και παγκόσμιων περιβαλλοντικών συνθηκών. Έχουν περιορισμένη ισχύ και χαμηλή επεξεργασία καθώς και μικρή χωρητικότητα αποθήκευσης, ενώ ο κόμβος σταθμού βάσης (BS) είναι ισχυρός. Κάθε κόμβος αισθητήρα διαβάζει παραμέτρους όπως θερμοκρασία, ήχο, πίεση, υγρασία, επιτάχυνση κ.λπ. από το περιβάλλον του. Οι αισθητήρες επικοινωνούν επίσης μεταξύ τους και παρέχουν τα απαραίτητα αισθητηριακά δεδομένα στο BS χρησιμοποιώντας τεχνολογία ad-hoc. Οι Mehmood και Song [65] συζήτησαν την έξυπνη ενέργεια, τα

αποτελεσματικά πρωτόκολλα επικοινωνίας δρομολόγησης για το WSN σχετικά με τους συμβιβασμούς σχεδιασμού. Τα WSNs έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές σε έξυπνες πόλεις, όπως η πυρανίχνευση [66-68], η παρακολούθηση αντικειμένων [69-71], η περιβαλλοντική παρακολούθηση [72, 64, 73, 74], η δρομολόγηση και η εξισορρόπηση φορτίου [75, 76], οι εξελισσόμενοι περιορισμοί στον στρατό [77], ο έλεγχος και η παρακολούθηση της υγείας των μηχανών και η παρακολούθηση βιομηχανικών διεργασιών [64].

Η ιδέα του πράσινου IoT έχει προκύψει για τη διατήρηση των κόμβων αισθητήρων σε κατάσταση αναστολής λειτουργίας για το μεγαλύτερο μέρος της ζωής τους για εξοικονόμηση ενέργειας [78, 79]. Τα WSN μπορούν να πραγματοποιηθούν πολύ απλά όταν η επικοινωνία δεδομένων πραγματοποιείται σε εξαιρετικά χαμηλή ισχύ. Οι αισθητήρες μπορούν να χρησιμοποιήσουν ενέργεια που συλλέγεται απευθείας από το περιβάλλον, όπως ο ήλιος, οι δονήσεις, η κινητική ενέργεια, οι διαφορές θερμοκρασίας κ.λπ. [80-82]. Ως εκ τούτου, το πράσινο WSN είναι μια αναδυόμενη έννοια στην οποία η διάρκεια ζωής και η απόδοση μεγιστοποιούνται ενώ μειώνονται οι εκπομπές CO₂. Ο στόχος του WSN είναι να παρέχει επαρκή ενέργεια για να ενισχύσει τη διάρκεια ζωής του συστήματος και να συμβάλει στην αξιόπιστη/ισχυρή μετάδοση χωρίς να διακυβεύεται το συνολικό QoS. Οι Zhao και συν. [83] πρότειναν ένα σχήμα επιλογής διαδρομής δρομολόγησης QoS για ασύρματα κοινοτικά δίκτυα πλέγματος στο οποίο παρακολουθείται η ποιότητα του καναλιού και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας της επικοινωνίας στις έξυπνες πόλεις. Η μελέτη που περιγράφεται λεπτομερώς στο [11] πρότεινε μια μέθοδο βελτιστοποίησης για την εφαρμογή ενός ενεργειακά αποδοτικού και κλιμακούμενου IoT. Η τεχνική εισάγει έναν ιεραρχικό σχεδιασμό δικτύου, ένα μοντέλο για το ενεργειακά αποδοτικό IoT και έναν αλγόριθμο μετάδοσης ελάχιστης κατανάλωσης ενέργειας για την εφαρμογή του βέλτιστου μοντέλου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η τεχνική είναι πιο ενεργειακά αποδοτική και ευέλικτη από την παραδοσιακή τεχνική WSN και κατά συνέπεια μπορεί να εφαρμοστεί για αποτελεσματική επικοινωνία στο πράσινο IoT.

Ομοίως, για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των WSNs, οι Yaacoub και συν. [84] διερεύνησαν μια τεχνική που έδειξε σημαντική βελτίωση στην εξοικονόμηση ενέργειας και μείωσε τις καθυστερήσεις. Εκτός από το έργο του [11, 84], η μελέτη των Rekha και Sekar [85] επικεντρώθηκε στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης, στην παράταση της διάρκειας ζωής του δικτύου, στη μείωση ορισμένων κόμβων αναμετάδοσης και στη μείωση του προϋπολογισμού του συστήματος για το πράσινο IoT. Το έργο υλοποιήθηκε σε τέσσερα στάδια. Αρχικά, δημιουργήθηκε ένα ιεραρχικό πλαίσιο συστήματος και τοποθετήθηκαν κόμβοι αισθητήρων/ενεργοποιητών, κόμβοι αναμετάδοσης και BS. Το δεύτερο βήμα ήταν η ομαδοποίηση κόμβων. Το τρίτο βήμα ήταν η δημιουργία ενός μοντέλου βελτιστοποίησης για την πραγματοποίηση του IoT, και τέλος, το τέταρτο βήμα ήταν ο υπολογισμός της ελάχιστης ενέργειας μεταξύ των κόμβων. Τα πορίσματα δείχνουν ότι η προτεινόμενη προσέγγιση είναι ευέλικτη, εξοικονομεί ενέργεια και είναι οικονομικά αποδοτική σε σύγκριση με το υφιστάμενο σύστημα ανάπτυξης των WSN. Επιπλέον, η μελέτη των Mahapatra και συν. [86] διερεύνησε την ασύρματη συγκομιδή ενέργειας, το σύστημα ραδιοφώνου αφύπνισης και την κωδικοποίηση ελέγχου σφαλμάτων για να επιτρέψει λύσεις για την ενίσχυση της απόδοσης των πράσινων WSNs μειώνοντας παράλληλα το αποτύπωμα άνθρακα τους.

Τα δίκτυα αισθητήρων IoT απαιτούνται για μεγάλο αριθμό αισθητήρων που αναπτύσσονται σε μεγάλες περιοχές. Η συλλογή δεδομένων από κάθε αισθητήρα σε ένα δίκτυο αισθητήρων που βασίζεται στο IoT είναι δύσκολη, καθώς παράγει έναν τεράστιο όγκο δεδομένων ανίχνευσης και απαιτεί από τα drones να ακολουθούν μεγάλες διαδρομές με αποτέλεσμα υψηλή κατανάλωση ενέργειας, υψηλότερες καθυστερήσεις, και έκθεση σε επικίνδυνα περιβάλλοντα. Ως εκ τούτου, η χρήση drones έχει προταθεί για δίκτυα αισθητήρων IoT. Για να ενισχυθεί η λειτουργικότητα των drones, οι Malaver και συν. [87] παρουσίασαν την ανάπτυξη της ενσωμάτωσης ενός WSN και ενός drone που τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια για να βελτιώσουν την ευελιξία τους για διαφορετικές εφαρμογές. Η συγκέντρωση CO₂ παρακολουθήθηκε επίσης σε πραγματικό χρόνο κατά τη συλλογή

δεδομένων χρησιμοποιώντας το ολοκληρωμένο σύστημα. Αυτό το σύστημα εφαρμόστηκε και συνιστάται για διάφορες εφαρμογές όπως η γεωργία, οι μεταλλευτικές μελέτες, οι πυρκαγιές θάμνων και οι ζωολογικές και βοτανικές μελέτες [88]. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε η τεχνική βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) για την ανάλυση δεδομένων που συλλέχθηκαν από το ολοκληρωμένο σύστημα [89]. Επίσης, συζητήθηκαν τα δεδομένα συλλογής με χαμηλή ισχύ και μεγάλη περιοχή κάλυψης με τη χρήση συγκεκριμένου ολοκληρωμένου συστήματος [72].

Κατά τη διάρκεια μιας διαδικασίας συλλογής δεδομένων, τα δεδομένα μπορούν να ακολουθήσουν δύο διαδρομές. Πρώτον, τα δεδομένα μπορούν να μεταδοθούν από τους αισθητήρες στο έδαφος στο αερομεταφερόμενο drone. Στη συνέχεια, αυτά τα δεδομένα αποστέλλονται από το drone στον κεντρικό σταθμό ανάλυσης. Η κατανομή εύρους ζώνης και η κατανομή ενέργειας για την ανίχνευση και μετάδοση δεδομένων στα δύο στάδια εξετάστηκαν και συζητήθηκαν από τους Zhanjie και συν. [90]. Ως εκ τούτου, ο συνδυασμός drones και WSNs μπορεί να δώσει λύση για την αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων. Τα drones έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν τη λειτουργία του κόμβου δικτύου αισθητήρων (sleep ή active) για ενεργειακή απόδοση. Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι η συνεργασία των WSN και των έξυπνων μη επανδρωμένων αεροσκαφών ήταν ενεργειακά αποδοτική, παρέχοντας καλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας [91].

2.2.3 Drones και 5G

Η πράσινη ασύρματη επικοινωνία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στο πράσινο IoT. Οι πράσινες επικοινωνίες και δικτύωση αναφέρονται σε βιώσιμες, ενεργειακά ευαίσθητοποιημένες, ενεργειακά αποδοτικές και περιβαλλοντικά εξοπλισμένες τεχνολογίες. Η ιδέα ενός πράσινου δικτύου επικοινωνίας αναφέρεται σε χαμηλές εκπομπές CO₂, χαμηλή έκθεση σε ακτινοβολία και ενεργειακή απόδοση. Οι Kouřitas και συν. [92] πρότειναν έναν γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποιημένο για την ανάπτυξη σχεδιασμού δικτύου, όπου τα ευρήματα έδειξαν σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και εξοικονόμηση κόστους και χαμηλή έκθεση στην ακτινοβολία. Στην ίδια κατεύθυνση, οι Naeem και συν. [93] συζήτησαν πώς να μεγιστοποιήσουν το ρυθμό δεδομένων και να ελαχιστοποιήσουν τις εκπομπές CO₂ στα γνωστικά WSNs. Ο καθορισμός ad-hoc δικτύων οχημάτων (VANET) έχει επίσης προταθεί για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας [94].

Οι διερευνηθείσες λεπτομέρειες της ενεργειακής απόδοσης των δικτύων κινητών επικοινωνιών 5G συζητήθηκαν από τρεις πτυχές θεωρητικών μοντέλων, τεχνολογικών εξελίξεων και εφαρμογών από τον Mao [95]. Όσον αφορά το δίκτυο επόμενης γενιάς (NGN), οι Abrol και συν. [96] παρουσίασαν τις επιρροές και τις αναπτυσσόμενες τεχνολογίες μαζί με την ανάγκη για ενεργειακή απόδοση. Η ανάγκη υιοθέτησης της ενεργειακής απόδοσης και μείωσης του αποτυπώματος άνθρακα είναι να εκπληρωθούν οι απαιτήσεις για αύξηση της χωρητικότητας, ενίσχυση του ρυθμού δεδομένων και παροχή υψηλού QoS για το NGN. Πολλοί τύποι έρευνας έχουν γίνει για την εξοικονόμηση ενέργειας με τη χρήση ηλιακής ενέργειας, και αυτοί έχουν επίσης οδηγήσει σε μια βελτιωμένη QoS [97-102]. Επιπλέον, έχει προταθεί ο αλγόριθμος προσαρμοστικού κύκλου λειτουργίας (UADC) βάσει χρησιμότητας για τη μείωση της καθυστέρησης, την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και την επιμήκυνση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας [103]. Το πρωτόκολλο μεταφοράς υπερκειμένου χρησιμοποιήθηκε για να βελτιώσει τη διάρκεια ζωής και να συντομεύσει την καθυστέρηση για την παροχή αξιόπιστης υπηρεσίας [104]. Η εφαρμογή τεχνικών επικοινωνίας που βασίζονται στην κωδικοποίηση δικτύου και αξιόπιστης αποθήκευσης αποδείχθηκε χρήσιμη για την εξοικονόμηση ενέργειας για το πράσινο IoT [105]. Η ενέργεια που καταναλώθηκε ελαχιστοποιήθηκε με τη χρήση δικτυωμένων κέντρων ομίχλης, του πρωτοκόλλου TCP/IP και της επικοινωνίας εντός ομίχλης [106].

Σήμερα, το 5G αναμένεται να επηρεάσει σημαντικά το περιβάλλον και τη ζωή μας, με τρόπο παρόμοιο με αυτό που υποσχέθηκε το IoT, για να το καταστήσει αποτελεσματικό και άνετο. Οι

εφαρμογές 5G και οι υπηρεσίες του για την κοινωνία μας περιλαμβάνουν την ηλεκτρονική υγεία, τη ρομποτική επικοινωνία, την αλληλεπίδραση ανθρώπων και ρομποτικής, τα μέσα ενημέρωσης, τις μεταφορές και την εφοδιαστική, την ηλεκτρονική μάθηση, την ηλεκτρονική διακυβέρνηση, τη δημόσια ασφάλεια, τα συστήματα αυτοκινήτων και βιομηχανίας κ.λπ. Οι Shojaifar και συν. [106] και οι Alsamhi και συν. [107] συζήτησαν τις έξυπνες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη ρομποτική επικοινωνία για την αποτελεσματική και αποδοτική εκτέλεση εργασιών. Οι Chan και συν. [108] ανέπτυξαν ένα σύνολο μοντέλων για την αξιολόγηση της φάσης χρήσης της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών CO₂ των υπηρεσιών ασύρματου τηλεπικοινωνιακού δικτύου.

Επιπλέον, οι Motlagh και συν. [16] πρότειναν μια τεχνική διεύθυνσης μεταξύ πολλαπλών δικτύων 4G για την εξασφάλιση αξιόπιστης και αποτελεσματικής συνδεσιμότητας μέσω drones, η οποία υποστηρίζει υψηλό QoS και καταναλώνει αποδεκτή ποσότητα ενέργειας. Οι Xu και συν. [109] πρότειναν ένα μόνο drone ως κινητό νεροχύτη, μαζί με ένα σύμπλεγμα κόμβων αισθητήρων, και επικεντρώθηκαν στη μείωση των καθυστερήσεων μηνυμάτων. Από την άλλη, δεδομένου ότι ο ενεργειακός εφοδιασμός με μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι περιορισμένος, τα πρωτόκολλα σε διάφορα επίπεδα αναμένεται να συμβάλουν στον οικολογικό προσανατολισμό του δικτύου [110]. Ως εκ τούτου, το drone είναι μια αναδυόμενη και χρήσιμη τεχνική για την παροχή ασύρματων υπηρεσιών στους χρήστες στο έδαφος και είναι προσοδοφόρα για εφαρμογές που απαιτούν μεγάλη περιοχή κάλυψης και μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Τα πιο σημαντικά ζητήματα στο ετερογενές δίκτυο επόμενης γενιάς είναι η χωρητικότητα και η κάλυψη. Για να αυξηθεί η χωρητικότητα και η κάλυψη των ασύρματων δικτύων, οι Sharma και συν. [111] παρουσίασαν μια έξυπνη λύση χρησιμοποιώντας ένα drone για ακριβή και αποτελεσματική τοποθέτηση.

Οι Naqvi και συν. [112] συνόψισαν πολλές πτυχές της επικοινωνίας χρησιμοποιώντας drones. Διερεύνησαν την αυτοπροσαρμοζόμενη τεχνική κατανομής ισχύος για drones με βάση τον ελάχιστο ρυθμό δεδομένων και τις μέγιστες επιτρεπόμενες παρεμβολές. Επιπλέον, εισήχθη επίσης τεχνολογία που επιτρέπει τη χρήση ενός drone σε δίκτυο επικοινωνίας 5G. Τα ευρήματα έδειξαν ότι η τεχνολογία drone βοήθησε στη διατήρηση του QoS για όλους τους χρήστες στην περιοχή κάλυψης drone. Δόθηκε στατιστική διάδοση για την πρόβλεψη της απώλειας διαδρομής μεταξύ του drone και του επίγειου τερματικού σταθμού [113]. Οι Hourani και συν. [114] συζήτησαν επίσης την πρόβλεψη της απώλειας μονοπατιών με βάση το αστικό περιβάλλον. Οι Mozaffari και συν. [18] πρότειναν τη συνύπαρξη ενός drone με μια άλλη συσκευή IoT στο έδαφος με βάση το δίκτυο επικοινωνίας machine-to-machine (M2M).

Η ενσωμάτωση ενός drone και του WSN είναι μια χρήσιμη τεχνολογία για την αξιοποίηση των ενεργειακών πόρων [91, 115]. Εκτός από τη συνεργασία και την ενσωμάτωση των drones και του WSN, οι Zhan και συν. [116] εξέτασαν τις συνδέσεις επικοινωνίας μεταξύ drones και WSN για τη βελτιστοποίηση του προγραμματισμού και της τροχιάς των drones για την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας στο WSN κατά τη συλλογή δεδομένων. Η ιδέα υποστηρίχθηκε από μια μελέτη των Jawhar και συν. [117], η οποία αποκαλύπτει ότι η ενέργεια μετάδοσης μειώθηκε επειδή το drone είναι ικανό να κινείται διαδοχικά κοντά σε κάθε κόμβο των WSN και να συλλέγει δεδομένα από αυτά. Οι Rashed και συν. [118, 119] τόνισαν μια αντιστάθμιση μεταξύ της ελαχιστοποίησης του χρόνου λειτουργίας και της μεγιστοποίησης των καλυμμένων κόμβων για την επιλογή του συγκεκριμένου μοτίβου κινητικότητας. Αρκετές μελέτες του συνδυασμού προηγμένων τεχνολογιών όπως τα drones, οι ΤΠΕ και το IoT συνοψίζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Περίληψη σχετικά με τον συνδυασμό drone, ΤΠΕ, και IoT για έξυπνες πόλεις.

Βιβλιογραφία	Σημαντικά σημεία	Τεχνολογίες	Ιδεολογία
[60] (2016)	Βελτίωση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας του drone.	RFID και drone	Παροχή πρόσθετων πληροφοριών.
[61] (2015)	Επαναφόρτιση μιας ετικέτας RFID πολλαπλών χρήσεων χρησιμοποιώντας ένα drone στην περιβαλλοντική παρακολούθηση.	RFID και drone	Συνεχής συλλογή δεδομένων.
[62] (2015)	Παρακολούθηση λειτουργίας σε σκληρά περιβάλλοντα χρησιμοποιώντας RFID με ένα drone.	RFID και drone	Ισχυρά όργανα παρακολούθησης, ιδιαίτερα όταν η παρακολούθηση απαιτείται για μεγάλη περιοχή ή σκληρό περιβάλλον.
[63] (2012)	Εντοπισμός και παρακολούθηση drone.	RFID και drone	Οικονομική αποδοτικότητα και αποτελεσματικότητα.
[72] (2017)	Συλλογή δεδομένων με χαμηλή κατανάλωση και μεγάλη περιοχή κάλυψης.	Αισθητήρες και drone	Χαμηλή κατανάλωση και μεγάλη περιοχή κάλυψης.
[90] (2014)	Συλλογή δεδομένων από αισθητήρες.	Αισθητήρες και drone	Ενίσχυση του εύρους ζώνης και της κατανάλωσης ενέργειας.
[91] (2016)	Συνεργασία WSN και έξυπνου drone.	Αισθητήρες και drone	Διαχείριση της λειτουργίας του δικτύου κόμβων για την παροχή ενεργειακά αποδοτικής αναμετάδοσης, με στόχο τη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής του συστήματος.
[16] (2017)	Τεχνική διεύθυνσης μεταξύ πολλαπλών δικτύων 4G μέσω drones.	4G και drone	Αξιόπιστη και αποτελεσματική συνδεσιμότητα. Υψηλή QoS ενεργειακή απόδοση.
[109] (2016)	Drone ως κινητή καταβόθρα (sink) συστάδα κόμβων αισθητήρων.	Επικοινωνία	Μείωση καθυστερημένων μηνυμάτων.
[116] (2017)	Βελτιστοποίηση προγράμματος και τροχιάς drones κατά επικοινωνία με WSN.	Επικοινωνία	Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας του WSN κατά τη συλλογή δεδομένων.
[117] (2016)	Κίνηση διαδοχικά κοντά σε καθένα από	Επικοινωνία	Μείωση ενεργειακής απόδοσης.

	τα WSN και συλλογή δεδομένων.		
[112] (2018)	Πτυχές επικοινωνίας χρησιμοποιώντας drones.	Drone ως ενεργοποιητής (enabler) για τεχνολογία 5G	Ελάχιστος ρυθμός δεδομένων και μέγιστη επιτρεπόμενη παρεμβολή. Διατήρηση της QoS για όλους τους χρήστες στην περιοχή κάλυψης του drone.

3. Θέματα ιδιωτικότητας και ασφάλειας στη συνεργασία drones και IoT

Οι έξυπνες πόλεις δεν μπορούν να θεωρηθούν πραγματικά έξυπνες εκτός εάν οι ανησυχίες για την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα των χρηστών έχουν φτάσει σε αποδεκτό επίπεδο. Υπάρχουν αρκετές προκλήσεις όσον αφορά την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια που πρέπει να αντιμετωπιστούν για τη βελτίωση της ευφυΐας των έξυπνων πόλεων. Αρκετά ζητήματα προστασίας της ιδιωτικής ζωής και της ασφάλειας, λύσεις και προκλήσεις έχουν συζητηθεί για διαφορετικές εφαρμογές έξυπνων πόλεων στο [120,121]. Επιπλέον, οι Butt και Afzaal [121] προσδιόρισαν δύο τύπους μηχανισμών ασφαλείας στις έξυπνες πόλεις, την ασφάλεια λειτουργίας και την ασφάλεια δεδομένων, στους οποίους η ασφάλεια των ίδιων των δεδομένων εξαρτάται από την ασφάλεια των λειτουργιών. Επιπλέον, στο άρθρο των Zhang και συν. [120], εισήχθησαν εφαρμογές έξυπνης πόλης και συζητήθηκαν διάφορες προκλήσεις ασφαλείας, όπως η ασφαλής επεξεργασία πληροφοριών, η διαρροή απορρήτου και η αξιοπιστία στον έλεγχο. Οι Chakrabarty και Engels [122] εισήγαγαν τα ζητήματα ασφαλείας και απορρήτου στην ενσωμάτωση συσκευών IoT για έξυπνες πόλεις. Κρίθηκε απαραίτητο να διασφαλιστεί η ασφάλεια των τελικών χρηστών και οι πληροφορίες των ιδιωτικών και δημόσιων συστημάτων, όπως τα ευφυή δίκτυα και η έξυπνη κινητικότητα. Οι Gong και συν. [123] πρότειναν μια ομοιομορφική τεχνική κρυπτογράφησης για να εγγυηθούν την ασφάλεια μετάδοσης και να αξιολογήσουν το mobile edge computing επόμενης γενιάς. Επίσης, οι Eckhoff και Wagner [48] συζήτησαν τις περιοχές εφαρμογών, τους επιτιθέμενους και τις πηγές δεδομένων τους, την ιδιωτικότητα, τις τεχνολογίες ενεργοποίησης μιας έξυπνης πόλης.

Οι Parvez και συν. [49] εισήγαγαν τεχνικές μηχανικής μάθησης (ML) για την ασφάλεια του έξυπνου δικτύου. Για την προστασία της ιδιωτικής ζωής στις έξυπνες πόλεις, οι Eckhoff και Wagner [48] εισήγαγαν τις ταξινομίες της ιδιωτικής ζωής για διαφορετικές εφαρμογές, πιθανούς επιτιθέμενους, επιτρέποντας τεχνολογίες και πηγές δεδομένων για επιθέσεις. Επιπλέον, περιέγραψε τις υπάρχουσες τεχνολογίες βελτίωσης της ιδιωτικότητας σε πραγματικές έξυπνες πόλεις και συζήτησε τις λύσεις διαφόρων προκλήσεων. Οι Martínez-Ballesté και συν. [35] παρουσίασαν την έννοια της ιδιωτικής ζωής του πολίτη με βάση πέντε διαστάσεις *privacies*, δηλαδή ταυτότητα, τοποθεσία, ερώτημα, αποτύπωμα και ιδιοκτητή. Διάφορες τεχνολογίες προτάθηκαν και συνδυάστηκαν για την ενίσχυση της ιδιωτικής ζωής των πολιτών στις έξυπνες πόλεις. Οι διαστάσεις της ιδιωτικότητας των έξυπνων πόλεων παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Ιδιότητες απορρήτου.

Διαστάσεις απορρήτου	Εστίαση
Συναλλαγές	Προστασία ερωτημάτων και απαντήσεων
Κινητικότητα	Ασφάλιση συντεταγμένων τοποθεσίας
Επικοινωνίες	Προστασία καναλιών επικοινωνίας
Σωματική	Προστασία φυσικών πτυχών
Εδαφική	Προστασία προσωπικής παρουσίας και χώρου
Ταυτότητα	Προστασία προσωπικών δεδομένων που σχετίζονται με ένα άτομο

Οι έξυπνες πόλεις περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό συσκευών IoT, όπως αισθητήρες, κάμερες, ενεργοποιητές RFID, κ.λπ., οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων και τη μεταφορά των συλλεγόμενων δεδομένων μέσω προηγμένων τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας στο κέντρο δεδομένων (διακομιστής) επιτρέποντας την επεξεργασία δεδομένων και τη λήψη έξυπνων ενεργειών ανάλογα. Εκατομμύρια έξυπνες συσκευές IoT διανέμονται σε έξυπνες πόλεις για τη συλλογή δεδομένων από διαφορετικές εφαρμογές, αλλά αυτές οι συσκευές έχουν συνήθως περιορισμένη υπολογιστική ισχύ που οδηγεί σε αδύναμη κρυπτογραφία και ζητήματα στην ασφάλεια των δεδομένων. Τα δεδομένα που συλλέγονται περιλαμβάνουν το ιστορικό του περιβάλλοντος γύρω από τις συσκευές IoT. Με βάση τα δεδομένα που συλλέγονται, οι έξυπνες πόλεις μπορούν να παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο και οι έξυπνες υπηρεσίες μπορούν να παρέχονται ανάλογα με τις ανάγκες. Ωστόσο, τέτοια δεδομένα που συλλέγονται από διαφορετικές εφαρμογές έξυπνων πόλεων υπαγορεύουν την ανάγκη για ιδιωτικότητα και ασφάλεια, προκειμένου να ελεγχθούν οι εγκαταστάσεις των έξυπνων πόλεων και η ζωή των ανθρώπων. Διαφορετικά, οποιαδήποτε παραβιασμένη συσκευή μπορεί να καταστήσει ευάλωτη ολόκληρη τη συλλογή δεδομένων.

Για να διατηρηθούν ασφαλείς οι συσκευές IoT σε έξυπνες πόλεις, θα πρέπει να βρίσκονται σε μέρη όπου τα άτομα χωρίς έλεγχο ταυτότητας δεν μπορούν να φτάσουν και να έχουν πρόσβαση. Επιπλέον, θα πρέπει να πραγματοποιείται έλεγχος ταυτότητας της υποδομής δικτύου IoT για τη συλλογή ή την αποστολή δεδομένων σε ένα συγκεκριμένο δίκτυο. Οι Gharaibeh και συν. [37] συζήτησαν την ενσωμάτωση διαφόρων τεχνολογιών για την ενεργοποίηση έξυπνων πόλεων όπως το IoT, το cloud computing και οι τεχνολογίες δικτύων επικοινωνίας. Επιπλέον, προσδιόρισαν τις τεχνικές που εφαρμόζονται για το απόρρητο και την ασφάλεια των δεδομένων που προστατεύονται από υποκείμενες συσκευές IoT σε έξυπνες πόλεις. Επιπλέον, οι Ijaz και συν. [38] επανεξέτασαν τις πτυχές ασφάλειας των έξυπνων πόλεων και εισήγαγαν προκλήσεις προστασίας της ιδιωτικής ζωής και ασφάλειας. Επικεντρώθηκαν στις μοναδικές προκλήσεις για τις εφαρμογές έξυπνων πόλεων, όπως τα έξυπνα δίκτυα, η έξυπνη κινητικότητα και το IoT. Προκειμένου να διατηρηθεί η ιδιωτικότητα και η ασφάλεια στις έξυπνες πόλεις, οι Didolkar και Zama [124] πρότειναν μια αρχιτεκτονική βασισμένη στο IoT και στην ad hoc κινητή τηλεφωνία δίκτυα (MANETs). Οι τρεις γενικές ιδιότητες δεδομένων που πρέπει να διασφαλίζονται για τις πληροφορίες που συλλέγονται σε έξυπνες πόλεις είναι η εμπιστευτικότητα, η ακεραιότητα και η διαθεσιμότητα (CIA) των δεδομένων [125]. Περισσότερες λεπτομέρειες παρέχονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4: Κατηγορίες επίθεσης σε έξυπνες πόλεις.

Κατηγορίες επίθεσης	Λειτουργία
Εμπιστευτικότητα	Επιθέσεις που σχετίζονται με την πρόσβαση σε πληροφορίες και τη μη εξουσιοδοτημένη παρακολούθηση
Ακεραιότητα	Επιθέσεις που: • Επιδιώκουν να παραβιάσουν το σύστημα • Καθιστούν το σύστημα μη αποδοτικό
Διαθεσιμότητα	Επιθέσεις που ρίχνουν το σύστημα

Μια έξυπνη πόλη δεν αφορά μόνο τις συνδεδεμένες συσκευές IoT και την κινητικότητα των οχημάτων και τα δίκτυά τους, αλλά περιέχει επίσης δυναμικές πτυχές όπως τα αυτόνομα drones. Συζητήθηκε η ασφάλεια των αυτόνομων μη επανδρωμένων αεροσκαφών κατά την εκτέλεση εργασιών πάνω από έξυπνες πόλεις [39]. Οι Cooley και συν. [39] πρότειναν το πρωτόκολλο SHARK για ασφαλή αυτόνομα και ετερογενή σμήνη drones για τη διασφάλιση της ασφάλειας των εφαρμογών σμήνους drones πάνω από έξυπνες πόλεις. Επίσης, οι Sharma και συν. [126] διερεύνησαν μια νέα λύση για την εξασφάλιση της ανταλλαγής πληροφοριών (και παρείχαν μια 3D απεικόνιση) μεταξύ σμήνους drones σε μια έξυπνη πόλη. Τα ευρήματα της προτεινόμενης τεχνικής έδειξαν την ικανότητα ασφάλειας της επικύρωσης ανταλλαγής πλαισίου drone και παρείχαν μια ασφαλή διαδρομή για συνεργασία drone με drone. Οι He και συν. [127] επικεντρώθηκαν στην εξέταση των πτυχών της ασφάλειας στον κυβερνοχώρο των δικτύων δημόσιας ασφάλειας με τη βοήθεια drone υπό το πρίσμα του γεγονότος ότι ευαίσθητα δεδομένα θα μπορούσαν να σταλούν μέσω του δικτύου drone. Τα ευρήματα έδειξαν ότι εξακολουθούν να υπάρχουν κίνδυνοι για την ασφάλεια και οι επιθέσεις. Πολλές μελέτες έχουν συζητήσει επιθέσεις διαδρομής drone όπως οι μελέτες των Javaid και συν. [128] και των Hartmann και Steup [129]. Ο Giray [130] συζήτησε την εξάρτηση των drones από το GPS που μπορεί να δεχθεί επίθεση και να οδηγήσει στην απώλεια του ελέγχου των drones. Για τις έξυπνες πόλεις, οι κυβερνοεπιθέσεις με drones μπορούν να χωριστούν στις κατηγορίες της αποκάλυψης, της γνώσης και της διαταραχής, όπως φαίνεται στην εικόνα 4. Υπάρχουν πολλά ζητήματα ασφάλειας που σχετίζονται με εφαρμογές drones σε έξυπνες πόλεις, όπως αεροπειρατεία drone, αλλαγές σημείων και παρεμβολές σημάτων.



Εικόνα 4: Βήματα μιας τυπικής κυβερνοεπίθεσης πολλαπλών βημάτων σε drones.

Με απεριόριστες πολιτικές εφαρμογές, τα drones χρειάζονται διάφορα επίπεδα χαρακτηριστικών ασφαλείας ανάλογα με τον τύπο της εφαρμογής. Μια μελέτη του Peacock [131] παρείχε λεπτομέρειες σχετικά με τα σφάλματα ασφαλείας σε εφαρμογές μη στρατιωτικών μη επανδρωμένων αεροσκαφών, όπως μη ασφαλές WiFi, ανοικτά προσβάσιμο Telnet κ.λπ. Επιπλέον, οι Pleban και συν. [132] τόνισαν τη σημασία της διασφάλισης των συνδέσεων επικοινωνίας με κρυπτογράφηση. Ταξινόμησαν τις απειλές σε δύο ομάδες: απειλές συσκευών και απειλές επικοινωνίας. Και οι δύο παραπάνω μελέτες διαπίστωσαν ότι τα πολιτικά drones δεν εφαρμόζουν κρυπτογραφικές τεχνικές για να εξασφαλίσουν τη σύνδεση μεταξύ του ελεγκτή εδάφους και των drones. Ως εκ τούτου, τα πολιτικά μη επανδρωμένα αεροσκάφη είναι επιρρεπή σε άρνηση σύνδεσης, απομακρυσμένη αεροπειρατεία, υποκλοπή βίντεο και πλήρη έλεγχο (κατάληψη) από τους αντιπάλους [131]. Οι Perazzo και συν. [133] πρότειναν την τεχνική σχεδιασμού διαδρομής verifierBee για την εξασφάλιση των θέσεων των drones και την εύρεση της συντομότερης διαδρομής. Επιπλέον, οι Altawy και Youssef [134] εισήγαγαν μελλοντικές κατευθύνσεις και προκλήσεις για την ασφάλεια, την προστασία και την ιδιωτικότητα των drones στις έξυπνες πόλεις.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η ασφάλεια των drones δεν περιλαμβάνει μόνο την ασφάλεια του καναλιού επικοινωνίας, του περιβάλλοντος των drones και της διαδρομής. Πρέπει επίσης να καταβληθούν προσπάθειες για την ασφάλεια του ελεγκτή, διότι είναι επίσης επιρρεπής σε επιθέσεις. Ο Clarke [36] επανεξέτασε τους ελέγχους των drones, την από κοινού ρύθμιση, την αυτορρύθμιση και τους επίσημους νόμους για διάφορες μορφές επιτήρησης. Εντόπισε επίσης το έλλειμμα του ρυθμιστικού πλαισίου. Δηλαδή, εάν ο ελεγκτής αποτύχει να χειριστεί την επίθεση, το συνολικό σύστημα επικοινωνίας drone θα είναι ανεξέλεγκτο. Έτσι, οι Cheon και συν. [135] πρότειναν μια αποτελεσματική γραμμική ομομορφική πιστοποιημένη τεχνική κρυπτογράφησης για τον έλεγχο πολλαπλών drones σε λειτουργία σε πραγματικό χρόνο για να διασφαλιστεί ότι πετούν αυτόνομα και Υποστήριξη υπηρεσιών διαχείρισης καταστάσεων
Έκτακτης ανάγκης με χρήση UAV
(Unmanned Aerial Vehicles)
σε περιβάλλοντα Έξυπνων Πόλεων

με ασφάλεια. Η προτεινόμενη τεχνική εξασφαλίζει ασφάλεια από επιθέσεις πλαστογραφίας και υποκλοπής και, ως εκ τούτου, εγγυάται την επιτυχή λειτουργία ενός ιπτάμενου ρομπότ πολλαπλών στροφείων. Επίσης, οι Altawy και Youssef [134] εισήγαγαν τα ζητήματα της ιδιωτικής ζωής, της ασφάλειας και της προστασίας στα πολιτικά μη επανδρωμένα αεροσκάφη. Επιπλέον, εντόπισαν τις εξέχουσες ιδιότητες των drones που απαιτούνται για ασφαλή λειτουργία.

Είναι ενδιαφέρον ότι το περιβάλλον Internet of Drones (IoD) αντιπροσωπεύει μια σημαντική και αναδυόμενη τεχνολογία που έχει τεράστιες πολιτικές εφαρμογές σε έξυπνες πόλεις λόγω της πρόσβασης σε δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και της ακρίβειας των δεδομένων. Αρκετά θέματα σχετικά με την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα του περιβάλλοντος IoD συζητήθηκαν στο [136-138]. Συνήθως δεν είναι συνετό να επιτρέπεται σε έναν χρήστη άμεση πρόσβαση στο IoD, καθώς αυτό θα έδινε στους χρήστες με κακόβουλες προθέσεις αρκετές πιθανότητες να επιτεθούν στο περιβάλλον IoD, για παράδειγμα, μέσω παρεμβολών, απόφραξης, και hacking [136]. Ως εκ τούτου, οι συγγραφείς συζήτησαν πώς ο χρήστης πρέπει να έχει πρόσβαση στα δεδομένα που συλλέγονται από το περιβάλλον IoD στον διακομιστή με ασφάλεια. Ο διακομιστής θα μπορούσε να τοποθετηθεί μεταξύ των drones και των χρηστών, έτσι ώστε οι χρήστες να μην έχουν άμεση πρόσβαση στα δεδομένα από ένα drone, αλλά μπορεί να γίνει μέσω του διακομιστή για την προστασία του περιβάλλοντος IoD από επιθέσεις. Ωστόσο, μερικές φορές, τα δεδομένα που συλλέγονται στον διακομιστή δεν είναι δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Ως εκ τούτου, ο χρήστης πρέπει να έχει πρόσβαση στα πραγματικά δεδομένα στο περιβάλλον drone, έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να λαμβάνει έξυπνες αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο για να σώσει τη ζωή των ανθρώπων κατά τη διάρκεια καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Έτσι, απαιτείται ο σχεδιασμός μιας αποτελεσματικής, ασφαλούς τεχνικής για τον έλεγχο ταυτότητας χρήστη στο IoD. Προτάθηκε μια τεχνική συμφωνίας κλειδιού ελέγχου ταυτότητας που επιτρέπει στους χρήστες να έχουν άμεση πρόσβαση στα περιβάλλοντα IoD [138]. Επιπλέον, οι Lin και συν. [137] παρείχαν πιθανές λύσεις για τη διαρροή της ιδιωτικής ζωής, την ευέλικτη προσβασιμότητα και την προστασία της εμπιστευτικότητας των δεδομένων, και συζήτησαν επίσης την αρχιτεκτονική που απαιτείται για τη συλλογή δεδομένων με ιδιωτικότητα και ασφάλεια στο περιβάλλον του IoD. Επίσης, οι Choudhary και συν. [139] πρότειναν ένα πλαίσιο ασφαλείας βασισμένο σε βαθιά νευρωνικά δίκτυα (DNN), το οποίο παρέχει εξαιρετικά ασφαλείς και αξιόπιστους μηχανισμούς για το IoD.

Η συνεργασία των drones και των τεχνολογιών IoT όπως RFID, M2M, WSN, cloud computing και προηγμένες τεχνολογίες επικοινωνίας επεκτείνει το ρόλο των συνεργατικών drones για πολλές εφαρμογές στις έξυπνες πόλεις. Οι Baig και συν. [140] ερεύνησαν τα τρωτά σημεία και τις σχετικές απειλές των έξυπνων πόλεων και εντόπισαν στοιχεία όπως συστήματα αυτοματισμού κτιρίων, έξυπνα δίκτυα, έξυπνα οχήματα και drones με τεχνολογίες IoT και cloud. Επίσης, οι Lagkas και συν. [52] συζήτησαν μια λύση για την ιδιωτικότητα και την ασφάλεια των εφαρμογών drone σε έξυπνες πόλεις που ενεργοποιούνται από το 5G και το IoT. Επιπλέον, εισήγαγαν τις προκλήσεις ασφάλειας και απορρήτου των συνεργατικών drones και του IoT, της ιδιωτικής ζωής από άκρο σε άκρο (E2E), της πρόληψης και της ασφάλειας σε πραγματικό χρόνο και του δυναμικού περιβάλλοντος IoT.

Η διασφάλιση της ασφάλειας από συνεργατικά drones και συσκευές IoT σε έξυπνες πόλεις είναι πολύπλοκα καθήκοντα λόγω της απαίτησης για αποτελεσματικό συνδυασμό διαφόρων τεχνικών που σχετίζονται με λειτουργίες drone και πτυχές δικτύωσης IoT. Η πολυπλοκότητα των συνεργατικών drones και των ρυθμίσεων IoT μπορεί να είναι τεράστια, με ανθρώπους και μηχανές να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους σε έξυπνες πόλεις μέσω των πολύπλοκων διαδικασιών του οικοσυστήματος [134]. Υπό το πρίσμα αυτό, οι πτυχές ασφάλειας του IoT μαζί με τα drones απαιτούν διαφορετικές τεχνικές για διαφορετικά επίπεδα, όπως η αντίληψη, σύνδεση, επίπεδο δικτύου και εφαρμογής.

Στο επίπεδο αντίληψης, οι απειλές για την ασφάλεια σχετίζονται κυρίως με την πιθανότητα φυσικής βλάβης, οπότε οι Altawy και Youssef [134], και Akram και συν. [141] πρότειναν τεχνικές υλικού που πρέπει να χρησιμοποιηθούν, όπως η προστασία από παραβίαση και τα συστήματα ανίχνευσης διάρρηξης. Ο Πίνακας 5 απεικονίζει τις διάφορες απειλές για την ασφάλεια και τους πόρους δεδομένων που χρειάζονται προστασία για συνεργασίες drone και IoT. Εδώ, η ασφάλεια περιλαμβάνει την εξουσιοδότηση των χρηστών να έχουν πρόσβαση σε δεδομένα που παράγονται από φυσικά αντικείμενα. Επιπλέον, η επικοινωνία E2E πρέπει να είναι παρούσα για να διασφαλιστεί η ασφάλεια χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές όπως η ψηφιακή υπογραφή και η ελαφριά κρυπτογραφία. Στην περίπτωση των συστημάτων ανίχνευσης, προτάθηκαν αποδείξεις συστέγασης για την αντιμετώπιση επιθέσεων δρομολόγησης από Granjal και συν. [142] και Gurulian και συν. [143]. Οι Gurulian και συν [143] συζήτησαν τις υπηρεσίες ασφαλείας που εφαρμόζονται στο επίπεδο σύνδεσης, συμπεριλαμβανομένης της ασφαλείας E2E, ενώ οι Akram και συν. [144] πρότειναν πρωτόκολλα ασφαλούς καναλιού για τη διασφάλιση ισχυρής επικοινωνίας.

Πίνακας 5: Απειλές ασφαλείας και πηγές δεδομένων σε περιβάλλον συνεργασίας drone και IoT.

Απειλές ασφαλείας	Πηγές δεδομένων
• Επικοινωνία • Διατήρηση εμπιστευτικότητας δεδομένων • Προσβάσιμα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο • Επικοινωνία • Προσβάσιμα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο - Αποτυχία συσκευών IoT στο ωφέλιμο φορτίο του drone - Δεδομένα αποθετών IoT στο οφέλιμο φορτίο του drone - Δεδομένα αποθήκευσης στο νέφος - Ασφαλής σύνδεσμος επικοινωνίας - Παρεμβολή και έγχυση επικοινωνίας - Υπολογιστικό νέφος ομίχλης	• Διαχείριση νέφους • Περιβάλλον drone • Έξυπνες συσκευές IoT • Υπολογιστικό νέφος ομίχλης • Μέτρηση δομικής υγείας • Έξυπνη στάθμευση • Ανίχνευση smartphone • Έξυπνος smartpheta • Έξυπνος φωτισμός • Μέτρηση δομικής υγείας • Έξυπνη στάθμευση • Ανίχνευση smartphone • Έξυπνος φωτισμός • Οθόνες κυκλοφοριακής συμφόρησης • Έξυπνοι δρόμοι • Οθόνες διαχείρισης απορριμμάτων

Για την εξασφάλιση των επιπέδων δικτύου των συνεργατικών ρυθμίσεων drone και IoT, οι Altawy και Youssef [134] συζήτησαν την ασφαλή δρομολόγηση, την ασφάλεια IP και την ασφαλή μεταφορά. Επιπλέον, οι Tsitsiroudi και συν. [145] συζήτησαν πώς η δρομολόγηση IPv6 θα μπορούσε να εφαρμοστεί για ασφαλή drones και συνεργασία IoT για πρωτόκολλα χαμηλής ισχύος [146]. Επιπλέον, η δρομολόγηση της υποδομής δικτύου δεδομένων για την ασφάλεια των drones μπορεί να παρέχει ισχυρή ταυτοποίηση και να διασφαλίζει την ακεραιότητα των αντικειμένων, όπως αναφέρεται στο άρθρο των Zhang και συν. [147]. Μια τέτοια δρομολόγηση μπορεί να ενισχύσει την αυτονομία ενός drone, να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας και να βελτιώσει τον χρόνο πτήσης του.

Από την άλλη, η διασφάλιση του επιπέδου εφαρμογής απαιτεί διάφορες τεχνικές, όπως ένα απλό πρωτόκολλο πρόσβασης αντικειμένων, ένα περιορισμένο πρωτόκολλο εφαρμογής [142] και συστήματα ανίχνευσης εισβολών [148]. Τέλος, για την αναγνώριση του προορισμού των drones, τον σχεδιασμό διαδρομών και την αυτοοργάνωση, απαιτούνται τεχνικές μηχανικής μάθησης υπολογιστικής όρασης και επεξεργασίας βίντεο [149].

4. Συνεργασία drone και IoT για ενεργειακή απόδοση

Το drone είναι μια κρίσιμη τεχνολογία για την ενεργοποίηση του πράσινου IoT, η οποία θα παρέχει ενεργειακά αποδοτικές λύσεις ελαχιστοποιώντας την κατανάλωση ενέργειας σε συσκευές IoT. Οι αυτόνομες συσκευές IoT χρειάζονται υψηλή ισχύ μετάδοσης για την αποστολή πληροφοριών σε μεγάλες αποστάσεις. Μόλις οι συσκευές IoT κατασκευαστούν για να συνεργαστούν με ένα drone, το ευέλικτο και ιπτάμενο drone μπορεί φυσικά να πάει κοντά σε αυτές τις συσκευές IoT για να συλλέξει, επεξεργαστεί, και μετάδοση δεδομένων σε άλλους κόμβους / σταθμούς που βρίσκονται εκτός της περιοχής κάλυψης των συσκευών IoT. Τα drones θα χρησιμοποιούν επίσης αποτελεσματικές τεχνολογίες επικοινωνίας για τη μεταφορά/ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ τους και με συσκευές IoT στο έδαφος μέσω επικοινωνίας M2M. Οι Yoo και συν. [150] πρότειναν έναν γενετικό αλγόριθμο (GA) για δίκτυα αισθητήρων IoT με τη βοήθεια drone με βάση την πυκνότητα του αισθητήρα, την κατανάλωση ενέργειας και τον χρόνο πτήσης και το επίπεδο κινδύνου πτήσης. Επιπλέον, οι Mozaffari και συν. [151] αξιολόγησαν και υποστήριξαν τις βέλτιστες τιμές υψομέτρου για μικρά νέφη κυψελών drone που οδηγούν στην ελάχιστη ισχύ μετάδοσης και στη μέγιστη περιοχή κάλυψης.

Η ενσωμάτωση των χαρακτηριστικών επεξεργασίας και ελέγχου σε κάθε μηχανήμα είναι ο πρωταρχικός στόχος του εξοπλισμού IoT. Οι συσκευές IoT στα drones χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση, επεξεργασία, και παράδοση δεδομένων. Εισήχθη το πλαίσιο συνεργασίας για το drone-WSN [115]. Αποτελείται από ηγέτες σταθερών ομάδων, κόμβους αισθητήρων και νεροχύτη drones. Το εύρημα αυτής της μελέτης ήταν ότι η κατανάλωση ενέργειας και η πολυπλοκότητα της διαδικασίας εκλογής αρχηγού ομάδας μειώθηκαν. Οι στρατηγικές του WSN που βασίζεται σε drone για τη συλλογή δεδομένων συζητήθηκαν στο άρθρο των Cao και συν. [152]. Οι χρησιμοποιούμενες στρατηγικές ήταν σε θέση να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, τον χρόνο πτήσης και την καθυστέρηση της συλλογής δεδομένων. Οι Dong και συν. [153] πρότειναν έναν αλγόριθμο για τη συλλογή δεδομένων σε WSNs χρησιμοποιώντας δύο τεχνολογίες: κινητούς πράκτορες και drones. Και οι δύο τεχνολογίες χρησιμοποιήθηκαν για την εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας των κόμβων αισθητήρων. Μια μελέτη περίπτωσης έγινε με βάση την αναζήτηση ανθρώπων σε μια καταστροφή (π.χ. σεισμός). Επίσης, η προτεινόμενη εργασία φαίνεται να είναι κατάλληλη για τη συλλογή δεδομένων σε πολλές εφαρμογές και σε πραγματικές έξυπνες πόλεις. Οι Zorbas και συν. [154] συζήτησαν τη μαθηματική διατύπωση της αποτελεσματικής διαχείρισης ενέργειας για συσκευές IoT. Το μοντέλο ήταν σε θέση να ανιχνεύσει τα γεγονότα που συνέβησαν στο έδαφος και να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας σε μια συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης. Επιπλέον, οι Sharma και συν. [91] απέδειξαν τη σημασία της συνεργασίας drone και WSN για την παροχή ενεργειακά αποδοτικής αναμετάδοσης. Τα ευρήματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη τεχνική ήταν σε θέση να βελτιώσει τη δρομολόγηση του drone με λιγότερη καθυστέρηση και μια μεγάλη περιοχή κάλυψης με καλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Η απαιτούμενη ισχύς για το σύστημα drone μοντελοποιήθηκε και διαπιστώθηκε ότι η ενεργειακή απόδοση μπορεί να βελτιωθεί μόνο με την προσθήκη ενεργειακά αποδοτικότερων εξαρτημάτων στις αναδυόμενες τεχνολογίες [155]. Οι Choi και συν. [156] προσδιόρισαν την ενεργειακή απόδοση του ρελέ που βασίζεται σε drone λαμβάνοντας υπόψη την ταχύτητα και τους συντελεστές φορτίου. Έχει επίσης προταθεί ένα ενσύρματο σύστημα

σύνδεσης drone για την εκτέλεση πολλών λειτουργιών μέσω συνεργασίας με συσκευές IoT για τη μείωση των πόρων, της σπατάλης ενέργειας και για τη διασφάλιση της ασφάλειας [157]. Ο Seo και συν. [158] πρότεινε τη χρήση τεχνολογίας drone πάνω από την πλατφόρμα ασφαλείας IoT, για την παρακολούθηση και την παροχή απόκρισης έκτακτης ανάγκης σε κτίρια χρησιμοποιώντας φάρους. Για την αντιμετώπιση ζητημάτων που σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του drone, οι Fujii και συν. [159] ανέπτυξαν έναν αυτόματο μηχανισμό αντικατάστασης μπαταρίας. Η αυτόματη αντικατάσταση μπαταρίας επέτρεψε στα drones να συνεχίσουν να λειτουργούν χωρίς χειροκίνητη παρέμβαση. Η προτεινόμενη πρακτική εργασία αξιολόγησε με επιτυχία τη χρήση drones για συνεχή επιτήρηση σε εξωτερικούς και εσωτερικούς χώρους. Μια περίληψη προηγούμενων μελετών και τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στις έξυπνες πόλεις χρησιμοποιώντας μια συνεργασία μεταξύ drones και IoT παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Περίληψη σχετικά με τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης στις έξυπνες πόλεις.

Βιβλιογραφία	Επισήμανση	Ιδεολογία
[150] (2016)	Δίκτυα αισθητήρων IoT με υποστήριξη drone.	Κατανάλωση ενέργειας.
[151] (2015)	Βέλτιστες τιμές υψομέτρου για κυψέλη μικρού drone.	Χρόνος πτήσης και επίπεδο κινδύνου πτήσης – Ελάχιστη ισχύς εκπομπής.
[152] (2017)	WSN βασισμένο σε drone για τη συλλογή δεδομένων.	Μέγιστη περιοχή κάλυψης.
[153] (2014)	Συλλογή δεδομένων σε WSN με χρήση κινητών πρακτόρων και drone.	Μείωση κατανάλωσης ενέργειας.
[91] (2016)	Συνεργασία drone με WSN.	Μείωση χρόνου πτήσης και καθυστέρησης συλλογής δεδομένων.
[157] (2016)	Συνεργασία συστήματος ελλιμενισμού drone με περιβάλλον συσκευών IoT.	Εξοικονόμηση χρόνου και ενέργειας κόμβων αισθητήρων.
[159] (2013)	Αυτόματος μηχανισμός αντικατάστασης μπαταρίας.	Παροχή ενεργειακά αποδοτικής αναμετάδοσης για καλύτερη ζωή. Μείωση σπατάλης πόρων, ενέργειας και επίσης διασφάλιση της ασφάλειας. Επιτρέπει μεγαλύτερο χρόνο λειτουργίας.

5. Συλλογή δεδομένων σε έξυπνες πόλεις με χρήση συνεργασίας drones και IoT

Το πιο κρίσιμο πλεονέκτημα σε ένα σενάριο έξυπνης πόλης είναι τα δεδομένα. Για να επιτευχθούν χαρακτηριστικά έξυπνης πόλης και να καλυφθούν οι τομείς εφαρμογής, τα δεδομένα πρέπει να συλλέγονται, να αποθηκεύονται και να υποβάλλονται σε επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο,

Υποστήριξη υπηρεσιών διαχείρισης καταστάσεων

Έκτακτης ανάγκης με χρήση UAV

(Unmanned Aerial Vehicles)

σε περιβάλλοντα Έξυπνων Πόλεων

προκειμένου να διασφαλιστεί ότι οι απαιτούμενες εργασίες μπορούν να εκτελεστούν συνεργατικά. Σε πολλές εφαρμογές των έξυπνων πόλεων, οι έξυπνες συσκευές IoT (όπως κάμερες, αισθητήρες, κ.λπ.) διανέμονται για τη συλλογή δεδομένων από το περιβάλλον. Οι έξυπνες συσκευές IoT στις έξυπνες πόλεις είναι μικρές και έχουν περιορισμένη μπαταρία [160]. Επομένως, αυτές οι έξυπνες συσκευές IoT δεν είναι σε θέση να μεταδώσουν το σήμα σε μεγάλες αποστάσεις, λόγω ενεργειακών περιορισμών [12, 13, 17]. Για να εκπληρωθούν οι υποσχέσεις φιλικότητας προς το περιβάλλον και βιωσιμότητας στις έξυπνες πόλεις, η μείωση της κατανάλωσης ενέργειας αποτελεί απόλυτη αναγκαιότητα και η ελαχιστοποίηση της ρύπανσης και των επικίνδυνων αποβλήτων απαιτείται επίσης για τη βελτίωση της συνολικής ποιότητας της εμπειρίας [59, 161].

Πρόσφατα, τα drones έχουν αρχίσει να αντιπροσωπεύουν έναν μικρόκοσμο ολόκληρου του τομέα IoT, με την έννοια ότι αυτά τα drones μπορούν να αλληλεπιδρούν και να ανταποκρίνονται στο περιβάλλον τους όπως και οι άλλες οντότητες στο πλαίσιο του IoT. Ως εκ τούτου, μπορούν να αναπτυχθούν σε διαφορετικές τοποθεσίες, να μεταφέρουν ευέλικτα φορτία, να μετρήσουν και να παρέχουν αναλυτικά στοιχεία για οτιδήποτε οπουδήποτε και ανά πάσα στιγμή. Οι συναρπαστικές πτυχές της συνεργασίας με drones και IoT είναι οι χαμηλότερες τιμές και η καλύτερη συνδεσιμότητα και παράδοση υψηλού QoS. Το ύψος του drone διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην παροχή υπηρεσιών σε συσκευές IoT και στη συλλογή δεδομένων από συσκευές IoT. Λόγω της έλευσης του IoT που βασίζεται σε drone, ο εξοπλισμός IoT επί του drone μπορεί να περιλαμβάνει συσκευές όπως αισθητήρες, ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές, ενεργοποιητές, και τεχνολογίες επικοινωνίας, όπως Wi-Fi, 5G, LTE, ή Ad-hoc δίκτυα, όπως φαίνεται στην εικόνα 5. Αυτός ο εξοπλισμός χρησιμοποιείται για τον απομακρυσμένο έλεγχο των συσκευών, τη συλλογή δεδομένων και την παροχή υπηρεσιών αποτελεσματικά και αποδοτικά. Ως εκ τούτου, τα drones μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από συσκευές IoT μέσω του εξοπλισμού που έχει ήδη προστεθεί στο ωφέλιμο φορτίο του drone. Η παροχή υπηρεσιών από drones πραγματοποιείται μέσω τεχνολογιών ασύρματης επικοινωνίας όπως WiFi, LTE και 5G.



Εικόνα 5: Ένα drone εξοπλισμένο με συσκευές IoT για συλλογή δεδομένων.

Οι τεχνολογίες ασύρματης επικοινωνίας, όπως τα δίκτυα 4G / 5G, προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας των drones που είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες, κάμερες, και δέκτες GPS, στην παροχή υπηρεσιών IoT από μεγάλα ύψη. Η χρήση drones για πτήσεις ως ρελέ για το IoT έχει πολλά οφέλη, όπως αξιοπιστία και εξοικονόμηση ενέργειας. Τα drones πρέπει να συλλέγουν δεδομένα από το IoT στο έδαφος για να ελαχιστοποιήσουν την ισχύ μετάδοσης διατηρώντας παράλληλα την αξιοπιστία [17]. Επιπλέον, σε τέτοια σενάρια, η κατανάλωση ενέργειας στις συσκευές IoT μειώνεται σημαντικά, και τα drones μπορούν να εξυπηρετήσουν τις

επίγειες συσκευές για μεγαλύτερη διάρκεια. Τα drones έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την καθοδήγηση ομάδων έρευνας και διάσωσης (SAR), όπου φορητές έξυπνες συσκευές συνδέονται με drones για καθοδήγηση σχετικά με κατάλληλες και ασφαλείς διαδρομές [32].

Επιπλέον, τα drones μπορούν να λειτουργήσουν ως το κρίσιμο τεχνολογικό στοιχείο στην επικοινωνία συσκευών IoT για τη συλλογή δεδομένων από μικρές συσκευές όπως εξοπλισμός παρακολούθησης υγιονομικής περιθαλψής, περιβαλλοντικοί αισθητήρες κ.λπ. [160, 162, 163]. Οι Erman και συν. [164] εξέτασαν τη χρήση drones και συσκευών IoT μαζί σε ένα περιβάλλον αντιμετώπισης καταστροφών και παρείχαν τις εγκαταστάσεις για ανίχνευση συμβάντων, και αυτόματη επισκευή δικτύου. Τα έξυπνα drones εξοπλισμένα με συσκευές IoT είναι σε θέση να συλλέγουν, αποθηκεύουν, και επεξεργάζονται δεδομένα για να επιτρέψουν στα drones να εκτελούν πολύπλοκες εργασίες αποτελεσματικά και αποδοτικά. Λόγω της ενέργειας που απαιτείται για την επεξεργασία δεδομένων IoT και την επείγουσα εκτέλεση εργασιών IoT, οι Koulali και συν. [165] πρότειναν ότι η επεξεργασία δεδομένων θα πρέπει να γίνεται τοπικά, και στη συνέχεια τα επεξεργασμένα δεδομένα θα πρέπει να παραδίδονται στο υπολογιστικό νέφος, ώστε να μπορούν να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα. Ωστόσο, η επεξεργασία και αποθήκευση δεδομένων σε συσκευές IoT απαιτεί υψηλή ενεργειακή δαπάνη. Αναμένεται ότι η χρήση drones θα συμβάλει στη μείωση της χρησιμοποιούμενης ενέργειας και θα ελέγχει τις ενεργές και τις καταστάσεις αναστολής λειτουργίας των συσκευών IoT για την παραγωγή πράσινης τεχνολογίας IoT. Τα διάφορα σενάρια στα οποία ένα drone μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τη συλλογή δεδομένων, όπως η διαχείριση καταστροφών, η δημόσια ασφάλεια, η γεωργία κ.λπ., συνοψίζονται στον Πίνακα 7. Επιπλέον, τα drones μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή δεδομένων στις έξυπνες πόλεις για πολλές εφαρμογές, όπως ο δυναμικός συντονισμός και η δρομολόγηση δεδομένων, η παρακολούθηση ατυχημάτων, τα έξυπνα συστήματα μεταφορών, η αποκατάσταση καταστροφών, η δημόσια ασφάλεια και η αναμετάδοση δεδομένων από απομονωμένους αισθητήρες εδάφους σε BS κ.λπ.

Πίνακας 7: Περίληψη σχετικά με τη βελτίωση της συλλογής δεδομένων από έξυπνες πόλεις.

Συλλογή Δεδομένων	Σενάρια	Βιβλιογραφία	Σύνοψη Εργασίας
	Δυναμικός συντονισμός και δρομολόγηση δεδομένων.	[23] (2017)	Δημιουργία ενός κορμού (backbone) του δικτύου drones και διατήρησή του συνεχώς συνδεδεμένου. Σε σενάρια όπου η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο είναι σημαντική, το drone κινείται εντός της εμβέλειας μετάδοσης και προσπαθεί να διατηρεί συνδεσιμότητα με άλλες συσκευές. Σε σενάρια όπου η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο δεν είναι σημαντική,

Γενικά			το drone μπορεί να βγει εκτός εμβέλειας, να συλλέξει και να αποθηκεύσει δεδομένα και να επιστρέψει για να τα μεταδώσει στον απαιτούμενο κόμβο (dominator).
	Παρακολούθηση ατυχήματος.	[166] (2018)	Το drone μπορεί να πετάξει γρήγορα πάνω από την κυκλοφορία μέχρι να φτάσει στο σημείο του ατυχήματος. Όταν φτάσει, μπορεί να στείλει λεπτομερή αναφορά για την κατάσταση. Μπορεί να δημιουργήσει κανάλι επικοινωνίας σε πραγματικό χρόνο μεταξύ του σημείου του ατυχήματος και της ομάδας διάσωσης που κατευθύνεται προς τα εκεί.
	Ευφυή Συστήματα Μεταφορών (ITS).	[23] (2017)	Βελτίωση της κυκλοφορίας. Ενίσχυση της ασφάλειας στους δρόμους. Βελτίωση της άνεσης των οδηγών.
Drone που συλλέγει δεδομένα από IoT συσκευές στο έδαφος	Μετάδοση δεδομένων από απομονωμένους αισθητήρες σε σταθμό βάσης (BS).	[167] (2017)	Διατήρηση της συνδεσιμότητας.
	Διαχείριση καταστροφών.	[168] (2018)	Χρήση drone ως πρώτος ανταποκριτής (0 th responder) για παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας σε θύματα. Συλλογή δεδομένων και χρήση τοπικής αναζήτησης για

			εύρεση της βέλτιστης θέσης.
Drone εξοπλισμένο με IoT συσκευές	Drone με IoT συσκευή για εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών.	[52] (2018)	Τα drones μπορούν να εξοπλιστούν με προηγμένους ηλεκτρο-οπτικούς αισθητήρες και ραντάρ, παρέχοντας ανάλυση από υποχιλιοστό έως λίγα εκατοστά. Μπορούν επίσης να διαθέτουν απλούστερους αισθητήρες για ταυτόχρονο εντοπισμό και χαρτογράφηση (SLAM), καθώς και υπερηχητικούς αισθητήρες για ανίχνευση και αποφυγή εμποδίων. Μπορούν να εξοπλίσουν με θερμικούς αισθητήρες για παρακολούθηση περιβαλλοντικών και καιρικών συνθηκών.
Drone με IoT που συλλέγει δεδομένα από IoT	Δημόσια ασφάλεια.	[32] (2019)	Συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο Καθοδήγηση επιχειρήσεων ως Έρευνας και Διάσωσης (SAR) για διάσωση ανθρώπων και ζώων.
	Ισχύς σήματος κατά τη συλλογή δεδομένων.	[14] (2018)	Διατήρηση της συνδεσιμότητας. Παροχή βέλτιστης Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS). Προσδιορισμός της περιοχής κάλυψης του drone.

Η συνεργασία των drones και του IoT για τη συλλογή δεδομένων μπορεί να αξιοποιηθεί με διάφορους τρόπους: (i) drones που συλλέγουν δεδομένα από επίγειες συσκευές IoT και παραδίδουν συλλεγόμενα δεδομένα στο πλησιέστερο BS [169], (ii) drones εξοπλισμένα με συσκευές IoT για τη συλλογή δεδομένων [170] (iii) drones εξοπλισμένα με συσκευές IoT και επίσης συλλογή δεδομένων από συσκευές IoT σε έξυπνες πόλεις. Για παράδειγμα, τα drones που χρησιμοποιούνται για εργασίες δημόσιας ασφάλειας μπορούν να συλλέγουν δεδομένα από φορητές συσκευές που μεταφέρονται από τα μέλη των ομάδων SAR. Σε μια άλλη περίπτωση, τα δεδομένα που συλλέγονται από ένα drone μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη γεωργική βιομηχανία, εξυπηρετώντας πολλές εφαρμογές όπως η παρακολούθηση των καλλιεργειών, η παρακολούθηση της ξηρασίας, οι εκτιμήσεις απόδοσης, η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού, η ανίχνευση ασθενειών, η αναγνώριση ειδών δέντρων κ.λπ.

6. Συνεργασία drones και IoT για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής

Πρόσφατα, η παρακολούθηση και ο έλεγχος της ατμοσφαιρικής ρύπανσης έχουν γίνει σημαντικά ζητήματα στον σύγχρονο βιομηχανικό κόσμο. Συνήθως οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται για τη συλλογή δεδομένων ρύπανσης που καταναλώνονται για σκοπούς παρακολούθησης. Ωστόσο, οι δυνατότητες μετάδοσης ισχύος αυτών των μικροσκοπικών αισθητήρων είναι περιορισμένες και συχνά τέτοιοι αισθητήρες δεν είναι κατάλληλοι για την αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Για να παρακαμφθεί αυτό το ζήτημα, οι αισθητήρες μπορούν να μεταφερθούν από drones και, στη συνέχεια, η διαδικασία δεδομένων και η περαιτέρω μετάδοση μπορούν να χωριστούν σε δύο μέρη: ο ενσωματωμένος αισθητήρας μπορεί να ανιχνεύσει/συλλέξει δεδομένα ρύπανσης και ο εξοπλισμός επικοινωνίας του drone με τις μεγαλύτερες πηγές ενέργειας του, μπορεί εύκολα να στείλει τα δεδομένα σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις από αυτές που είναι δυνατές χρησιμοποιώντας έναν αυτόνομο αισθητήρα [171, 172]. Από την άποψη αυτή, οι Villa και συν. [173] καθιέρωσαν τα καλύτερα σημεία εγκατάστασης για τέσσερις αισθητήρες αερίου και έναν μετρητή συγκέντρωσης αριθμού σωματιδίων (PNC), επί ενός εξακοπτέρου. Ανέπτυξαν ένα σύστημα drone το οποίο είναι ικανό να μετρά τις εκπομπές σημειακών πηγών. Η μελέτη τους επικεντρώθηκε στη συμπεριφορά ροής αέρα και στην αξιολόγηση της απόδοσης των αισθητήρων CO₂, CO, NO₂ και NO για τη μέτρηση των επιβλαβών εκπομπών αερίων σε μια συγκεκριμένη γεωγραφική περιοχή. Αρκετές άλλες πιθανές εφαρμογές της τεχνολογίας drone έχουν επίσης διερευνηθεί για την αλληλεπίδραση με αισθητήρες για την εκτέλεση εργασιών όπως η ανίχνευση υγρασίας εδάφους, η απομακρυσμένη παρακολούθηση καλλιεργειών, η παρακολούθηση υποδομών, η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και η απομακρυσμένη ανάπτυξη αισθητήρων [174]. Για τον έλεγχο των εκπομπών αερίων από ένα θερμοκήπιο, οι Malaver και συν. [88] τόνισαν τη σημασία ενός ηλιακού drone εξοπλισμένου με σύστημα ανίχνευσης CO₂ ενσωματωμένο σε WSN

Ο Telesetsky [175] επανεξέτασε τις υπάρχουσες τεχνικές drone για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος. Επιπλέον, οι Alvear και συν. [176] πρότειναν drones εξοπλισμένα με αισθητήρες off-theshelf για εργασίες παρακολούθησης, αλλά δεν έλαβαν υπόψη το σύστημα καθοδήγησης. Για την επίλυση αυτού του ζητήματος, οι ίδιοι συγγραφείς πρότειναν την υιοθέτηση ενός συστήματος ελέγχου της ρύπανσης που τοποθετείται σε drone βασισμένο σε μεταερευτικές τεχνικές και τεχνικές PSO, οι οποίες επέτρεψαν στον χρήστη να παρακολουθεί μια συγκεκριμένη περιοχή και επικεντρώθηκε στις πιο μολυσμένες ζώνες [177]. Σε μια άλλη σχετική εργασία, [178], οι Alvear και συν. πρότειναν τη χρήση εξοπλισμού σε drones όπως το Pixhawk Autopilot για έλεγχο drone μαζί με συσκευές επεξεργασίας και αποθήκευσης επί του σκάφους, για την ανίχνευση και αποθήκευση δεδομένων ρύπανσης του περιβάλλοντος. Επιπλέον, οι Koo και συν. [179] ανέπτυξαν μια αρθρωτή πλατφόρμα drone που είναι ικανή για παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο πολλαπλών ατμοσφαιρικών ρύπων.

Οι Šmidl και Hofman [180] επέκτειναν την ιδέα των κινητών σταθμών σε αυτόνομα πλοηγμένα drones για την παρακολούθηση της ρύπανσης. Η εργασία κατέδειξε τις εφαρμογές της πλατφόρμας drone στην έρευνα για την ατμοσφαιρική ρύπανση, επικεντρωμένη στο προφίλ της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην άκρη του δρόμου και στην παρακολούθηση έκτακτης ανάγκης για επεισόδια ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Από την άλλη, Zang και συν. [181] απέδειξε την εφαρμογή των drones για τη διερεύνηση της ρύπανσης των υδάτων στη νοτιοδυτική Κίνα. Τα drones αποδείχθηκαν αποτελεσματικά σε ένα τέτοιο κλιματικό σενάριο λόγω της ικανότητάς τους να λειτουργούν σε περιβαλλοντικές συνθήκες με χαμηλή πίεση αέρα, μεγάλο υψόμετρο, δυσμενείς καιρικές συνθήκες, ισχυρές αναταράξεις αέρα και επίμονη νεφοκάλυψη. Οι Gu και συν. [182] ανέπτυξαν και σχεδίασαν μια αρθρωτή πλατφόρμα βασισμένη σε drone, η οποία ήταν ικανή για παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε πραγματικό χρόνο σε έξυπνες πόλεις. Το προτεινόμενο μοντέλο περιελάμβανε drone, αισθητήρες, επίγειο σταθμό, εξοπλισμό απόκτησης δεδομένων και μονάδα επεξεργασίας δεδομένων. Το προτεινόμενο σύστημα παρουσίασε υψηλή ακρίβεια και αποδείχθηκε κατάλληλο για την παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Επιπλέον, οι Chen και συν. [183] σχεδίασαν μια οθόνη ποιότητας αέρα μεγάλης εμβέλειας πάνω σε ένα drone. Το προτεινόμενο πρωτότυπο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εύκολη παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Σε αυτή τη ρύθμιση, η συνεργασία μεταξύ των drones αποδείχθηκε αποτελεσματική με την έννοια ότι ένα drone αισθανόταν τα δεδομένα και ένα άλλο drone χρησιμοποιήθηκε για την αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στον διακομιστή. Ο Πίνακας 8 απεικονίζει μια σύνοψη των αποτελεσμάτων της συνεργασίας των drones και του IoT για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής στην έξυπνη πόλη.

Πίνακας 8: Περίληψη για τη βελτίωση της ποιότητας ζωής στις έξυπνες πόλεις.

Βιβλιογραφία	Κύριο Σημείο	Σύνοψη Εργασίας
[173] (2016)	Αισθητήρες ενσωματωμένοι σε εξακόπτερο (hexacopter).	Μελέτη της συμπεριφοράς της ροής του αέρα και αξιολόγηση της απόδοσης αισθητήρων CO ₂ , CO, NO ₂ .
[88] (2017)	Ενσωμάτωση drone και ασύρματων δικτύων αισθητήρων (WSN).	Χρήση drones για την ανίχνευση αερίων θερμοκηπίου με τη βοήθεια της τεχνολογίας WSN.
[182] (2018)	Παρακολούθηση ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε πραγματικό χρόνο.	Ανάπτυξη και σχεδιασμός μιας αρθρωτής πλατφόρμας βασισμένης σε drone, ικανής για παρακολούθηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης σε πραγματικό χρόνο σε έξυπνες πόλεις. Το προτεινόμενο μοντέλο περιελάμβανε αισθητήρες drone, επίγειο σταθμό, συλλογή δεδομένων και συγχώνευση δεδομένων (data fusion). Το σύστημα παρουσίαζε υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα για τον έλεγχο της ρύπανσης.

[183] (2018)	Ποιότητα αέρας σε έξυπνες πόλεις.	Συνεργασία μεταξύ drones για την εκτέλεση εργασιών ανίχνευσης και αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε διακομιστή (server).
--------------	-----------------------------------	--

7. Συνεργατικά drones και IoT για τη δημόσια ασφάλεια στις έξυπνες πόλεις

Όπως συζητήθηκε προηγουμένως, η περιορισμένη ισχύς μετάδοσης μικροσκοπικών αισθητήρων και φορητών συσκευών τους καθιστά ανίκανους να στείλουν τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί σε μεγάλες αποστάσεις. Η τεχνολογία drone, ωστόσο, μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες σε μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή σε πραγματικό χρόνο. Η χρήση της τεχνολογίας drone αντιπροσωπεύει τον φθηνότερο και πιο αποτελεσματικό τρόπο για την επίτευξη εργασιών όπως η παρακολούθηση ενός εγκληματία που διαφεύγει, η εύρεση ενός αγνοούμενου, η έρευνα μιας σκληρής καταστροφής κ.λπ., ειδικά σε κρίσιμες καταστάσεις. Ως εκ τούτου, τα καλύτερα χαρακτηριστικά της συνεργασίας μεταξύ συσκευών drone και IoT είναι αυτά που υποτίθεται ότι επιτυγχάνουν και παρέχουν τα μέγιστα οφέλη, όπως επαναπρογραμματισμός, καλή ικανότητα ανίχνευσης, ικανότητα διασύνδεσης και αναγνώρισης πραγμάτων, πανταχού παρούσα, ικανότητα επικοινωνίας, και τα λοιπά. Οι φορετές συσκευές διαδικτύου δημόσιας ασφάλειας (IoPST) συνδέονται σε έξυπνες πόλεις για δημόσια ασφάλεια και επιτρέπουν στους πρώτους ανταποκριτές να μοιράζονται πληροφορίες με θέσεις διοίκησης και σχετικά μέρη. Αυτές οι συνδεδεμένες συσκευές μπορούν να βοηθήσουν τις ομάδες αρωγής και παρακολούθησης να προσδιορίσουν πότε ή πού έχουν συμβεί καταστροφές ή εγκλήματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6. Χρησιμοποιώντας αυτές τις πληροφορίες, τα ενδιαφερόμενα μέρη (υπηρεσίες επιβολής του νόμου σε περίπτωση εγκλημάτων, ομάδες διάσωσης σε περίπτωση καταστροφών) μπορούν γρήγορα να λάβουν εκτιμημένες αποφάσεις προκειμένου να εντοπίσουν τους δράστες ή να παράσχουν βοήθεια, ανεξάρτητα από την περίπτωση. Η Εικόνα 6 δείχνει την ικανότητα ενός drone εξοπλισμένου με τεχνολογία IoT να συλλαμβάνει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για γεγονότα καταστροφών και να στέλνει τα δεδομένα που συλλαμβάνονται στο κέντρο ελέγχου καταστροφών για να λάβει μια απόφαση εκτίμησης σε πραγματικό χρόνο. Το Drone 1 χρησιμοποιείται για τη λήψη πραγματικών πληροφοριών από την καταστροφική πυρκαγιά. Το Drone 1 χρησιμοποιείται για την επικοινωνία με ομάδες SAR, την αποστολή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σχετικά με την καταστροφή και την καθοδήγηση του SAR για να φτάσει στην περιοχή καταστροφής χρησιμοποιώντας μια προσβάσιμη και ασφαλή διαδρομή. Τα μέλη της ομάδας SAR φορούν συσκευές IoT που βοηθούν τα drones να εντοπίσουν τη θέση τους και να τα καθοδηγήσουν κατάλληλα ανάλογα με την κατάσταση καταστροφής. Επιπλέον, το Drone 1, το οποίο τυχαίνει να βρίσκεται πάνω από την περιοχή της καταστροφής όταν συνέβη η τραγωδία, μπορεί να επικοινωνήσει με άλλα drones και να προωθήσει δεδομένα σε πραγματικό χρόνο. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ drones και συσκευών IoT διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση της δημόσιας ασφάλειας και στη μείωση των επιπτώσεων της καταστροφής στην έξυπνη πόλη.



Εικόνα 6: Συνεργατικό drone και IoT για τη δημόσια ασφάλεια [32].

Οι Mozaffari και συν. [18] ανέλυσαν πώς η ανάπτυξη ενός drone ως BS θα μπορούσε να προσφέρει υπηρεσίες επικοινωνίας σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Επιπλέον, συζητήθηκε η συνύπαρξη ετερογενών συσκευών και drones. Εισήχθησαν θεμελιώδεις λειτουργίες και τεχνικές για την ενίσχυση την αποτελεσματικότητα και την ακρίβεια του δικτύου δημόσιας ασφάλειας που χρησιμοποιεί τεχνολογίες IoT. Οι Ray και συν. [184] επανεξέτασαν τις τεχνικές και τη διαθεσιμότητα του IoT για τη διαχείριση καταστροφών. Οι Reina και συν. [168] περιέγραψαν τη διαχείριση καταστροφών και τη σημασία της χρήσης IoT και μεγάλων δεδομένων. Η μελέτη επικεντρώθηκε στη χρήση των drones ως θου ανταποκριτή για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας σε θύματα σε μια καταστροφή. Η κύρια ιδέα ενός θου ανταποκριτή είναι να φτάσει στην περιοχή καταστροφής πριν από τους πρώτους ανταποκριτές. Το έργο χωρίστηκε σε δύο μέρη: τη συλλογή δεδομένων και τη χρήση τοπικής αναζήτησης για την εύρεση της βέλτιστης θέσης στην οποία το drone θα μπορούσε να προσφέρει υπηρεσίες επικοινωνίας στα θύματα.

Επιπλέον, το έργο των Reina και συν. [168] υποστηρίχθηκε από το Reina και συν. [185], στο οποίο εξετάστηκε η θέση του θου ανταποκριτή για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας σε θύματα σε περιοχές καταστροφών. Ωστόσο, η διατήρηση της σύνδεσης συνδεσιμότητας μεταξύ του θου ανταποκριτή και άλλων ανταποκριτών δεν συζητήθηκε. Ως εκ τούτου, οι Alsamhi και συν. [14] ανέπτυξαν ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN) για να προβλέψουν την ισχύ του σήματος μεταξύ του drone και των φορητών συσκευών IoT ή άλλων ανταποκριτών στο έδαφος για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας για την παροχή υπηρεσιών.

Μια συνοπτική περίληψη των επιπτώσεων της αποτελεσματικής συνεργασίας μεταξύ drones και συσκευών IoT για τη δημόσια ασφάλεια στις έξυπνες πόλεις παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.

Πίνακας 9: Περίληψη της βελτίωσης της δημόσιας ασφάλειας στις έξυπνες πόλεις.

Αναφορά	Κύριο Σημείο	Συνεργατικά Drones & IoT	Έρευνα & Διάσωση (SAR) και Δημόσια Ασφάλεια	Εστίαση
[168] (2018)	Σημασία χρήσης IoT και μεγάλων δεδομένων για διαχείριση καταστροφών και δημόσια ασφάλεια	✓	✓	- Χρήση drone ως «μηδενικός ανταποκριτής» (0th responder) για παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας σε θύματα. - Συλλογή δεδομένων και χρήση τοπικής αναζήτησης για εύρεση της βέλτιστης θέσης.
[24] (2018)	Ενσωμάτωση drones σε έξυπνες πόλεις	✓	✓	- Παροχή οικονομικά αποδοτικών υπηρεσιών. - Μείωση κατανάλωσης πόρων.
[185] (2018)	Drone ως «μηδενικός ανταποκριτής» και βέλτιστη τοποθέτησή του	✓	✓	- Ο «μηδενικός ανταποκριτής» φτάνει στο σημείο της καταστροφής πριν από τον πρώτο ανταποκριτή. - Εύρεση της βέλτιστης θέσης των drones πρώτης απόκρισης.
[14] (2018)	Ισχύς σήματος μεταξύ drone και IoT συσκευής σε έξυπνες πόλεις	✓		Πρόβλεψη της ακριβούς ισχύος σήματος.
[32] (2019)	Συνεργασία drones και IoPST (Internet of Public Safety Things)	✓	✓	- Συνεργασία προηγμένων τεχνολογιών για τη δημόσια ασφάλεια. - Αποδοτικές υπηρεσίες συνδεσιμότητας. - Βελτίωση της Ποιότητας Υπηρεσίας (QoS).

8. Συνεργασία drone και IoT για διαχείριση καταστροφών

Εκτός από την υπόσχεση έξυπνων υπηρεσιών, η έννοια της έξυπνης πόλης περιλαμβάνει επίσης αποτελεσματικό και αποδοτικό σχεδιασμό για την αντιμετώπιση καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και κρίσιμων καταστάσεων. Αυτό επιτυγχάνεται γενικά με την ανάθεση δραστηριοτήτων SAR σε περιοχές καταστροφών σε πραγματικό χρόνο. Σε αυτό το πλαίσιο, η χρήση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης για την ανάλυση εικόνων διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στον εντοπισμό πραγμάτων και γεγονότων σε πραγματικό χρόνο. Η οπτική καταγραφή των περιοχών καταστροφών μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην επιλογή μιας αποτελεσματικής αντιμετώπισης καταστροφών. Υπό αυτό το πρίσμα, οι Chaudhuri και Bose [186] εξέτασαν την αποτελεσματικότητα της τεχνικής μηχανικής μάθησης για τη διαχείριση καταστροφών σε έξυπνες πόλεις. Η προτεινόμενη τεχνική χρησιμοποιήθηκε για την ταξινόμηση εικόνων, που περιέχουν φωτογραφίες από περιοχές καταστροφών, με υψηλή ακρίβεια. Οι Sakhardande και συν. [187] χρησιμοποίησαν τους διάφορους τρόπους επικοινωνίας των συσκευών IoT για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των δραστηριοτήτων SAR κατά τη διάρκεια μιας καταστροφής. Επιπλέον, η ιδέα των ευφυών μεταφορών με τη βοήθεια τεχνολογιών υπολογιστικού νέφους και VANET έχει επίσης προταθεί για συστήματα διαχείρισης καταστροφών σε έξυπνες πόλεις [188]. Επίσης, οι Boukerche και συν. [189] πρότειναν ένα σύστημα αντιμετώπισης και ανίχνευσης καταστροφών βασισμένο στο IoT για τη βελτίωση των δραστηριοτήτων SAR κατά τη διάρκεια μιας καταστροφής. Σε αυτό το πλαίσιο, Οι συσκευές IoT χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή δεδομένων, εντοπισμός τραυματιών, και εντοπισμός κινδύνων. Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου συστήματος περιελάμβανε έξυπνους αισθητήρες, έξυπνη επεξεργασία, έξυπνες απαντήσεις και ένα ad hoc δίκτυο επικοινωνίας.

Η συνεργασία μεταξύ drones και συσκευών IoT, όπως κάμερες, αισθητήρες, και ενεργοποιητές μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διαχείριση καταστροφών και την καθοδήγηση SAR παρέχοντας εικόνες υψηλής ανάλυσης και βίντεο της πληγείσας περιοχής και της περιοχής εκτεταμένης κάλυψης, καθώς και παρέχοντας αρχεία καιρού σε πραγματικό χρόνο (π.χ. ταχύτητα ανέμου, επίπεδα ρύπανσης, θερμοκρασία, κ.λπ.). Τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη που πετούν πάνω ή πιο κοντά σε μια περιοχή καταστροφής μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους, καθώς και με έναν κεντρικό σταθμό, για να διευκολύνουν τον συντονισμό και την επιτήρηση της ομάδας συμβάντων και επιχειρήσεων [26]. Η επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο των συλλεγόμενων δεδομένων από συσκευές IoT είναι απαραίτητη για τον εντοπισμό των πιο πληγείσων περιοχών και για να βοηθήσει τους ανθρώπους όπου η ανθρώπινη παρέμβαση είναι επικίνδυνη, αδύνατη, επικίνδυνος, και δαπανηρό. Ένα drone εξοπλισμένο με συσκευές IoT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη συλλογή δεδομένων από την περιοχή καταστροφής και τα περίχωρά της. Τα δεδομένα που συλλέγονται θα βοηθήσουν τις ομάδες διάσωσης και αρωγής να ανταποκριθούν αναλόγως για να διασφαλίσουν ότι τα καθήκοντα εκτελούνται αποτελεσματικά. Οι Aljehani και συν. πρότειναν την τεχνολογία drone μαζί με συσκευές IoT για την ενεργοποίηση της παρακολούθησης κινητών συσκευών και της επεξεργασίας εικόνας [190]. Η προηγμένη τεχνολογία χρησιμοποιήθηκε για να συλλάβει μια εικόνα του συμβάντος καταστροφής. Τα δεδομένα εικόνας από ένα drone βοήθησαν στην αξιολόγηση των κατεστραμμένων περιοχών.

Ένα drone εξοπλισμένο με συσκευές IoT, όπως κάμερες 3D, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη λήψη εικόνων υψηλής ανάλυσης για τη δημιουργία ανάγλυφων χαρτών της υπό εξέταση περιοχής. Με αυτόν τον τρόπο, ένα κέντρο καταστροφών λαμβάνει άσεμνο υλικό της πραγματικής σκηνής χωρίς να χρειάζεται να αναπτύξει ομάδες εδάφους ανθρώπων / ρομπότ. Επίσης, ένα drone μπορεί να διεισδύσει σε μέρη που διαφορετικά θα ήταν δύσκολο για τις ομάδες διάσωσης ή τα ελικόπτερα να

εισέλθουν και να παρέχουν κοντινές απόψεις. Το σημαντικότερο πλεονέκτημα του χάρτη είναι η κατανόηση των επιπτώσεων της καταστροφής στην περιοχή. Στη συνέχεια, οι τεχνικές AI μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λήψη αποφάσεων και τη λήψη επιθυμητών ενεργειών με βάση τον καταγεγραμμένο χάρτη. Η επιθυμητή ισχύς σήματος από το drone βελτιστοποιείται χρησιμοποιώντας ένα ANN [14]. Η πρόβλεψη και εκτίμηση της ισχύος του σήματος είναι σημαντική για την ενίσχυση του QoS. Επιπλέον, απαιτούνται κατάλληλα πρωτόκολλα επικοινωνίας για τη διαχείριση καταστροφών, επειδή οι τύποι καταστροφών έχουν διαφορετικές έννοιες εμφάνισης, ικανότητας ζημιάς και χρονικής ατυχίας. Η ενεργειακή απόδοση των πρωτοκόλλων IoT διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στην ανακάλυψη τοπικών συσκευών αισθητήρων και πυλών για την παροχή υπηρεσιών επικοινωνίας σε ένα τέτοιο σενάριο περιορισμένης ισχύος. Ο συγχρονισμός είναι το παν σε μια κατάσταση καταστροφής. Με την ενσωμάτωση δεδομένων IoT σε σχέδια αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης, οι υπηρεσίες του δημόσιου τομέα και οι ανταποκριτές μπορούν να χρησιμοποιούν πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για να κάνουν ρυθμίσεις και να προσεγγίσουν τους ανθρώπους που χρειάζονται βοήθεια.

Στην περίπτωση φορητών συσκευών IoT που φοριούνται από ομάδες SAR, το drone μπορεί να βοηθήσει τις υπηρεσίες IoT μεταφέροντας αισθητήρες, κάμερες, και συσκευές επικοινωνίας, και τα λοιπά. Για παράδειγμα, οι ομάδες απόκρισης μπορούν επίσης να χρησιμοποιήσουν φορητούς αισθητήρες για συντονισμό, αναλυτικά στοιχεία, στρατηγικές προσέγγισης και τακτικές επί τόπου. Επίσης, το drone μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί ως πύλη που μπορεί να συνδεθεί με τον διακομιστή παρακολούθησης καθώς και, ελέγχοντας διαφορετικές συσκευές IoT στο ίδιο το drone. Επιπλέον, μπορεί να μεταφέρει συσκευές IoT, όπως συσκευές θερμικής απεικόνισης, πολυφασματικές κάμερες, μικρόφωνα, και sniffers. Οι Motlagh και συν. [16] καθιέρωσαν έναν μηχανισμό διεύθυνσης στο ωφέλιμο φορτίο του drone για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και να εγγραφούν υψηλότερο ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέσω της σωστής επιλογής του δείκτη ισχύος του λαμβανόμενου σήματος (RSSI). Η απόδοση του μηχανισμού διεύθυνσης οδήγησε σε αύξηση της πιθανότητας υψηλού ρυθμού μετάδοσης δεδομένων, υψηλού QoS και αποδεκτής κατανάλωσης ενέργειας. Όσον αφορά την ευέλικτη ανάπτυξη της τεχνολογίας drone, η επικοινωνία 4G θα βοηθήσει στον έλεγχο πολλαπλών drones από οπουδήποτε, επιτρέποντας τη μετάδοση, επεξεργασία και κοινή χρήση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο.

Οι Kumar και συν. [191] εξέτασαν την ανάπτυξη συσκευών drone και IoT κατά τη διάρκεια μιας καταστροφής για αποτελεσματική και αποδοτική επικοινωνία και ανίχνευση δεδομένων, καθώς και τη χρήση ολοκληρωμένης τεχνολογίας για να βοηθήσουν τους SAR να εκτελούν τα καθήκοντά τους με ασφάλεια. Οι τομείς εφαρμογής τέτοιων συστημάτων περιλαμβάνουν τις μεταφορές, τη δημόσια ασφάλεια, την ενέργεια, την υγειονομική περίθαλψη και τις τηλεπικοινωνίες. Ο Πίνακας 10 δείχνει μια σύνοψη προηγούμενων μελετών που σχετίζονται με συνεργατικές τεχνολογίες drone και IoT για τη διαχείριση καταστροφών σε έξυπνες πόλεις.

Πίνακας 10: Περίληψη σχετικά με τη βελτίωση της διαχείρισης καταστροφών στις έξυπνες πόλεις.

Αναφορά	Κύριο Σημείο	Εστίαση
[186] (2019)	Η αποτελεσματικότητα της μηχανικής μάθησης στη διαχείριση καταστροφών	• Η ταξινόμηση εικόνων συμβάλλει στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των επιχειρήσεων αναζήτησης σε πραγματικό χρόνο.

[187] (2016)	Διαχείριση και παρακολούθηση καταστροφών σε έξυπνες πόλεις	• Χρήση συσκευών IoT για συνεργατική διαχείριση δραστηριοτήτων Έρευνας και Διάσωσης (SAR) σε έξυπνες πόλεις.
[188] (2014)	Σύστημα διαχείρισης καταστροφών σε έξυπνες πόλεις	• Ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών όπως ευφυή συστήματα μεταφορών, υπολογιστικό νέφος (cloud computing) και VANET για τη διαχείριση καταστροφών.
[184] (2017)	Προκλήσεις και ερευνητικές τάσεις σε συστήματα διαχείρισης καταστροφών με χρήση IoT	• Τεχνικές και διαθεσιμότητα του IoT για τη διαχείριση καταστροφών.
[190] (2019)	IoT και drones για αποκατάσταση μετά από καταστροφές	• Τεχνολογία drones και IoT για υποστήριξη κινητής παρακολούθησης και επεξεργασίας εικόνας.
[189] (2018)	Αρχιτεκτονική για έξυπνο σύστημα πρόβλεψης, ανίχνευσης και απόκρισης σε καταστροφές σε έξυπνες πόλεις	• Συστήματα ανίχνευσης και απόκρισης βασισμένα στο IoT για βελτίωση των επιχειρήσεων SAR κατά τη διάρκεια καταστροφών.
This Work	Συνεργασία drones και IoT για διαχείριση καταστροφών	• Τεχνικές και λογικές στρατηγικές συνεργασίας μεταξύ drones και IoT για τη διαχείριση καταστροφών σε έξυπνες πόλεις.

Η εικόνα 6 δείχνει τη σημασία της χρήσης drones σε συνεργασία με συσκευές IoT για τη διαχείριση καταστροφών σε έξυπνες πόλεις. Το Drone 1 είναι εξοπλισμένο με αισθητήρες IoT για τη λήψη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την προώθησή τους σε μια κεντρική μονάδα για περαιτέρω λήψη αποφάσεων και την εκτέλεση έξυπνων ενεργειών. Επιπλέον, το drone 1 χρησιμοποιείται επίσης για να συνδεθεί απευθείας με τις φορητές συσκευές IoT που φοριούνται από την ομάδα SAR για να τους καθοδηγήσει κατά μήκος μιας ασφαλούς διαδρομής και να προστατεύσει τη ζωή τους.

9. Εφαρμογές συνεργασίας drones και IoT

Οι έξυπνες πόλεις απαιτούν έξυπνα δεδομένα. Οι συσκευές IoT μπορούν να συλλέγουν αυτά τα δεδομένα. Ωστόσο, η διανομή ενός τεράστιου αριθμού συσκευών IoT θα καταναλώσει ενέργεια και θα επιβαρυνθεί με υψηλό κόστος. Ως εκ τούτου, τα έξυπνα drones μπορούν να εξοπλιστούν με συσκευές IoT, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη συλλογή δεδομένων από μια μεγάλη περιοχή κάλυψης με εξοικονόμηση ενέργειας και μειωμένες εκπομπές άνθρακα. Στο εγγύς μέλλον, ένας τεράστιος αριθμός drones θα χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ζωής στην πόλη, την τεκμηρίωση σκηνών ατυχημάτων, την υποστήριξη δραστηριοτήτων πρώτων ανταποκριτών και την παρακολούθηση εργοταξίων. Οι απαιτήσεις των drones για να κάνουν μια πόλη πιο έξυπνη συζητήθηκαν στο [34, 192, 193]. Οι Sterbenz και συν. [34] συσχέτισαν έναν κρίσιμο ρόλο με το drone στις έξυπνες πόλεις, όπου το drone χρησιμοποιήθηκε ως σταθμός αναμετάδοσης και διατήρησε τη συνδεσιμότητα σε συγκεκριμένες εφαρμογές όπως οι υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και η

αποκατάσταση καταστροφών. Επιπλέον, οι μελλοντικές κατευθύνσεις της έρευνας και οι προκλήσεις συζητήθηκαν σε αυτό το έργο.

Οι Won και συν. [194] συζήτησαν την ανάγκη για ασφαλή πρωτόκολλα επικοινωνίας για συνεργασία μεταξύ drones και συσκευών IoT. Τα πρωτόκολλα περιλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους σταθερών συσκευών IoT ή κινητών συσκευών με διαφορετικές χωρητικότητες. Οι διάφορες πτυχές των drones στις μελλοντικές έξυπνες πόλεις, που σχετίζονται με την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο, την ιδιωτικότητα και τη δημόσια ασφάλεια, συζητήθηκαν στο άρθρο των Vattapparamban και συν. [28]. Επιπλέον, οι εφαρμογές των drones για έξυπνες πόλεις και οι ευκαιρίες επίλυσης των σημερινών προβλημάτων συζητήθηκαν επίσης στα άρθρα των Jensen και συν. [41], και των Won και συν. [194]. Πρόσφατα, το ποσοστό εγκληματικότητας στις αστικές περιοχές, όπως το έγκλημα του δρόμου, οι βανδαλισμοί και η τρομοκρατία έχει αυξηθεί. Ως εκ τούτου, η πρόβλεψη των εγκλημάτων μέσω του εντοπισμού και της αναγνώρισης των εγκληματιών ανάμεσα σε πλήθη ανθρώπων είναι ζωτικής σημασίας. Σε αυτό το πνεύμα, τα drones με τη βοήθεια συσκευών IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση, εντοπισμός, και αναγνώριση εγκληματιών, ακολουθήστε την εγκληματική κίνηση για να ανακαλύψετε ακριβείς κρυψώνες, και παρέχουν ασυλία από πιθανούς κινδύνους που μπορεί να θέσουν οι εγκληματίες. Για να βελτιωθεί η απόδοση της ανίχνευσης καταστροφών με παράλληλη εξοικονόμηση ενέργειας, προτάθηκε το πλαίσιο νέφους drone για εφαρμογές ανίχνευσης καταστροφών υπό την προϋπόθεση ακανόνιστων, διακοπτόμενων και περιορισμένων περιβαλλοντικών δικτύων [195]. Σε μια άλλη σχετική εργασία, υποστηρίχθηκε ότι η παροχή εξαιρετικής ακρίβειας είναι επαρκής για την ανακούφιση από καταστροφές σε πραγματικό χρόνο [196]. Η χρήση μη επανδρωμένων αεροσκαφών για την παροχή διαφόρων υπηρεσιών συζητήθηκε επίσης από τον Loke [197].

Για να εξασφαλίσει ένα έξυπνο σπίτι, ένα drone μπορεί να παρέχει προσαρμοστική ασφάλεια λειτουργώντας ως σύστημα επιτήρησης στο σπίτι. Θα χρησιμοποιεί αισθητήρες ηλιακής ενέργειας για την ανίχνευση φυσικής κίνησης, οποιοδήποτε ακουστικού σήματος, ακόμη και δονήσεων στο έδαφος και θα είναι σε θέση να προσεγγίζει και να παρακολουθεί τις περιοχές ενδιαφέροντος μόλις δοθεί περαιτέρω εντολή έρευνας. Επίσης, εκτός από τη δυνατότητα χρήσης ηλιακού εξοπλισμού, μπορούν να χρησιμοποιηθούν τεχνικές ασύρματης μετάδοσης ενέργειας για τη φόρτιση των μπαταριών των drones και των συσκευών IoT στο ωφέλιμο φορτίο του drone.

Τα συνεργατικά drones και οι συσκευές IoT υπόσχονται επίσης μια επανάσταση στη γεωργία μέσω του συνδυασμού μεγάλων δεδομένων, αεροφωτογραφιών, και άλλα μέσα για τη βελτιστοποίηση της παραγωγικότητας. Οι Wang και συν. [174] διερεύνησαν διάφορες πιθανές εφαρμογές όπου τα drones αλληλεπιδρούν με ετικέτες αισθητήρων για την εκτέλεση εργασιών όπως η ανίχνευση υγρασίας εδάφους, η απομακρυσμένη παρακολούθηση καλλιεργειών, η παρακολούθηση υποδομών, η παρακολούθηση της ποιότητας του νερού και η απομακρυσμένη ανάπτυξη αισθητήρων. Στο έργο τους, ένα drone ήταν εξοπλισμένο με συσκευές IoT και περιελάμβανε τη δυνατότητα απρόσκοπτης σύνδεσης και συλλογής δεδομένων στο cloud.

Τα συνεργατικά drones και οι συσκευές IoT μπορούν επίσης να βοηθήσουν στην παρακολούθηση των γραμμών διανομής ενέργειας, τείνουν να καλλιεργούν, ή να παραδίδουν πακέτα. Σήμερα, ένας άλλος σημαντικός τομέας και εφαρμογή των συνεργατικών drones και του IoT κάνει τη συχνά επικίνδυνη δουλειά των πληρωμάτων ισχύος στην έρευνα ζημιών από καταιγίδες ή στη συντήρηση γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η συνεργασία μεταξύ drones και συσκευών IoT μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση και επιθεώρηση κατεστραμμένων γραμμών ηλεκτρικής ενέργειας γρηγορότερα από τα επανδρωμένα μέλη του πληρώματος μετά από καταιγίδα ή τυφώνα. Επιπλέον, τα drones μπορούν να καλύψουν μια μεγαλύτερη περιοχή πολύ πιο γρήγορα, διατηρώντας παράλληλα τα πληρώματα μακριά από τον κίνδυνο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, τα drones μπορούν να στείλουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και ζωντανές ροές βίντεο πίσω σε συστήματα έξυπνων δικτύων, επιτρέποντας στις εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας να

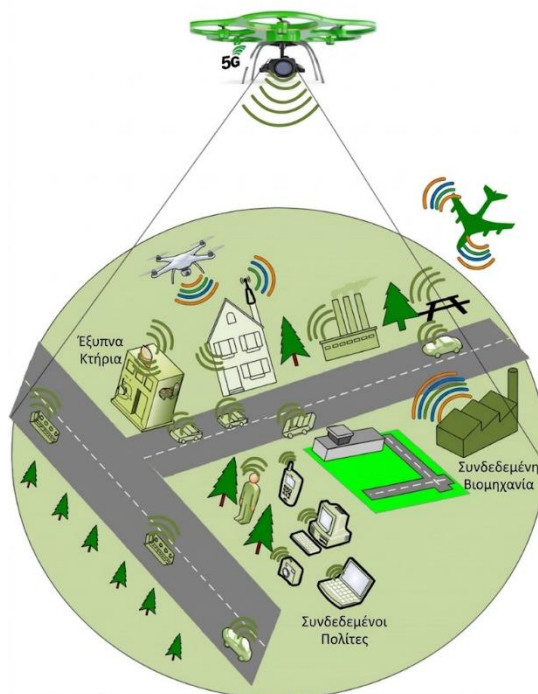
διαχειριστούν πιθανά ηλεκτρικά προβλήματα όπως ποτέ άλλοτε. Ως εκ τούτου, τα drones μειώνουν τόσο το χρόνο όσο και το κόστος επιθεώρησης.

Η συνεργασία μεταξύ drones και συσκευών IoT μπορεί επίσης να προσφέρει μια βιώσιμη λύση για εργασίες όπως η παράδοση επισιτιστικής βοήθειας και ιατρικών προμηθειών σε περιοχές που έχουν πληγεί από καταστροφή. Σήμερα, οι άνθρωποι ενδιαφέρονται πιθανώς περισσότερο για συνεργασίες μεταξύ drones και IoT για να σώσουν τις ζωές των ανθρώπων κατά τη διάρκεια της δημόσιας ασφάλειας και των καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Ως εκ τούτου, οι μελλοντικές συνεργασίες drones και φορητών / εμφυτεύσιμων ιατρικών συσκευών θα φέρουν επανάσταση στην υγειονομική περίθαλψη, πλησιάζοντας σε ένα μοντέλο στο οποίο οι αισθητήρες IoT παρακολουθούν συνεχώς την υγεία. Εάν οι ασθενείς δεν είναι σε θέση να ταξιδέψουν δεκάδες ή εκατοντάδες μίλια για να λάβουν μια διάγνωση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνεργατικές συσκευές drone και IoT για τη θεραπεία τους. Ο Πίνακας 11 απεικονίζει τις εφαρμογές των συνεργατικών drones και του IoT και τα πλεονεκτήματά τους για τις έξυπνες πόλεις. Ορισμένες από τις πιο σχετικές εφαρμογές εξηγούνται περαιτέρω παρακάτω.

Πίνακας 11: Μια περίληψη για τα συνεργατικά drones και τις εφαρμογές IoT με τα σχετικά πλεονεκτήματα.

Εφαρμογές έξυπνων πόλεων	Συνεργατική λειτουργία drones και IoT	Πλεονεκτήματα συνεργασίας
Παρακολούθηση κυκλοφορίας	• Δεδομένα κυκλοφορίας σε πραγματικό χρόνο • Έξυπνη στάθμευση αυτοκινήτων • Έλεγχος της κυκλοφορίας	Γρήγορη επεξεργασία και ακριβής λήψη αποφάσεων
Ασύρματη επικοινωνία	• Κλιμακούμενο δίκτυο επικοινωνίας • Διασύνδεση σε μεγάλη γεωγραφική περιοχή • Διατήρηση ποιότητας υπηρεσίας (QoS)	Βελτίωση της απόδοσης παροχής υπηρεσιών επικοινωνίας
Δημόσια ασφάλεια και υγειονομική περίθαλψη	• Παράδοση ιατρικού εξοπλισμού σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης • Υποστήριξη ομάδων διάσωσης και βοήθειας	• Διάσωση ανθρώπινων ζωών • Μείωση κόστους και οικονομικών απωλειών • Παροχή άμεσης υγειονομικής βοήθειας σε πραγματικό χρόνο
Διαχείριση καταστροφών	• Παρακολούθηση της κατάστασης της καταστροφής • Εξασφάλιση επικοινωνίας • Εντοπισμός και	• Διάσωση ζωών • Μείωση οικονομικών απωλειών • Αποτελεσματικός και αποδοτικός έλεγχος διαχείρισης καταστροφών • Ταχύτερη απόκριση

	παρακολούθηση επιζώντων	
Συλλογή δεδομένων	• Συλλογή δεδομένων • Αποστολή δεδομένων • Προεπεξεργασία δεδομένων • Ενέργειες βάσει των συλλεγμένων δεδομένων	• Βελτίωση ενεργειακής αποδοτικότητας των IoT συσκευών στις έξυπνες πόλεις • Παράδοση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο
Fog Computing (Υπολογισμός στην άκρη του δικτύου)	• Υπηρεσίες χαμηλής καθυστέρησης • Κατανεμημένες υπηρεσίες σε μεγάλη περιοχή • Βελτίωση της παροχής QoS • Αποδοτική επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών	• Βελτίωση της «ευφυΐας» των υπηρεσιών των έξυπνων πόλεων • Βελτίωση της ποιότητας ζωής
Διανομή (Delivering)	• Γρήγορη παράδοση αγαθών	• Καλύτερη εξυπηρέτηση πελατών • Ταχύτερη παράδοση φαγητού στις έξυπνες πόλεις



Εικόνα 7: Συνεργατικό έξυπνο drone και IoT για έξυπνες πόλεις.

9.1 Υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης και διαχείριση καταστροφών

Οι εφαρμογές έκτακτης ανάγκης στις έξυπνες πόλεις αποτελούν πολύ σημαντικό παράγοντα για τη διάσωση ανθρώπινων ζωών. Ορισμένες περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης συμβαίνουν σε δυσπρόσιτες περιοχές και οι καθυστερήσεις στη φυσική πρόσβαση σε αυτές μπορεί να επηρεάσουν την απόδοση απόκρισης. Επομένως, τα συνεργατικά drones και το IoT μπορούν να διαδραματίσουν ζωτικό ρόλο στη βελτίωση της αντιμετώπισης καταστάσεων έκτακτης ανάγκης στις έξυπνες πόλεις. Τα drones που είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες μπορούν να λειτουργήσουν ως μηδενικοί ανταποκριτές για τα θύματα σε μια πολύ πολυσύχναστη περιοχή σε έξυπνες πόλεις. Σε αυτή την περίπτωση, το drone μπορεί να στείλει την τοποθεσία του θύματος, να βρει μια ομαλή διαδρομή για το SAR και να ενημερώσει την κατάσταση σε μια ομάδα αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης, ενώ ταυτόχρονα παρακολουθεί επίσης την κατάσταση του θύματος. Επίσης, οι ομάδες απόκρισης φορούν συσκευές IoT που τους κρατούν σε επαφή με drones. Επιπλέον, τα συνεργατικά μη επανδρωμένα αεροσκάφη και το IoT μπορούν να παρέχουν κατά παραγγελία ευρυζωνικές υπηρεσίες επικοινωνίας και να συλλέγουν δεδομένα σχετικά με το περιβάλλον έκτακτης ανάγκης [198, 199].

Οι τρομοκρατικές επιθέσεις και οι φυσικές και ανθρωπογενείς καταστροφές αποτελούν παραδείγματα καταστροφών που επηρεάζουν τις έξυπνες πόλεις και αντιπροσωπεύουν πολύ δύσκολες καταστάσεις. Ο έλεγχος, η διαχείριση και η προετοιμασία τέτοιων καταστροφών είναι εξαιρετικά σημαντική. Όσο πιο γρήγορα φτάσει η ανταπόκριση στην πληγείσα περιοχή, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η μείωση του συνολικού κόστους για την οικονομία και τόσο μεγαλύτερη θα είναι η πιθανότητα να σωθούν περισσότερες ζωές. Η εναέρια πλατφόρμα έχει προταθεί ως μία τεχνολογία που μπορεί να προσφέρει ευρυζωνικές υπηρεσίες επικοινωνίας, όπως η πλατφόρμα μεγάλου υψομέτρου [200, 201] και το προσδεδεμένο μπαλόνι [200,202-204], ενώ τα μη επανδρωμένα

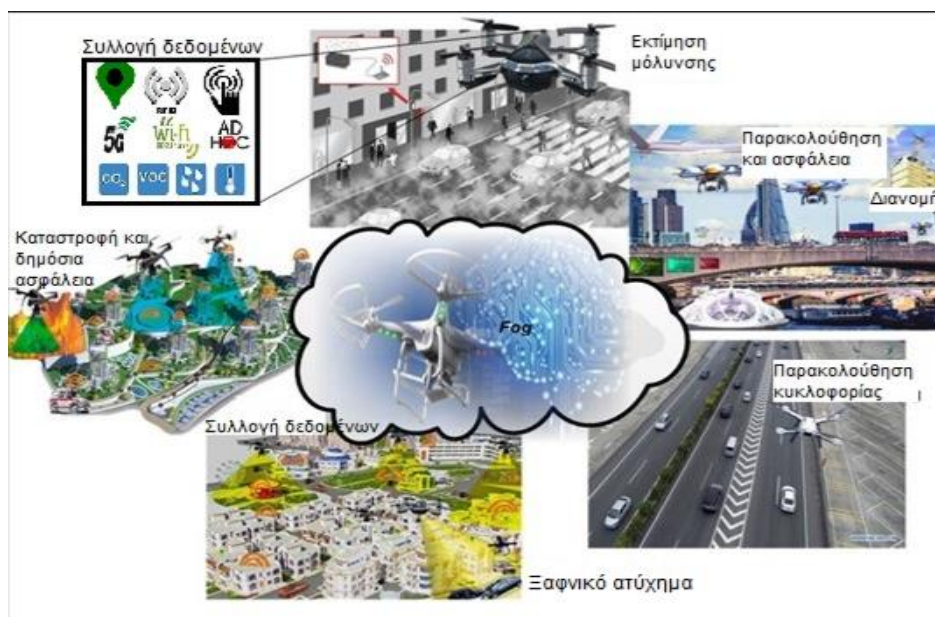
αεροσκάφη έχουν προταθεί πιο πρόσφατα ως ακόμη πιο αποτελεσματική και αποδοτική τεχνολογία για την παροχή ευρυζωνικής επικοινωνίας στην παρακολούθηση και τον μετριάσμό καταστροφών [14,32,205,206]. Επιπλέον, λόγω της ευκινήσας τους, τα drones μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά εξοπλισμού και ιατρικών προμηθειών στους άπορους.

9.2 Συλλογή δεδομένων

Οι αποτελεσματικές συνεργασίες μεταξύ drones και συσκευών IoT μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν για τη συλλογή και μεταφορά δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Στις συμβατικές τεχνικές, η μεταφορά των συλλεγόμενων δεδομένων πραγματοποιείται συνήθως μέσω multi-hops και relays, οδηγώντας σε καθυστερήσεις και σφάλματα [14, 32]. Για τέτοιες περιπτώσεις, τα συνεργατικά drones διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στη συλλογή δεδομένων από συσκευές IoT και στη μεταφορά δεδομένων στον κεντρικό σταθμό [207]. Έτσι, τα συνεργατικά drones μπορούν να μειώσουν την ενέργεια που απαιτείται από τις συσκευές IoT, μειώνοντας την απόσταση στην οποία πρέπει να μεταδοθούν δεδομένα (συσκευή IoT σε κοντινό drone, αντί για συσκευή IoT σε απομακρυσμένο σταθμό βάσης) και επεκτείνοντας έτσι τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας τους [14,21, 208]. Έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνικές για την αποτελεσματική συλλογή δεδομένων και επικοινωνία μεταξύ drones και συσκευών IoT [32, 52, 89, 209].

9.3 Παρακολούθηση της κυκλοφορίας

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που αντιμετωπίζουν οι έξυπνες πόλεις. Εμφανίζεται λόγω ξαφνικής αύξησης του αριθμού των οχημάτων για πολλούς λόγους όπως ώρες αιχμής, κατασκευαστικές εργασίες, μεγάλα γεγονότα ή ατυχήματα. Μπορεί να συμβεί ανά πάσα στιγμή σε οποιοδήποτε μέρος σε μια έξυπνη πόλη. Ως εκ τούτου, απαιτούνται αποτελεσματικές και αποδοτικές τεχνικές και τεχνολογίες για τον μετριάσμό τέτοιων καταστάσεων. Οι στατικές κάμερες που είναι εγκατεστημένες στους δρόμους μπορούν να παρέχουν ορισμένες πληροφορίες, αλλά όχι λεπτομερή αναφορά σχετικά με τη συμφόρηση [210]. Το drone είναι μια κρίσιμη τεχνολογία για τη συλλογή δεδομένων συμφόρησης και την αποστολή τους σε πραγματικό χρόνο. Διάφορες τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποδοτική και αποτελεσματική επικοινωνία και εξερεύνηση των δεδομένων που συλλέγονται από μη επανδρωμένα αεροσκάφη, όπως αυτά που παρουσιάζονται στα άρθρα των Alsamhi και συν. [14, 32], Chen και συν. [211], Kanistras και συν. [212]. Κυκλοφοριακή συμφόρηση μπορεί επίσης να προκύψει λόγω της προσπάθειας εύρεσης θέσεων στάθμευσης όταν υπάρχουν περιορισμένες θέσεις στάθμευσης. Αυτό αναγκάζει τους οδηγούς να πλοηγηθούν στην περιοχή αρκετές φορές με χαμηλή ταχύτητα. Για να βοηθήσουν σε τέτοια σενάρια, οι D'Aloia και συν. [213] πρότειναν τεχνολογία drones για τη χαρτογράφηση του χώρου στάθμευσης και την εύρεση κενών θέσεων στάθμευσης. Ως εκ τούτου, τα συνεργατικά drones και οι συσκευές IoT στα οχήματα βοηθούν τον οδηγό να βρει γρήγορα κενές θέσεις στάθμευσης.



Εικόνα 8: Παραδείγματα εφαρμογής συνεργατικών drones και IoT σε έξυπνες πόλεις.

9.4 Παρακολούθηση πλήθους και ασφάλεια

Στις έξυπνες πόλεις, τα drones μπορούν να βοηθήσουν τους αστυνομικούς στα μέτρα ασφαλείας και στην επιβολή της ασφάλειας. Λόγω της εύκολης ανάπτυξης των μη επανδρωμένων αεροσκαφών, μπορούν να αναπτυχθούν γρήγορα για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την υποστήριξη αστυνομικών επιχειρήσεων σε διάφορες περιπτώσεις, όπως ληστείες ή τροχαία [214]. Τα συνεργατικά drones και οι τεχνολογίες IoT, όπως η αναγνώριση ανθρώπινης συμπεριφοράς [215], η ανίχνευση κίνησης [216] κ.λπ., μπορούν επίσης να βοηθήσουν να γίνουν οι πόλεις πιο έξυπνες. Τέτοιες συνεργασίες μεταξύ drones και συσκευών IoT θα μπορούσαν να καταστήσουν τη διαδικασία επιτήρησης πιο αποτελεσματική και λιγότερο δαπανηρή, σε σύγκριση με το ανθρώπινο εργατικό δυναμικό.

9.5 Fog computing

Η ενσωμάτωση συσκευών IoT και cloud computing θα βελτιώσει πολλές εφαρμογές έξυπνων πόλεων λόγω της μείωσης του κόστους και της ελαστικής παροχής πόρων. Τα σύννεφα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση δεδομένων εφαρμογών IoT σε έξυπνες πόλεις. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στην εφικτή ενσωμάτωση εφαρμογών IoT και διακομιστών cloud, όπως ο λανθάνων χρόνος / χρόνος απόκρισης, κινητικότητα, δυσκολία προσθήκης ετερογενών συσκευών, και ζητήματα που σχετίζονται με την επίγνωση του περιβάλλοντος και της τοποθεσίας. Οι Bonomi και συν. [217] πρότειναν μια υπολογιστική αρχιτεκτονική ομίχλης για να ξεπεραστούν οι παραπάνω περιορισμοί.

Η έννοια του «νέφους ομίχλης» ασχολείται με τη βελτίωση της βασικής υπηρεσίας υπολογιστικού νέφους προσφέροντας μικρές πλατφόρμες τοποθετημένες στις άκρες του δικτύου, δηλαδή πιο κοντά στις συσκευές IoT. Έτσι, το fog computing παρέχει έναν εύκολο τρόπο πρόσβασης

στις υπηρεσίες αποθήκευσης πολύ κοντά στις πραγματικές εφαρμογές. Ο χρόνος απόκρισης μειώνεται έτσι. Η υπολογιστική ομίχλης έχει προταθεί για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας της λειτουργίας σε πολλές εφαρμογές όπως η διαχείριση ενέργειας, το έξυπνο δίκτυο, το έξυπνο κτίριο, οι έξυπνες μεταφορές και η παρακολούθηση της πόλης [218-220].

Είναι ενδιαφέρον ότι η υπολογιστική ομίχλης που βασίζεται σε drone είναι μια νέα έννοια που εισήχθη πρόσφατα από τους Mohamed και συν. [221], ενώ η συνεργασία μεταξύ drones και σύννεφων συζητήθηκε από τους Mahmoud και Mohamed [222, 223]. Οι Mohamed και συν. [221] εισήγαγαν τα πλεονεκτήματα των συνεργατικών drones για την υποστήριξη υπολογιστών ομίχλης που βασίζονται στο IoT με βάση την κινητικότητα των drones, την ευελιξία και την ευκολία ανάπτυξης σε έξυπνες πόλεις. Έτσι, τα συνεργατικά drones μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη φόρτωση μιας σταθερής μονάδας ομίχλης ή την αντικατάσταση μιας ελαττωματικής ή χαμένης μονάδας σε περίπτωση καταστροφής για την υποστήριξη του SAR.

9.6 Συζήτηση και μελλοντικές κατευθύνσεις

Πρόσφατα, έχουν γίνει διάφορες γόνιμες προσπάθειες για την ενίσχυση της ευφυΐας των πόλεων χρησιμοποιώντας προηγμένες τεχνικές και συνεργασία μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών. Η τεχνολογία drone, το ML και το IoT είναι το κλειδί για να γίνουν οι έξυπνες πόλεις πιο έξυπνες, πιο πράσινες και πιο βιώσιμες.

Όπως έχει αναπτυχθεί σε όλο αυτό το έγγραφο, ένας συνδυασμός drones και συσκευών IoT θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση των ακόλουθων εργασιών με πιο αποτελεσματικό τρόπο: συλλογή και διάδοση δεδομένων, παρακολούθηση της ρύπανσης, ασφάλεια και επιτήρηση, αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας, παροχή συνδέσεων επικοινωνίας κατά παραγγελία, υποστήριξη ομάδων διάσωσης και αντιμετώπισης έκτακτης ανάγκης, γεωργική παρακολούθηση, και πολλά άλλα. Ωστόσο, προτού η υποσχόμενη συνεργασία μεταξύ drones και συσκευών IoT καταστεί πλήρως λειτουργική, υπάρχουν πολλά ανοιχτά ζητήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Ο Πίνακας 12 απεικονίζει τα ανοιχτά ζητήματα και τις προκλήσεις της συνεργασίας μεταξύ drones και IoT για εφαρμογή σε έξυπνες πόλεις.

Πίνακας 12: Περίληψη ανοιχτών ζητημάτων συνεργατικών drones και εφαρμογών IoT στην έξυπνη πόλη

Συνεργατικές εφαρμογές drones και IoT	Προκλήσεις	Ανοιχτά ζητήματα
Παρακολούθηση κυκλοφορίας	• Η αποστολή βίντεο στο κέντρο ελέγχου κυκλοφορίας απαιτεί χαμηλή καθυστέρηση και υψηλό εύρος ζώνης	• Η ασφάλεια αποτελεί σημαντικό κίνδυνο λόγω πιθανών επιθέσεων (hacking)
Ασύρματη επικοινωνία	• Βελτιστοποίηση της θέσης των drones στις έξυπνες πόλεις • Καθορισμός διαδρομών πτήσης για καλύτερη κάλυψη	• Ασφάλεια και ασφαλής λειτουργία
Δημόσια ασφάλεια και υγειονομική περίθαλψη	• Απαιτήσεις αξιοπιστίας και ασφάλειας • Κόστος συντήρησης και ανάπτυξης	• Ανακριβής παράδοση ιατρικού εξοπλισμού

Διαχείριση καταστροφών	• Συντονισμός έξιπνων drones • Γρήγορη λήψη αποφάσεων • Ακριβής ανάλυση δεδομένων • Διαφορετικά σενάρια καταστροφών	• Κάθε είδος καταστροφής απαιτεί διαφορετικά εξειδικευμένα εργαλεία (drones και IoT συσκευές)
Συλλογή δεδομένων	• Ενεργειακή αποδοτικότητα • Συνύπαρξη με υπάρχοντα συστήματα • Σχεδιασμός διαδρομών	• Μεγάλη καθυστέρηση στη συλλογή δεδομένων οδηγεί σε καθυστέρηση στη λήψη αποφάσεων
Fog Computing (Υπολογισμός στην άκρη του δικτύου)	• Ενεργειακή αποδοτικότητα • Ασφάλεια • Εξισορρόπηση φορτίου και επιλογή τοποθεσίας • Συνύπαρξη με άλλα συστήματα	• Ασφάλεια και καθορισμός λειτουργικών παραμέτρων
Διανομή (Delivering)	• Συνύπαρξη με άλλα συστήματα • Αποδοτική λειτουργία	• Πιθανότητα πρόκλησης ατυχημάτων
Ασφάλεια και Ιδιωτικότητα	• Πιστοποίηση (authentication) των συλλεγμένων δεδομένων • Ενίσχυση της αξιοπιστίας των δεδομένων για βελτίωση αστυνομικών/ελεγκτικών διαδικασιών	• Ασφάλεια σε fog computing και cloud υποδομές

Ο Πίνακας 13 παρουσιάζει μια συλλογή των κατευθύνσεων που αναμένεται να ακολουθήσει η μελλοντική έρευνα στον τομέα αυτό, μαζί με μια λίστα μελλοντικών γνώσεων.

Πίνακας 13: Ερευνητικές κατευθύνσεις, προκλήσεις και ιδέες.

Μελέτη	Κατευθύνσεις	Προκλήσεις	Μελλοντικές προοπτικές
[26] (2016)	Υπηρεσίες IoT βασισμένες σε drones	• Διαχείριση και έλεγχος μεγάλου αριθμού drones • Τα drones φέρουν πολλαπλές IoT συσκευές • Λήψη βίντεο από διαφορετικές γωνίες από την ίδια θέση	• Ανάπτυξη αποδοτικών μεθόδων για τη διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας των IoT συσκευών στα drones • Η ασφάλεια είναι κρίσιμο ζήτημα — απαιτούνται αποτελεσματικές τεχνικές για αποφυγή επιθέσεων (hacking) στην επικοινωνία των drones
[224] (2014)	Βελτίωση χρόνου πτήσης	• Διάρκεια ζωής μπαταρίας	• Βελτίωση της μπαταρίας ώστε τα drones να πετούν μεγαλύτερες αποστάσεις και για περισσότερο χρόνο

[30] (2017)	• Εφαρμογές πραγματικού χρόνου • Επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο • Ακριβής λήψη αποφάσεων	• Συλλογή μεγάλου όγκου μη επισημασμένων δεδομένων με χαμηλό κόστος • Άλυτα προβλήματα του πραγματικού κόσμου	• Ενσωμάτωση τεχνικών βαθιάς μάθησης (Deep Learning - DL) στα drones για αποδοτική ανάλυση δεδομένων χαμηλής κατανάλωσης, υποστηρίζοντας εφαρμογές πραγματικού χρόνου
[225] (2016)	Κατανάλωση ενέργειας	• Περιορισμοί ενέργειας	• Ανάπτυξη αποδοτικών μπαταριών, ελαφρύτερων υλικών και τεχνικών συλλογής ενέργειας (energy harvesting) για ευρύτερη αξιοποίηση των drones
[31] (2017)	Ευφυείς τεχνικές	• Περιορισμοί μπαταρίας • Αξιόπιστη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο με κέντρο ελέγχου (με απαιτήσεις QoS και ενέργειας)	• Ανάπτυξη και υλοποίηση αποδοτικών κατανεμημένων αλγορίθμων ενέργειας για επεξεργασία εικόνων, βίντεο και δεδομένων από σμήνη drones σε πραγματικό χρόνο
[186] (2019)	Λύσεις για επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης (SAR)	• Ασφάλεια σε περιοχές καταστροφών • Ελαχιστοποίηση αλλαγών στις υπάρχουσες υποδομές έξυπνων πόλεων • Αξιοποίηση μεγάλου όγκου ήδη διαθέσιμων δεδομένων	• Χρήση drones με κάμερες σε κάθε είδος καταστροφής • Εφαρμογή Deep Learning σε μη δομημένα οπτικά δεδομένα για: 1. Βελτίωση της απόκρισης σε καταστροφές 2. Παροχή πιο πλούσιων πληροφοριών μέσω ανάλυσης εικόνων και βίντεο
[133]	Ασφάλεια και ιδιωτικότητα	• Εξαγωγή κατάστασης drone σε πραγματικό χρόνο χωρίς απενεργοποίηση	• Ασφάλιση της βέλτιστης και συντομότερης διαδρομής • Προστασία της θέσης του drone
[139]	Ευφυείς τεχνικές για ασφαλές Internet of Drones (IoD)	• Ασφάλεια δεδομένων κατά τη μετάδοση • Ελεγχόμενη πρόσβαση σε δεδομένα αισθητήρων	• Εφαρμογή τεχνικών μηχανικής μάθησης (ML) μεταξύ fog (drone) και cloud IoT • Χρήση ML για ασφάλεια στη μετάδοση δεδομένων μεταξύ IoT συσκευών και fog (drone)

Τα πιο πιεστικά ζητήματα σε αυτόν τον τομέα περιλαμβάνουν την παράταση της διάρκειας ζωής της μπαταρίας των drones, την κατασκευή καλύτερων και αξιόπιστων πρωτοκόλλων επικοινωνίας μεταξύ των drones και των σταθμών βάσης, τη βελτίωση της ασφάλειας των δεδομένων, τον σχεδιασμό διαδρομής για τα drones και την ενσωμάτωση της ικανότητας αντιμετώπισης μιας ευρείας ποικιλίας ετερογενών συσκευών και αισθητήρων, βελτιώνοντας παράλληλα την παρούσα ικανότητά τους να λαμβάνουν ενημερωμένες και έξυπνες αποφάσεις.

Σχετικά με την ανάπτυξη πιο έξυπνων και προσανατολισμένων στην προστασία της ιδιωτικής ζωής drones, η χρήση της ML για ασφάλεια με προσοχή στην ιδιωτικότητα αναφέρεται από τους Finn και Wright [226]. Για να διατηρηθεί το δίκτυο ασφαλές από επιθέσεις στον κυβερνοχώρο, μπορεί να εφαρμοστεί ML μεταξύ του πλαισίου IoT και των drones. Η ML μπορεί επίσης να εφαρμοστεί για την ανίχνευση επιθέσεων κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης και για τον εντοπισμό τρωτών σημείων ασφαλείας χρησιμοποιώντας αντιπαραθετικές ρυθμίσεις [227-230]. Ωστόσο, οι τρέχουσες τεχνικές δεν εξαλείφουν όλους τους τύπους τρωτών σημείων. Ως εκ τούτου, απαιτείται προηγμένη έρευνα για την εξεύρεση καλύτερων λύσεων για την εξασφάλιση των συνεργατικών δικτύων drones και συσκευών IoT. Επιπλέον, ο σχεδιασμός ασφαλών τεχνικών ελέγχου ταυτότητας για ετερογενές συνεργατικό περιβάλλον είναι μια άλλη πρόκληση. Το ζήτημα αυτό εντοπίστηκε για πρώτη φορά από τους Wang και συν. [231], οι οποίοι επεσήμαναν αρκετές ελλείψεις στις τεχνικές ελέγχου ταυτότητας των έξυπνων πόλεων.

9.7 Σύνοψη της βιβλιογραφικής επισκόπησης

Η βιβλιογραφική επισκόπηση δείχνει ότι η συνεργασία drones και IoT αποτελεί κρίσιμο πεδίο για την ενίσχυση της ευφυΐας των έξυπνων πόλεων, καθώς υποστηρίζει υπηρεσίες επιτήρησης, συλλογής δεδομένων, ενεργειακής βελτιστοποίησης, δημόσιας ασφάλειας και διαχείρισης κρίσεων. Παράλληλα, αναδεικνύεται η ανάγκη για αξιόπιστη συνδεσιμότητα και αποδοτική επιλογή δικτύου σε περιβάλλοντα 5G [232]. Για τον λόγο αυτό, στο επόμενο μέρος της εργασίας παρουσιάζεται μια στοχευμένη μελέτη περίπτωσης πάνω σε αλγόριθμο επιλογής δικτύου για υπηρεσίες drone.

10. Μελέτη περίπτωσης: Αλγόριθμος επιλογής δικτύου για την υποστήριξη υπηρεσιών drone σε αρχιτεκτονικές δικτύων 5G

10.1 Στόχος και πλαίσιο της μελέτης

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας εξετάζεται μια ειδική περίπτωση επιλογής δικτύου σε περιβάλλοντα FANET και 5G, όπου διαφορετικές τεχνολογίες πρόσβασης αξιοποιούνται για την κάλυψη των απαιτήσεων των υπηρεσιών drone. Η ενότητα αυτή δεν παρουσιάζει νέο αλγόριθμο ως πρωτότυπη συνεισφορά της παρούσας εργασίας, αλλά μελετά και αποτιμά τον αλγόριθμο DTFT-ACW, όπως έχει παρουσιαστεί στη σχετική δημοσίευση των Skondras και συν. για υποστήριξη υπηρεσιών drone σε αρχιτεκτονικές δικτύων 5G [233].

10.2 Ερευνητικό πλαίσιο

Σήμερα, η χρήση των Ιπτάμενων Δικτύων Ad-hoc (FANETs) [234, 235] έχει εμφανιστεί γρήγορα. Σε περιβάλλον FANET, τα drones εξοπλισμένα με υπολογιστικούς και δικτυακούς πόρους, επικοινωνούν μεταξύ τους μέσω επικοινωνίας Drone to Drone (D2D) [236], καθώς και με υποδομές δικτύου 5G μέσω επικοινωνίας Drone to Infrastructure (D2I) [237]. Οι κύριες βασικές τεχνολογίες γενικής εφαρμογής για τα δίκτυα 5G περιλαμβάνουν το υπολογιστικό νέφος (CC) [238] και τη δικτύωση μέσω λογισμικού (SDN) [239]. Ενδεικτικά, μια υποδομή Cloud μπορεί να προσφέρει σύγχρονες υπηρεσίες στο FANET μέσω επικοινωνίας D2I, τόσο για καταστάσεις διαχείρισης καταστροφών όσο και για καταστάσεις μη καταστροφών. Οι υπηρεσίες διαχείρισης καταστροφών (DM) αναφέρονται στη χειραγώγηση φυσικών καταστροφών και περιλαμβάνουν συλλογή πληροφοριών επίγνωσης καταστροφών (DIG), ζωντανή ροή βίντεο για χειρισμό έκτακτης ανάγκης (LVS-EM) και μετάδοση εικόνας για χειρισμό έκτακτης ανάγκης (IMT-EM). Αντίστοιχα, οι υπηρεσίες μη διαχείρισης καταστροφών (nDM) περιλαμβάνουν ζωντανή ροή βίντεο (LVS), μετάδοση εικόνας (IMT) και σάρωση 3D (3DS).

Η ανθεκτικότητα και ο λανθάνων χρόνος απόκρισης της αρχιτεκτονικής 5G θα μπορούσαν να βελτιωθούν με την εφαρμογή των αρχών λειτουργίας του Mobile Edge Computing (MEC) [240], με αποτέλεσμα τη δημιουργία υποδομής ομίχλης στην άκρη του δικτύου. Συγκεκριμένα, οι σταθμοί βάσης είναι εξοπλισμένοι με πρόσθετους υπολογιστικούς και αποθηκευτικούς πόρους. Επιπλέον, για την υποστήριξη των αναγκών επικοινωνίας των τερματικών 5G, εφαρμόζονται πυκνές αναπτύξεις δικτύων πρόσβασης, που ονομάζονται Ultra Dense Networks (UDN) [241]. Τα UDN στοχεύουν στην υποστήριξη υψηλών ρυθμών δεδομένων που παράγονται από αυξημένο αριθμό χρηστών. Ένας μεγάλος αριθμός μικρών κυψελών, όπως τα Femtocells, αναπτύσσεται εντός της περιοχής κάλυψης του δικτύου προκειμένου να αυξηθεί η συνολική χωρητικότητα του δικτύου πρόσβασης [242,243]. Ωστόσο, σε περιβάλλον FANET, τα drones αποκτούν πολύ υψηλές ταχύτητες. Σε αυτή την περίπτωση, τα Femtocells θεωρούνται ως ακατάλληλη λύση, λόγω του μικρού χρόνου που κάθε drone παραμένει μέσα στην περιοχή κάλυψής τους. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, η πυκνωση των πόρων πρόσβασης στο δίκτυο θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή των αρχών λειτουργίας του Massive Multiple Input Multiple Output (Massive MIMO) [244]. Συγκεκριμένα, το Massive MIMO μπορεί να εφαρμοστεί σε μια υποδομή Macrocells, αντί να χρησιμοποιεί πυκνές αναπτύξεις Femtocells με λίγες κεραίες εγκατεστημένες σε κάθε μία.

Όσον αφορά τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό Massive MIMO, η 3GPP έχει καθορίσει το Full-Dimension MIMO (FD-MIMO) ως μέρος της τεχνολογίας LTE-A Pro [245]. Το FD-MIMO επιτρέπει τη χρήση δεκάδων κεραιών σε κάθε LTE-A Pro eNB [246].

Τα drones θα πρέπει πάντα να έχουν συνδεσιμότητα με το καλύτερο δίκτυο, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των υπηρεσιών τους. Ως εκ τούτου, απαιτείται ο σχεδιασμός αποτελεσματικών συστημάτων επιλογής δικτύου. Γενικά, οι μέθοδοι Multi Attribute Decision Making (MADM) χρησιμοποιούνται για την επιλογή της καλύτερης εναλλακτικής λύσης μεταξύ των υποψήφιων δικτύων, δεδομένου ενός συνόλου κριτηρίων με διαφορετική βαρύτητα σπουδαιότητας. Ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι περιλαμβάνουν τη διαδικασία αναλυτικής ιεραρχίας (AHP) [247], τη διαδικασία αναλυτικού δικτύου (ANP) [248], την τεχνική προτίμησης τάξης με ομοιότητα με την ιδανική λύση (TOPSIS) [249], την τραπεζοειδή ασαφή TOPSIS (TFT) [250], τη δυναμική TOPSIS (DTOPSIS) [251], την απλή προσθετική στάθμιση (SAW) [247, 252], την ασαφή SAW (FSAW) [253], την πολλαπλασιαστική εκθετική στάθμιση (MEW) [247] και την ασαφή MEW (FMEW) [254].

Στην παρούσα εργασία μελετάται ένας αλγόριθμος επιλογής δικτύου για την υποστήριξη υπηρεσιών drone σε αρχιτεκτονικές δικτύων 5G μέσω επικοινωνιών D2I. Ο αλγόριθμος αυτός, με την ονομασία DTFT-ACW, έχει προταθεί στο paper «A Network Selection Algorithm for supporting Drone Services in 5G Network Architectures» των Skondras, Zoumi, Michalas και Vergados και εξετάζεται εδώ ως αντιπροσωπευτική μελέτη περίπτωσης.

Η ενότητα που ακολουθεί συνοψίζει τη λογική του αλγορίθμου και στη συνέχεια παρουσιάζει τη ρύθμιση της προσομοίωσης και τα βασικά αποτελέσματα της αξιολόγησής του.

10.3 Ο αλγόριθμος DTFT-ACW όπως έχει προταθεί στη βιβλιογραφία

Ο Δυναμικός Τραπεζοειδής Ασαφής TOPSIS με Προσαρμοστικά Κριτήρια Στάθμισης (DTFT-ACW) έχει προταθεί στη βιβλιογραφία για την κατάταξη υποψήφιων δικτύων σε περιβάλλοντα 5G που εξυπηρετούν υπηρεσίες drone. Στην παρούσα εργασία ο αλγόριθμος μελετάται και παρουσιάζεται συνοπτικά, χωρίς να αντιμετωπίζεται ως πρωτότυπη πρόταση της ίδιας της διπλωματικής.

Η επιλογή δικτύου που πραγματοποιήθηκε σε χρόνο t λαμβάνει υπόψη την προηγούμενη απόφαση επιλογής δικτύου που πραγματοποιήθηκε σε χρόνο $t_{prev} < t$. Σε κάθε φορά t , κατασκευάζεται μια λίστα $AL(t) = \{AL_1(t), AL_2(t), \dots, AL_z(t)\}$ που καθορίζει τις τρέχουσες εναλλακτικές λύσεις δικτύου. Εάν $AL(t) = AL(t_{prev})$ τότε λαμβάνονται υπόψη οι τάξεις των εναλλακτικών λύσεων που λαμβάνονται τη χρονική στιγμή t_{prev} , με αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα $O(n)$ για τον προτεινόμενο αλγόριθμο. Διαφορετικά, εκτελούνται οι μέθοδοι που ορίζονται από τον αλγόριθμο TFT-ACW, με αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα $O(n^2)$, η οποία εισάγεται επίσης από τους περισσότερους αλγόριθμους επιλογής δικτύου που περιγράφονται στην ερευνητική βιβλιογραφία. Σε αυτή την περίπτωση, παρόμοια με τον αλγόριθμο TFTACW, το DTFT-ACW υποθέτει ότι οι γλωσσικές τιμές των χαρακτηριστικών κριτηρίων αντιπροσωπεύονται από τραπεζοειδείς ασαφείς αριθμούς διαστήματος [255]. Ένα IVTFN ορίζεται ως $\tilde{a} = [\tilde{a}^L, \tilde{a}^U]$ που αποτελείται από το κατώτερο $\tilde{a}^L$ και το ανώτερο $\tilde{a}^U$ τραπεζοειδείς ασαφείς αριθμούς. Τα IVTFN αντικαθιστούν τις ευκρινείς τιμές ιδιότητας μέλους με διαστήματα στο $[0, 1]$, καθώς οι ασαφείς πληροφορίες μπορούν να εκφραστούν καλύτερα με διαστήματα παρά με μεμονωμένες τιμές. Συγκεκριμένα, ένα IVTFN μπορεί να αναπαρασταθεί ως: $\tilde{a} = [\tilde{a}^L, \tilde{a}^U] = [(a^{L_1}, a^{L_2}, a^{L_3}, a^{L_4}, v^L), (a^{U_1}, a^{U_2}, a^{U_3}, a^{U_4}, v^U)]$ όπου: $0 \leq a^{L_1} \leq a^{L_2} \leq a^{L_3} \leq a^{L_4} \leq 1$, $0 \leq a^{U_1} \leq a^{U_2} \leq a^{U_3} \leq a^{U_4} \leq 1$, $0 \leq v^L \leq v^U \leq 1$ και $\tilde{a}^L \subset \tilde{a}^U$.

Ένα σύνολο κριτηρίων επιλογής δικτύου $CR(t) = \{CR_1(t), CR_2(t), \dots, CR_n(t)\}$ θεωρείται, ενώ $w_1, w_2, \dots, w_n$ δηλώνει τη βαρύτητα σπουδαιότητας των αντίστοιχων κριτηρίων που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου Trapezoidal Fuzzy Adaptive Analytic Network Process (TF-AANP) που περιγράφεται στο [256]. Το TF-AANP προσαρμόζει τους συντελεστές στάθμισης των κριτηρίων λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική σημασία των χρησιμοποιούμενων υπηρεσιών, δεδομένου ότι ορισμένες υπηρεσίες θα μπορούσαν να έχουν μεγαλύτερη σημασία από τις άλλες. Συγκεκριμένα, η σχετική σημασία κάθε υπηρεσίας s προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας ένα διάνυσμα προτεραιότητας $\tilde{\Omega}$ που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο (1) όπου κάθε $\tilde{\omega}_s = (\omega^{U_1}, \omega^{U_2}, \omega^{U_3}, \omega^{U_4}, v^U_s)$; $(\omega^{L_1}, \omega^{L_2}, \omega^{L_3}, \omega^{L_4}, v^L_s)$ και S δηλώνει τον αριθμό των υπηρεσιών.

$$\tilde{\Omega} = [\tilde{\omega}_1 \quad \tilde{\omega}_2 \quad \dots \quad \tilde{\omega}_S] \quad (1)$$

Επιπλέον, η μέθοδος TF-AANP λαμβάνει υπόψη κρίσιμους παράγοντες που επηρεάζουν τη σημασία κάθε κριτηρίου, όπως το επίπεδο σοβαρότητας μιας φυσικής καταστροφής.

Τα βασικά βήματα του αλγορίθμου, όπως περιγράφονται στη σχετική δημοσίευση, είναι τα εξής:

- Κατασκευή του πίνακα αποφάσεων: Κάθε στοιχείο $\tilde{g}_{ie}(t)$ του πίνακα αποφάσεων $z \times n$ $\tilde{D}^-(t)$ είναι ένας αριθμός IVTFN που εκφράζει την απόδοση του εναλλακτικού AL_i για το κριτήριο CR_e . Έτσι

$$\tilde{D}(t) = \begin{cases} \tilde{D}(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \begin{array}{c|ccc} & CR_1(t) & \dots & CR_n(t) \\ \hline AL_1(t) & \tilde{g}_{11}(t) & \dots & \tilde{g}_{1n}(t) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ AL_z(t) & \tilde{g}_{z1}(t) & \dots & \tilde{g}_{zn}(t) \end{array}, & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (2)$$

where $\tilde{g}_{ie}(t) = [(g_{ie1}^L(t), g_{ie2}^L(t), g_{ie3}^L(t), g_{ie4}^L(t), v_{ie}^L(t)), (g_{ie1}^U(t), g_{ie2}^U(t), g_{ie3}^U(t), g_{ie4}^U(t), v_{ie}^U(t))]$.

Σε περίπτωση που υπάρχουν υπηρεσίες S, ο πίνακας αποφάσεων περιλαμβάνει τον μέσο όρο των τιμών απόδοσης. Ως εκ τούτου, υποθέτοντας ότι για την υπηρεσία s $\tilde{g}_{ies}(t)$ είναι η απόδοση της εναλλακτικής λύσης δικτύου i για το κριτήριο e, ο μέσος όρος των τιμών επιδόσεων δίνεται από τον τύπο (3).

$$\tilde{g}_{ie}(t) = \begin{cases} \tilde{g}_{ie}(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \sum_{s=1}^S (\tilde{g}_{ies}(t) \cdot \tilde{w}_s), & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (3)$$

- b) Κανονικοποίηση του πίνακα αποφάσεων: Θεωρήστε ότι το Γ_b είναι το σύνολο των χαρακτηριστικών παροχών και το Γ_c είναι το σύνολο των χαρακτηριστικών κόστους. Στη συνέχεια, τα στοιχεία του κανονικοποιημένου πίνακα αποφάσεων υπολογίζονται χρησιμοποιώντας είτε τον τύπο (4) είτε τον τύπο (5), όπου $b_e(t) = \max_i g_{ie4}^U(t)$ για κάθε $e \in \Gamma_b$ και $c_e(t) = \min_i g_{ie4}^L(t)$ για κάθε $e \in \Gamma_c$.

$$\tilde{g}'_{ie}(t) = \begin{cases} \tilde{g}'_{ie}(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \left[\left(\frac{g_{ie1}^L(t)}{b_e(t)}, \frac{g_{ie2}^L(t)}{b_e(t)}, \frac{g_{ie3}^L(t)}{b_e(t)}, \frac{g_{ie4}^L(t)}{b_e(t)}, v_{ie}^L(t) \right), \right. \\ \left. \left(\frac{g_{ie1}^U(t)}{b_e(t)}, \frac{g_{ie2}^U(t)}{b_e(t)}, \frac{g_{ie3}^U(t)}{b_e(t)}, \frac{g_{ie4}^U(t)}{b_e(t)}, v_{ie}^U(t) \right) \right], & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{g}'_{ie}(t) = \begin{cases} \tilde{g}'_{ie}(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \left[\left(\frac{c_e(t)}{g_{ie4}^L(t)}, \frac{c_e(t)}{g_{ie3}^L(t)}, \frac{c_e(t)}{g_{ie2}^L(t)}, \frac{c_e(t)}{g_{ie1}^L(t)}, v_{ie}^L(t) \right), \right. \\ \left. \left(\frac{c_e(t)}{g_{ie4}^U(t)}, \frac{c_e(t)}{g_{ie3}^U(t)}, \frac{c_e(t)}{g_{ie2}^U(t)}, \frac{c_e(t)}{g_{ie1}^U(t)}, v_{ie}^U(t) \right) \right], & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (5)$$

- c) Κατασκευή του σταθμισμένου κανονικοποιημένου πίνακα αποφάσεων: Ο σταθμισμένος κανονικοποιημένος πίνακας αποφάσεων κατασκευάζεται πολλαπλασιάζοντας κάθε στοιχείο του κανονικοποιημένου πίνακα αποφάσεων $\tilde{g}'_{ie}(t)$ με το αντίστοιχο βάρος w_e σύμφωνα με τον τύπο (6).

$$\tilde{u}_{ie}(t) = \begin{cases} \tilde{u}_{ie}(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \left[\begin{aligned} & \left(g_{ie1}^L(t) \cdot w_e, g_{ie2}^L(t) \cdot w_e, g_{ie3}^L(t) \cdot w_e, g_{ie4}^L(t) \cdot w_e, v_{ie}^L(t) \right), \\ & \left(g_{ie1}^U(t) \cdot w_e, g_{ie2}^U(t) \cdot w_e, g_{ie3}^U(t) \cdot w_e, g_{ie4}^U(t) \cdot w_e, v_{ie}^U(t) \right) \end{aligned} \right], & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (6)$$

- d) Προσδιορισμός του θετικού και αρνητικού ιδανικού διαλύματος: Το θετικό ιδανικό διάλυμα ορίζεται στον τύπο (7), όπου $\Lambda \equiv \max_i$ στην περίπτωση $e \in \Gamma_b$ και $\Lambda \equiv \min_i$ στην περίπτωση $e \in \Gamma_c$. Αντίστοιχα, ορίζεται η αρνητική ιδανική λύση στον τύπο (8), όπου $\forall_i \equiv \min_i$ στην περίπτωση $e \in \Gamma_b$ και $\forall_i \equiv \max_i$ στην περίπτωση $e \in \Gamma_c$.

$$\tilde{G}^+(t) = \begin{cases} G^+(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \left[\begin{aligned} & \left(g_{ie1}^+L(t), g_{ie2}^+L(t), g_{ie3}^+L(t), g_{ie4}^+L(t), v_{ie}^+L(t) \right), \\ & \left(g_{ie1}^+U(t), g_{ie2}^+U(t), g_{ie3}^+U(t), g_{ie4}^+U(t), v_{ie}^+U(t) \right) \end{aligned} \right] = \\ \left[\begin{aligned} & \left(\bigwedge_t u_{ie1}^L(t), \bigwedge_t u_{ie2}^L(t), \bigwedge_t u_{ie3}^L(t), \bigwedge_t u_{ie4}^L(t), v_{ie}^L(t) \right), \\ & \left(\bigwedge_t u_{ie1}^U(t), \bigwedge_t u_{ie2}^U(t), \bigwedge_t u_{ie3}^U(t), \bigwedge_t u_{ie4}^U(t), v_{ie}^U(t) \right) \end{aligned} \right], & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\tilde{G}^-(t) = \begin{cases} \tilde{G}^-(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \left[\begin{aligned} & \left(g_{ie1}^-L(t), g_{ie2}^-L(t), g_{ie3}^-L(t), g_{ie4}^-L(t), v_{ie}^-L(t) \right), \\ & \left(g_{ie1}^-U(t), g_{ie2}^-U(t), g_{ie3}^-U(t), g_{ie4}^-U(t), v_{ie}^-U(t) \right) \end{aligned} \right] = \\ \left[\begin{aligned} & \left(\bigvee_t u_{ie1}^L(t), \bigvee_t u_{ie2}^L(t), \bigvee_t u_{ie3}^L(t), \bigvee_t u_{ie4}^L(t), v_{ie}^L(t) \right), \\ & \left(\bigvee_t u_{ie1}^U(t), \bigvee_t u_{ie2}^U(t), \bigvee_t u_{ie3}^U(t), \bigvee_t u_{ie4}^U(t), v_{ie}^U(t) \right) \end{aligned} \right], & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (8)$$

- e) Μέτρηση της απόστασης κάθε εναλλακτικής λύσης από τις ιδανικές λύσεις: Οι αποστάσεις κάθε εναλλακτικής λύσης από το θετικό ιδανικό διάλυμα αξιολογούνται χρησιμοποιώντας τύπους (9) και (10). Ομοίως, οι αποστάσεις κάθε εναλλακτικής λύσης από το αρνητικό ιδανικό διάλυμα εκτιμώνται χρησιμοποιώντας τύπους (11) και (12).

$$p_{i1}^+(t) = \begin{cases} p_{i1}^+(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \sum_{e=1}^n \left\{ \frac{1}{4} \left[\left(u_{ie1}^L(t) - g_{ie1}^{+L}(t) \right)^2 + \left(u_{ie2}^L(t) - g_{ie2}^{+L}(t) \right)^2 + \left(u_{ie3}^L(t) - g_{ie3}^{+L}(t) \right)^2 + \left(u_{ie4}^L(t) - g_{ie4}^{+L}(t) \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (9)$$

$$p_{i2}^+(t) = \begin{cases} p_{i2}^+(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \sum_{e=1}^n \left\{ \frac{1}{4} \left[\left(u_{ie1}^U(t) - g_{ie1}^{+U}(t) \right)^2 + \left(u_{ie2}^U(t) - g_{ie2}^{+U}(t) \right)^2 + \left(u_{ie3}^U(t) - g_{ie3}^{+U}(t) \right)^2 + \left(u_{ie4}^U(t) - g_{ie4}^{+U}(t) \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (10)$$

$$p_{i1}^-(t) = \begin{cases} p_{i1}^-(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \sum_{e=1}^n \left\{ \frac{1}{4} \left[\left(u_{ie1}^L(t) - g_{ie1}^{-L}(t) \right)^2 + \left(u_{ie2}^L(t) - g_{ie2}^{-L}(t) \right)^2 + \left(u_{ie3}^L(t) - g_{ie3}^{-L}(t) \right)^2 + \left(u_{ie4}^L(t) - g_{ie4}^{-L}(t) \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (11)$$

$$p_{i2}^-(t) = \begin{cases} p_{i2}^-(t_{prev}), & \text{if } AL(t) = AL(t_{prev}) \\ \sum_{e=1}^n \left\{ \frac{1}{4} \left[\left(u_{ie1}^U(t) - g_{ie1}^{-U}(t) \right)^2 + \left(u_{ie2}^U(t) - g_{ie2}^{-U}(t) \right)^2 + \left(u_{ie3}^U(t) - g_{ie3}^{-U}(t) \right)^2 + \left(u_{ie4}^U(t) - g_{ie4}^{-U}(t) \right)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}, & \text{if } AL(t) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (12)$$

Κατά συνέπεια, οι εναλλακτικές αποστάσεις από τις θετικές και αρνητικές ιδανικές λύσεις εκφράζονται με διαστήματα όπως $[p_{i1}^+(t), p_{i2}^+(t)]$ και $[p_{i1}^-(t), p_{i2}^-(t)]$, αντί για μεμονωμένες τιμές, καθώς με αυτόν τον τρόπο χάνονται λιγότερες πληροφορίες.

- f) Υπολογισμός της σχετικής εγγύτητας: Η σχετική εγγύτητα των αποστάσεων από τις ιδανικές λύσεις υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τύπους (13) και (14). Στη συνέχεια, η σύνθετη σχετική εγγύτητα λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τον τύπο (15).

$$RC_{i1}(t) = \begin{cases} RC_{i1}(t_{prev}) , & \text{if } AL(i) = AL(t_{prev}) \\ \frac{p_{i1}^-(t)}{p_{i1}^+(t) + p_{i1}^-(t)} , & \text{if } AL(i) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (13)$$

$$RC_{i2}(t) = \begin{cases} RC_{i2}(t_{prev}) , & \text{if } AL(i) = AL(t_{prev}) \\ \frac{p_{i2}^-(t)}{p_{i2}^+(t) + p_{i2}^-(t)} , & \text{if } AL(i) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (14)$$

$$RC_i(t) = \begin{cases} RC_i(t_{prev}) , & \text{if } AL(i) = AL(t_{prev}) \\ \frac{RC_{i1}(t) + RC_{i2}(t)}{2} , & \text{if } AL(i) \neq AL(t_{prev}) \end{cases} \quad (15)$$

- g) Κατάταξη εναλλακτικών λύσεων: Τα εναλλακτικά δίκτυα κατατάσσονται σύμφωνα με τις τιμές $RC_i(t)$, ενώ η καλύτερη εναλλακτική λύση είναι αυτή με την υψηλότερη τιμή $RC_i(t)$.

10.4 Ρύθμιση και αποτελέσματα προσομοίωσης

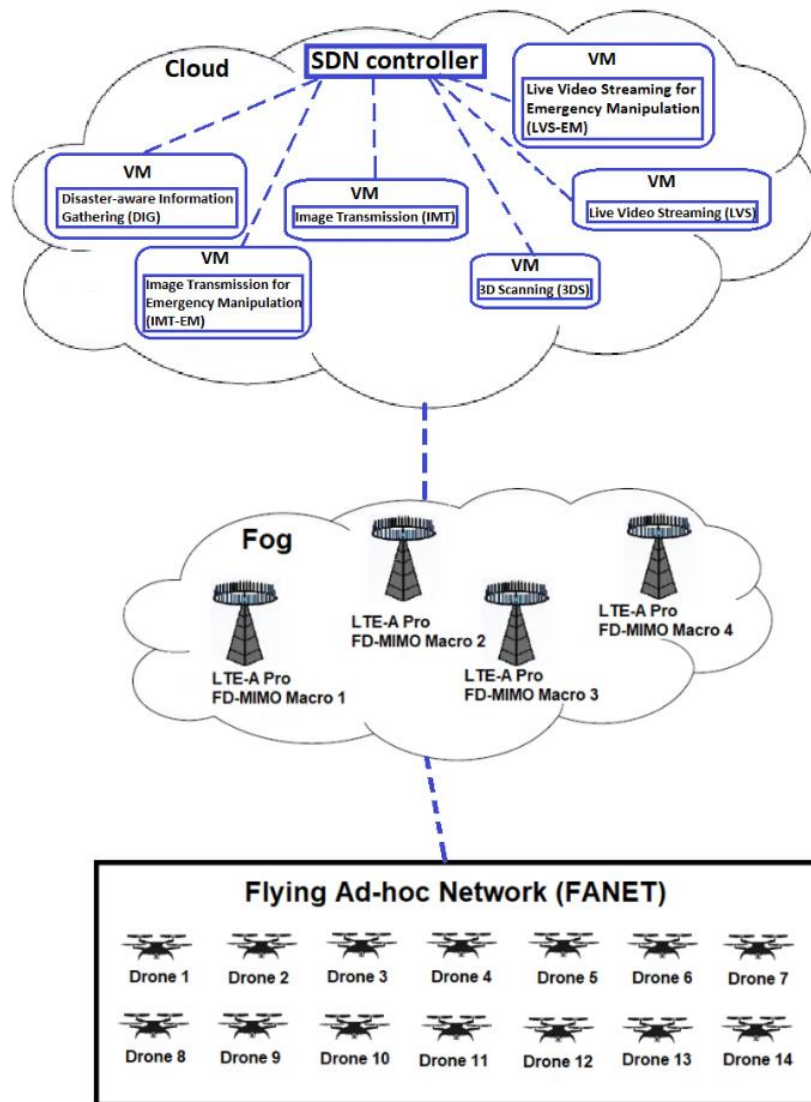
Στα πειράματά μας, η αρχιτεκτονική δικτύου 5G που παρουσιάζεται στο σχήμα 9 προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή Network Simulator 3 (NS3) [257]. Περιλαμβάνει μια υποδομή ομίχλης και Cloud. Η υποδομή Fog αποτελείται από 4 LTE-A Pro Macrocells με κεραίες FD-MIMO. Επιπλέον, η υποδομή Cloud περιλαμβάνει ένα σύνολο εικονικών μηχανών (VM) που παρέχουν υπηρεσίες διαχείρισης καταστροφών (DM) και μη διαχείρισης καταστροφών (nDM). Οι υπηρεσίες DM περιλαμβάνουν Disasteraware Information Gathering (DIG), Live Video Streaming for Emergency Manipulation (LVS-EM) και Image Transmission for Emergency Manipulation (IMT-EM). Αντίστοιχα, οι υπηρεσίες nDM περιλαμβάνουν Live Video Streaming (LVS), Image Transmission (IMT) και μετάδοση μοντέλων που δημιουργούνται μέσω 3D Scanning (3DS). Ένας ελεγκτής δικτύου που ορίζεται από λογισμικό (SDN) παρέχει κεντρικό έλεγχο ολόκληρου του συστήματος.

Στον Πίνακα 14 παρουσιάζονται οι γλωσσικοί όροι και οι αντίστοιχοι τραπεζοειδείς ασαφείς αριθμοί διαστήματος (IVTFN) που χρησιμοποιούνται για τα χαρακτηριστικά κριτηρίων των διαθέσιμων δικτύων πρόσβασης. Επίσης, στον πίνακα II παρουσιάζονται οι προδιαγραφές κάθε δικτύου για κάθε υπηρεσία, όσον αφορά τη διεκπεραίωση, την καθυστέρηση, το jitter, την αναλογία απώλειας πακέτων, την αξιοπιστία της υπηρεσίας, την ασφάλεια και την τιμή. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αξιοπιστία των υπηρεσιών καθορίζει την ικανότητα των περιορισμών της υπηρεσίας, την ικανοποίηση και τη βελτιστοποίηση της απόδοσης όταν ένα δίκτυο είναι κορεσμένο.

Πίνακας 14: Γλωσσικοί όροι και οι αντίστοιχοι τραπεζοειδείς ασαφείς αριθμοί που χρησιμοποιούνται για τα χαρακτηριστικά κριτήρια.

Γλωσσικός Όρος	Τραπεζοειδής Ασαφής Αριθμός με Διαστήματα
Απόλυτα Κακό [Absolutely Poor (AP)]	[(0.0 0.0 0.06 0.09 0.8) (0.0 0.0 0.05 0.07 1.0)]
Πολύ Κακό [Very Poor (VP)]	[(0.03 0.06 0.18 0.21 0.8) (0.05 0.07 0.17 0.2 1.0)]
Κακό [Poor (P)]	[(0.15 0.18 0.31 0.34 0.8) (0.17 0.2 0.3 0.32 1.0)]
Μέτρια Κακό [Medium Poor (MP)]	[(0.28 0.31 0.43 0.46 0.8) (0.3 0.32 0.42 0.45 1.0)]
Μέτριο [Medium (M)]	[(0.4 0.43 0.56 0.59 0.8) (0.42 0.45 0.55 0.57 1.0)]
Μέτρια Καλό [Medium Good (MG)]	[(0.53 0.56 0.68 0.71 0.8) (0.55 0.57 0.67 0.7 1.0)]
Καλό [Good (G)]	[(0.65 0.68 0.81 0.84 0.8) (0.67 0.7 0.8 0.82 1.0)]
Πολύ Καλό [Very Good (VG)]	[(0.78 0.81 0.93 0.96 0.8) (0.8 0.82 0.92 0.95 1.0)]
Απόλυτα Καλό [Absolutely Good (AG)]	[(0.9 0.93 1.0 1.0 0.8) (0.92 0.95 1.0 1.0 1.0)]

Εξετάζεται η περίπτωση όπου 14 drones κινούνται μέσα στο περιβάλλον του δικτύου πρόσβασης. Όσον αφορά την επικοινωνία D2I, κάθε drone πρέπει να είναι συνδεδεμένο σε ένα δίκτυο που ικανοποιεί τις απαιτήσεις των υπηρεσιών του, ενώ ταυτόχρονα συμμορφώνεται με το αντιμέτωπο επίπεδο σοβαρότητας καταστροφών (DSL). Το DSL που συναντά κάθε drone αξιολογείται χρησιμοποιώντας την κλίμακα που εισάγεται στο [258]. Αυτή η κλίμακα ορίζει 5 επίπεδα σοβαρότητας, που ονομάζονται Χαμηλή, Φυλασσόμενη, Αυξημένη, Υψηλή και Σοβαρή. Το χαμηλό επίπεδο αναφέρεται στις ελάχιστες επιπτώσεις καταστροφών, ενώ το σοβαρό επίπεδο αναφέρεται στις υψηλότερες.



Εικόνα 9: Η προσομοιωμένη τοπολογία.

Κατά τη διαδικασία επιλογής δικτύου, αρχικά λαμβάνεται υπόψη η σχετική σημασία $\tilde{r_s}$ κάθε υπηρεσίας σε σχέση με την DSL. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζει τη σημασία κάθε υπηρεσίας ανά DSL, όπως λαμβάνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο TF-AANP [256]. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η σημασία των υπηρεσιών DM εξαρτάται από το DSL. Ενδεικτικά, όταν το DSL γίνει Severe, οι υπηρεσίες DM αποκτούν μεγαλύτερη σημασία από τις υπηρεσίες nDM. Κατά συνέπεια, όταν η DSL γίνεται χαμηλή, η σχετική σημασία των υπηρεσιών είναι αρκετά παρόμοια. Στη συνέχεια, το TFAANP εκτιμά τους συντελεστές στάθμισης απόφασης ανά τύπο υπηρεσίας και DSL, λαμβάνοντας υπόψη το μοντέλο δικτύου ANP που προτείνεται στο [250]. Οι συντελεστές στάθμισης των κριτηρίων για τις υπηρεσίες DM παρουσιάζονται στο σχήμα 3. Όπως απεικονίζεται, οι σταθμίσεις είναι ανάλογες με τους περιορισμούς κάθε υπηρεσίας καθώς και με το DSL. Συγκεκριμένα, η στάθμιση του κριτηρίου τιμής είναι χαμηλή για το αυστηρό επίπεδο, με αποτέλεσμα μια τιμή στάθμισης που είναι πολύ κοντά στο 0. Επίσης, όταν το επίπεδο σοβαρότητας αξιολογείται ως χαμηλό, το κριτήριο τιμής γίνεται πιο σημαντικό. Κατά συνέπεια, τα κριτήρια στάθμισης για τις υπηρεσίες nDM, που είναι επίσης ανάλογοι με τους περιορισμούς κάθε υπηρεσίας, παρουσιάζονται στο σχήμα 4.

Πίνακας 15: Τα διαθέσιμα δίκτυα Κατάταξη των δικτύων ως προς τα αποτελέσματα DTFT-ACW, TFT και DTOPSIS.

Υπηρεσία	Δίκτυο	Ρυθμαπόδοση	Καθυστέρηση	Διακύμανση καθυστέρησης (Jitter)	Απώλεια πακέτων	Αξιοπιστία υπηρεσίας	Ασφάλεια	Τιμή
Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο [Live Video Streaming (LVS)]	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	MG	VG	VG	M	MG	VG	G
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	G	G	G	VG	G	G	G
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	VG	G	AG	VG	VG	G	G
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	G	VG	G	G	G	VG	VG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	VG	AG	VG	G	AG	G	G
Μετάδοση Εικόνας [Image Transmission (MT)]	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	G	MG	F	VG	VG	G	AG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	AG	G	VG	VG	VG	AG	VG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	VG	G	G	VG	G	G	G
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	G	VG	MG	VG	VG	MG	VG
Τριδιάστατη Σάρωση [3D Scanning (3DS)]	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	AG	AG	G	AG	AG	VG	VG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	VG	G	MG	VG	VG	G	VG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	G	MG	G	VG	VG	VG	G
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	AG	VG	VG	AG	AG	VG	G
Συλλογή Πληροφοριών με Επίγνωση Καταστάσεων [Disaster-aware Information Gathering (DIG)]	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	G	G	MG	G	VG	MG	VG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	MG	G	MG	G	G	G	VG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	VG	VG	G	G	MG	VG	G
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	G	MG	M	AG	G	G	VG
Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης [Live Video Streaming for Emergency Manipulation (LVS-EM)]	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	MG	G	G	MG	MG	G	VG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	VG	G	VG	G	G	MG	G
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	VG	AG	AG	AG	G	VG	M
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	G	M	MG	G	VG	MG	G
Μετάδοση Εικόνας για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης [Image Transmission for Emergency Manipulation (MT-EM)]	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	AG	VG	VG	AG	AG	G	MP
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	VG	G	G	VG	G	M	VG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	G	VG	G	VG	MG	G	VG
	LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	G	VG	G	VG	MG	G	VG

Πίνακας 16: Τα προσομοιωμένα μη επανδρωμένα αεροσκάφη.

Drone	Υπηρεσία	Επίπεδο Σοβαρότητας Καταστροφής
1	IMG, DIG, LVS-EM	Αυξημένο [Elevated]
2	IMT-EM	Αυξημένο [Elevated]
3	DIG, LVS-EM	Χαμηλό [Low]
4	LVS, 3DS, DIG	Σοβαρό [Severe]
5	LVS	Χαμηλό [Low]
6	IMT	Χαμηλό [Low]
7	3DS, LVS-EM	Υψηλό [High]
8	3DS, IMT-EM	Υψηλό [High]
9	IMG, DIG, IMT-EM	Υψηλό [High]
10	IMT, 3DS	Χαμηλό [Low]
11	DIG, IMT-EM	Επιτηρούμενο [Guarded]
12	DIG	Σοβαρό [Severe]
13	3DS, DIG, LVS	Υψηλό [High]
14	LVS-EM	Επιτηρούμενο [Guarded]

Λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική σημασία κάθε υπηρεσίας και τα κριτήρια βαρύτητας τόσο για τις υπηρεσίες DM όσο και για τις υπηρεσίες nDM, τα τελικά κριτήρια στάθμισης υπολογίζονται για κάθε drone σε σχέση με το επίπεδο σοβαρότητας της περίπτωσης και τις υπηρεσίες που χρησιμοποιεί. Τα σχετικά διαγράμματα της μελέτης αποτυπώνουν τα αντίστοιχα βάρη και τη διαφοροποίησή τους ανά σενάριο.

Η κατάταξη των εναλλακτικών δικτύων πραγματοποιείται από τον αλγόριθμο DTFT-ACW χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα κριτήρια στάθμισης για κάθε drone.

Πίνακας 17: Τα βάρη κάθε υπηρεσίας ανά επίπεδο σοβαρότητας καταστροφής.

	Επίπεδο Σοβαρότητας Καταστροφής				
	Χαμηλό	Επιτηρούμενο	Αυξημένο	Υψηλό	Σοβαρό
Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο [Live Video Streaming (LVS)]	0.144725	0.111174	0.0918787	0.082381	0.0747466
Μετάδοση Εικόνας [Image Transmission (IMT)]	0.132065	0.105065	0.0853086	0.0753516	0.0675959
Τρισδιάστατη Σάρωση [3D Scanning (3DS)]	0.139175	0.108711	0.0879922	0.0783929	0.0707746
Συλλογή Πληροφοριών με Επίγνωση Καταστροφών [Disaster-aware Information Gathering (DIG)]	0.155198	0.178723	0.1944	0.202154	0.208349
Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης [Live Video Streaming for Emergency Manipulation (LVS-EM)]	0.227109	0.262985	0.28638	0.297654	0.306544
Μετάδοση Εικόνας για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης [Image Transmission for Emergency Manipulation (IMT-EM)]	0.201728	0.233342	0.254041	0.264066	0.27199

Πίνακας 18: Τα κριτήρια TF-AANP στάθμισης για υπηρεσίες διαχείρισης καταστροφών ανά επίπεδο σοβαρότητας.

(1) Low			
	Συλλογή Πληροφοριών με Επίγνωση Καταστροφών (DIG)	Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης (LVS-EM)	Μετάδοση Εικόνas για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης (IMT-EM)
Ρυθμαπόδοση (Throughput)	0.107548	0.106708	0.165553
Καθυστέρηση (Delay)	0.152008	0.125124	0.0638882
Διακύμανση καθυστέρησης (Jitter)	0.0884352	0.125124	0.0638882
Απώλεια πακέτων (Packet loss)	0.152008	0.143044	0.206671
Αξιοπιστία υπηρεσίας (Service Reliability)	0.148841	0.165206	0.148889
Ασφάλεια (Security)	0.140069	0.160809	0.140114
Τιμή (Price)	0.211089	0.173986	0.210997
(2) Guarded			
	Συλλογή Πληροφοριών με Επίγνωση Καταστροφών (DIG)	Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης (LVS-EM)	Μετάδοση Εικόνas για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης (IMT-EM)
Ρυθμαπόδοση (Throughput)	0.107548	0.106708	0.165553
Καθυστέρηση (Delay)	0.152008	0.125124	0.0638882
Διακύμανση καθυστέρησης (Jitter)	0.0884352	0.125124	0.0638882
Απώλεια πακέτων (Packet loss)	0.152008	0.143044	0.206671
Αξιοπιστία υπηρεσίας (Service Reliability)	0.172074	0.178175	0.161243
Ασφάλεια (Security)	0.162897	0.170395	0.155658
Τιμή (Price)	0.165028	0.15143	0.183099
(3) Elevated			
	Συλλογή Πληροφοριών με Επίγνωση Καταστροφών (DIG)	Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο για Διαχείριση Έκτακτης	Μετάδοση Εικόνas για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης (IMT-EM)

Υποστήριξη υπηρεσιών διαχείρισης καταστάσεων
Έκτακτης ανάγκης με χρήση UAV
(Unmanned Aerial Vehicles)
σε περιβάλλοντα Έξυπνων Πόλεων

		Ανάγκης (LVS-EM)	
Ρυθμαπόδοση (Throughput)	0.107548	0.106708	0.165553
Καθυστέρηση (Delay)	0.152008	0.125124	0.0638882
Διακύμανση καθυστέρησης (Jitter)	0.0884352	0.125124	0.0638882
Απώλεια πακέτων (Packet loss)	0.152008	0.143044	0.206671
Αξιοπιστία υπηρεσίας (Service Reliability)	0.195307	0.191278	0.17017
Ασφάλεια (Security)	0.185725	0.178072	0.16559
Τιμή (Price)	0.118967	0.129823	0.16424
(4) High			
	Συλλογή Πληροφοριών με Επίγνωση Καταστροφών (DIG)	Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης (LVS-EM)	Μετάδοση Εικόνας για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης (IMT-EM)
Ρυθμαπόδοση (Throughput)	0.107548	0.106708	0.165553
Καθυστέρηση (Delay)	0.152008	0.125124	0.0638882
Διακύμανση καθυστέρησης (Jitter)	0.0884352	0.125124	0.0638882
Απώλεια πακέτων (Packet loss)	0.152008	0.143044	0.206671
Αξιοπιστία υπηρεσίας (Service Reliability)	0.199898	0.205818	0.192935
Ασφάλεια (Security)	0.191975	0.181798	0.175009
Τιμή (Price)	0.108127	0.112384	0.132056
(5) Severe			
	Συλλογή Πληροφοριών με Επίγνωση Καταστροφών (DIG)	Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης (LVS-EM)	Μετάδοση Εικόνας για Διαχείριση Έκτακτης Ανάγκης (IMT-EM)
Ρυθμαπόδοση (Throughput)	0.107548	0.106708	0.165553
Καθυστέρηση (Delay)	0.152008	0.125124	0.0638882
Διακύμανση καθυστέρησης (Jitter)	0.0884352	0.125124	0.0638882
Απώλεια πακέτων (Packet loss)	0.152008	0.143044	0.206671
Αξιοπιστία υπηρεσίας (Service Reliability)	0.267461	0.259777	0.267926
Ασφάλεια (Security)	0.232539	0.240223	0.232074

Τιμή (Price)	0.005	0.005	0.005
--------------	-------	-------	-------

Πίνακας 19: Τα κριτήρια TF-AANP στάθμισης για υπηρεσίες μη διαχείρισης καταστροφών.

	Ζωντανή Μετάδοση Βίντεο (LVS)	Μετάδοση Εικόνας (IMT)	Μετάδοση Εικόνας (IMT)
Ρυθμαπόδοση (Throughput)	0.106708	0.165553	0.198818
Καθυστέρηση (Delay)	0.125124	0.0638882	0.0475691
Διακύμανση καθυστέρησης (Jitter)	0.125124	0.0638882	0.0475691
Απώλεια πακέτων (Packet loss)	0.143044	0.206671	0.206044
Αξιοπιστία υπηρεσίας (Service Reliability)	0.165206	0.148889	0.148889
Ασφάλεια (Security)	0.160809	0.140114	0.140114
Τιμή (Price)	0.173986	0.210997	0.210997

Πίνακας 20: Τα βάρη TF-AANP για κάθε drone.

D.Level	Low	Elevated	Guarded	Elevated	Low	High	Severe	Low	Guarded	High	Elevated	Elevated	High	Low
Drone	Drone 1	Drone 2	Drone 3	Drone 4	Drone 5	Drone 6	Drone 7	Drone 8	Drone 9	Drone 10	Drone 11	Drone 12	Drone 13	Drone 14
Throughput	0.182	0.107	0.106	0.165	0.165	0.125	0.125	0.106	0.142	0.173	0.107	0.165	0.125	0.106
Delay	0.055	0.135	0.125	0.063	0.063	0.108	0.125	0.125	0.099	0.06	0.135	0.063	0.108	0.125
Jitter	0.055	0.11	0.125	0.063	0.063	0.108	0.088	0.125	0.073	0.06	0.11	0.063	0.108	0.125
Packet loss	0.206	0.146	0.143	0.206	0.206	0.156	0.16	0.143	0.184	0.206	0.146	0.206	0.156	0.143
Service Reliability	0.148	0.192	0.178	0.17	0.148	0.193	0.222	0.165	0.165	0.182	0.192	0.17	0.193	0.165
Security	0.14	0.181	0.17	0.165	0.14	0.173	0.198	0.16	0.158	0.167	0.181	0.165	0.173	0.16
Price	0.21	0.125	0.151	0.164	0.21	0.132	0.081	0.173	0.175	0.15	0.125	0.164	0.132	0.173

Στη συνέχεια, τα πειραματικά αποτελέσματα της μεθόδου DTFT-ACW συγκρίνονται με αυτά που λαμβάνονται από τους αλγόριθμους TFT [250], DTOPSIS [251], FSAW [253] και FMEW [254] (Πίνακας 21). Όταν το DSL είναι χαμηλό (drone 1, 5 και 8) ή φυλασσόμενο (drones 3 και 9) τα αποτελέσματα του DTFT-ACW, του TFT και του DTOPSIS είναι αρκετά παρόμοια, λόγω της παρόμοιας σχετικής σημασίας που λαμβάνεται υπόψη από το DTFT-ACW για κάθε υπηρεσία. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι αλγόριθμοι FSAW και FMEW επιτυγχάνουν επίσης ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ωστόσο, όταν το DSL χειροτερεύει, το DTFT-ACW αποδίδει μεγαλύτερη σημασία στις

υπηρεσίες DM και επιλέγει το καταλληλότερο δίκτυο για να ικανοποιήσει τους αυστηρούς περιορισμούς τους. Ενδεικτικά, στην περίπτωση του οχήματος 7 όπου το DSL γίνεται Severe, το DTFT-ACW επιλέγει το δίκτυο LTE-A Pro FD-MIMO Macro 5, το οποίο παρέχει AG για απόδοση, απώλεια πακέτων και αξιοπιστία υπηρεσίας, καθώς και VG για καθυστέρηση, jitter και ασφάλεια, για την υπηρεσία διαχείρισης καταστροφών DIG. Αντίθετα, τα αποτελέσματα τόσο των TFT, DTOPSIS, FSAW όσο και FMEW επηρεάζονται αρνητικά από την ύπαρξη υπηρεσιών nDM στο όχημα 7 αγνοώντας το σοβαρό επίπεδο της φυσικής καταστροφής που συνέβη. Συγκεκριμένα, τα TFT, FSAW και FMEW επιλέγουν το δίκτυο LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1, το οποίο παρέχει χειρότερες προδιαγραφές για την υπηρεσία DIG (π.χ. VG για αξιοπιστία υπηρεσίας, G για απόδοση, καθυστέρηση και απώλεια πακέτων, καθώς και MG για jitter και ασφάλεια). Κατά συνέπεια, το DTOPSIS επιλέγει το δίκτυο LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3, το οποίο παρέχει επίσης χειρότερες προδιαγραφές για την προαναφερθείσα υπηρεσία διαχείρισης καταστροφών (π.χ. MG για απόδοση και jitter, καθώς και G για καθυστέρηση, απώλεια πακέτων και αξιοπιστία υπηρεσίας).

Όσον αφορά την υπολογιστική πολυπλοκότητα, το DTFT-ACW και το DTOPSIS επιτυγχάνουν τα πιο αποδοτικά αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, και στους δύο αλγόριθμους, κατά την πρώτη εκτέλεση η διαδικασία επιλογής δικτύου εισάγει μια πολυπλοκότητα $O(n^2)$, λόγω της στάθμισης και κανονικοποίησης των πινάκων αποφάσεων $n \times m$. Στη συνέχεια, για κάθε επόμενη εκτέλεση όπου $AL(t) = AL(tprev)$, απαιτείται σταθερός χρόνος για την ολοκλήρωση της επιλογής δικτύου εκτελώντας απλούς ελέγχους στα αποτελέσματα που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια του προηγούμενου χρόνου, με αποτέλεσμα την πολυπλοκότητα $O(n)$. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι TFT, FSAW και FMEW οδηγούν πάντα σε πολυπλοκότητα $O(n^2)$, καθώς χειρίζονται πίνακες αποφάσεων $n \times m$, κάθε φορά που εκτελούν την επιλογή δικτύου.

Πίνακας 21: Κατάταξη των δικτύων ως προς τα αποτελέσματα DTFT-ACW, TFT και DTOPSIS

Drone 1			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	1	1	1
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	2	2	2
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	3	3	5
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	5	5	3
Drone 2			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	2	1
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	4	4	4
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	5	5	5
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	2	1	3
Drone 3			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	3	3
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	4	4	4

LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	5	5	5
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	2	2	2
Drone 4			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	3	4
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	4	4	3
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	5	5	5
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	1	1	1
Drone 5			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	1	1	1
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	2	2	2
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	3	3	5
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	4	4	3
Drone 6			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	1	1
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	4	3	3
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	5	5	4
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	2	4	5
Drone 7			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	4	1	2
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	5	3	3
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	3	2	1
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	2	5	5
Drone 8			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	3	4
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	2	2	1
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	1	1	2
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	4	4	3
Drone 9			

	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	2	3
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	4	3	4
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	5	4	5
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	1	1	2
Drone 10			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	1	2
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	4	2	1
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	5	5	5
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	1	4	4
Drone 11			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	2	1
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	4	4	4
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	5	5	5
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	2	1	3
Drone 12			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	3	4
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	4	4	3
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	5	5	5
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	1	1	1
Drone 13			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	1	1
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	4	3	3
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	5	5	4
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	2	4	5
Drone 14			
	DTFT-ACW	TFT	DTOPSIS
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 1	3	3	4
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 2	2	2	1

LTE-A Pro FD-MIMO Macro 3	1	1	2
LTE-A Pro FD-MIMO Macro 4	4	4	3

11. Συμπεράσματα

Συνολικά, η εργασία αναδεικνύει ότι η συνεργασία drones και IoT μπορεί να αποτελέσει κρίσιμο καταλύτη για την αναβάθμιση των έξυπνων πόλεων, υποστηρίζοντας εφαρμογές που σχετίζονται με τη συλλογή δεδομένων, την ενεργειακή αποδοτικότητα, την προστασία του περιβάλλοντος, τη δημόσια ασφάλεια και τη διαχείριση καταστροφών. Παράλληλα, η μελέτη περίπτωσης σε περιβάλλον 5G έδειξε ότι η επιλογή κατάλληλου δικτύου είναι καθοριστική για την ποιότητα και την αξιοπιστία των υπηρεσιών drone. Η εξέταση του αλγορίθμου DTFT-ACW, όπως έχει προταθεί στη σχετική βιβλιογραφία, λειτουργεί συμπληρωματικά προς τη βιβλιογραφική επισκόπηση και δείχνει πώς οι θεωρητικές απαιτήσεις μεταφράζονται σε πρακτικούς μηχανισμούς επιλογής δικτύου. Επομένως, το βασικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι η αποτελεσματική ολοκλήρωση drones, IoT και 5G απαιτεί συνδυασμό τεχνολογικής διαλειτουργικότητας, ασφαλούς σχεδιασμού και προσαρμοστικών μηχανισμών διαχείρισης πόρων.

Παράρτημα: Κατάλογος συντομογραφιών

- 4G: Τέταρτη γενιά (δίκτυο κινητής τηλεφωνίας)
- AI: Τεχνητή νοημοσύνη
- 5G: Πέμπτη γενιά (δίκτυο κινητής τηλεφωνίας)
- ANN: Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο
- BS: Σταθμός βάσης
- CCN: Συνελικτικό νευρωνικό δίκτυο
- DL: Βαθιά μάθηση
- DNN: Βαθύ νευρωνικό δίκτυο
- E2E: Από άκρο σε άκρο
- FANET: Δίκτυο Fly Ad hoc
- GA: Γενετικός αλγόριθμος
- GPS: Παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης
- ΤΠΕ: Τεχνολογίες πληροφοριών και επικοινωνιών
- IoD: Διαδίκτυο του Drone
- IoPST: Διαδίκτυο των πραγμάτων δημόσιας ασφάλειας
- IoT: Διαδίκτυο των πραγμάτων
- LoS: Οπτική επαφή
- LTE: Μακροπρόθεσμη εξέλιξη
- M2M: Machine to Machine
- MANET: Mobile Ad hoc Network
- ML: Μηχανική μάθηση
- NGN: Δίκτυο επόμενης γενιάς
- NN: Νευρωνικό δίκτυο
- PNC: Συγκέντρωση αριθμού σωματιδίων
- PSO: Τεχνική βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων
- QoS: Ποιότητα υπηρεσιών
- RFID: Αναγνώριση ραδιοσυχνοτήτων
- RSSI: Δείκτης ισχύος λαμβανόμενου σήματος
- SAR: Έρευνα και διάσωση
- UADC: Προσαρμοστικός κύκλος λειτουργίας βάσει χρησιμότητας
- VANET: Δίκτυο ad hoc οχημάτων
- WSN: Ασύρματο δίκτυο αισθητήρων

Βιβλιογραφία

1. J. M. Barrionuevo, P. Berrone, and J. E. Ricart, "Smart cities, sustainable progress," *IESE Insight*, vol. 14, no. 14, pp. 50–57, 2012.
2. H. Chourabi, T. Nam, S. Walker, J. R. Gil-Garcia, S. Mellouli, K. Nahon, T. A. Pardo, and H. J. Scholl, "Understanding smart cities: An integrative framework," in *Proc. 45th Hawaii Int. Conf. Syst. Sci. (HICSS)*, 2012, pp. 2289–2297.
3. M. D. Lytras and A. Visvizi, "Who uses smart city services and what to make of it: Toward interdisciplinary smart cities research," *Sustainability*, vol. 10, no. 6, p. 1998, 2018.
4. S. E. Bibri and J. Krogstie, "Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 31, pp. 183–212, May 2017.
5. R. G. Hollands, "Will the real smart city please stand up? Intelligent, progressive or entrepreneurial?" *City*, vol. 12, no. 3, pp. 303–320, 2008.
6. A. L. A. Guedes, J. C. Alvarenga, M. D. S. S. Goulart, M. R. Y. R. Rodriguez, and C. A. P. Soares, "Smart cities: The main drivers for increasing the intelligence of cities," *Sustainability*, vol. 10, no. 9, p. 3121, 2018.
7. L. Errichiello and R. Micera, "Leveraging smart open innovation for achieving cultural sustainability: Learning from a new city museum project," *Sustainability*, vol. 10, no. 6, p. 1964, 2018.
8. F. Mohammed, A. Idries, N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, and I. Jawhar, "UAVs for smart cities: Opportunities and challenges," in *Proc. Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst. (ICUAS)*, 2014, pp. 267–273.
9. A. Gapchup, A. Wani, A. Wadghule, and S. Jadhav, "Emerging trends of green IoT for smart world," *Int. J. Innov. Res. Comput. Commun. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 2139–2148, 2017.
10. J. Huang, Y. Meng, X. Gong, Y. Liu, and Q. Duan, "A novel deployment scheme for green Internet of Things," *IEEE Internet Things J.*, vol. 1, no. 2, pp. 196–205, Apr. 2014.
11. S. Rani, R. Talwar, J. Malhotra, S. H. Ahmed, M. Sarkar, and H. Song, "A novel scheme for an energy efficient Internet of Things based on wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 15, no. 11, pp. 28603–28626, 2015.
12. S. Y. Lien, K. C. Chen, and Y. Lin, "Toward ubiquitous massive accesses in 3GPP machine-to-machine communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 49, no. 4, pp. 66–74, Apr. 2011.
13. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of Things communications," 2017, arXiv:1703.05401. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1703.05401>
14. S. H. Alsamhi, O. Ma, and M. S. Ansari, "Predictive estimation of the optimal signal strength from unmanned aerial vehicle over Internet of Things using ANN," 2018, arXiv:1805.07614. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1805.07614>
15. V. Sharma, F. Song, I. You, and M. Atiquzzaman, "Energy efficient device discovery for reliable communication in 5G-based IoT and BSNs using unmanned aerial vehicles," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 97, pp. 79–95, Nov. 2017.
16. N. H. Motlagh, M. Bagaa, T. Taleb, and J. Song, "Connection steering mechanism between mobile networks for reliable UAV's IoT platform," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, May 2017, pp. 1–6.

17. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Mobile Internet of Things: Can UAVs provide an energy-efficient mobile architecture?" in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Dec. 2016, pp. 1–6.
18. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: Performance and tradeoffs," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 6, pp. 3949–3963, Jun. 2016.
19. E. Basha, M. Eiskamp, J. Johnson, and C. Detweiler, "UAV recharging opportunities and policies for sensor networks," Int. J. Distrib. Sensor Netw., vol. 11, no. 8, 2015, Art. no. 824260.
20. M. Alam, D. Moroni, G. Pieri, M. Tampucci, M. Gomes, J. Fonseca, J. Ferreira, and G. R. Leone, "Real-time smart parking systems integration in distributed ITS for smart cities," J. Adv. Transp., vol. 2018, Oct. 2018, Art. no. 1485652.
21. S. H. Alsamhi et al, "Greening Internet of Things for smart everythings with a green-environment life: A survey and future prospects," Telecommun. Syst., 2019. doi: 10.1007/s11235-019-00597-1.
22. Guvenc, F. Koohifar, S. Singh, M. L. Sichitiu, and D. Matolak, "Detection, tracking, and interdiction for amateur drones," IEEE Commun. Mag., vol. 56, no. 4, pp. 75–81, Apr. 2018.
23. H. Menouar, I. Guvenc, K. Akkaya, A. S. Uluagac, A. Kadri, and A. Tuncer, "UAV-enabled intelligent transportation systems for the smart city: Applications and challenges," IEEE Commun. Mag., vol. 55, no. 3, pp. 22–28, Mar. 2017.
24. N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, I. Jawhar, A. Idries, and F. Mohammed, "Unmanned aerial vehicles applications in future smart cities," Technol. Forecasting Social Change, to be published.
25. N. H. Motlagh, M. Bagaa, and T. Taleb, "UAV-based IoT platform: A crowd surveillance use case," IEEE Commun. Mag., vol. 55, no. 2, pp. 128–134, Feb. 2017.
26. N. H. Motlagh, T. Taleb, and O. Arouk, "Low-altitude unmanned aerial vehicles-based Internet of Things services: Comprehensive survey and future perspectives," IEEE Internet Things J., vol. 3, no. 6, pp. 899–922, Dec. 2016.
27. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, Y.-H. Nam, and M. Debbah, "A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems," 2018, arXiv:1803.00680. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1803.00680>
28. E. Vattapparamban, İ. Güvenç, A. İ. Yurekli, K. Akkaya, and S. Uluagaç, "Drones for smart cities: Issues in cybersecurity, privacy, and public safety," in Proc. Int. Wireless Commun. Mobile Comput. Conf. (IWCMC), 2016, pp. 216–221.
29. H. Kim, L. Mokdad, and J. Ben-Othman, "Designing UAV surveillance frameworks for smart city and extensive ocean with differential perspectives," IEEE Commun. Mag., vol. 56, no. 4, pp. 98–104, Apr. 2018.
30. A. Carrio, C. Sampedro, A. Rodriguez-Ramos, and P. Campoy, "A review of deep learning methods and applications for unmanned aerial vehicles," J. Sensors, vol. 2017, Aug. 2017, Art. no. 3296874.
31. M. B. Bejiga, A. Zeggada, A. Nouffidj, and F. Melgani, "A convolutional neural network approach for assisting avalanche search and rescue operations with UAV imagery," Remote Sens., vol. 9, no. 2, p. 100, 2017.

32. S. H. Alsamhi, O. Ma, M. S. Ansari, and S. K. Gupta, "Collaboration of drone and Internet of public safety things in smart cities: An overview of QoS and network performance optimization," *Drones*, vol. 3, no. 1, p. 13, 2019.
33. M. Chiang and T. Zhang, "Fog and IoT: An overview of research opportunities," *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, no. 6, pp. 854–864, Dec. 2016.
34. P. G. Sterbenz, "Drones in the smart city and IoT: Protocols, resilience, benefits, and risks," in *Proc. 2nd Workshop Micro Aerial Vehicle Netw., Syst., Appl. Civilian Use*, 2016, Art. no. 3.
35. A. Martínez-Ballesté, P. A. Pérez-martínez, and A. Solanas, "The pursuit of citizens' privacy: A privacy-aware smart city is possible," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 6, pp. 136–141, Jun. 2013.
36. R. Clarke, "The regulation of civilian drones' impacts on behavioural privacy," *Comput. Law Secur. Rev.*, vol. 30, no. 3, pp. 286–305, 2014.
37. A. Gharaibeh, M. A. Salahuddin, S. J. Hussini, A. Khreishah, I. Khalil, M. Guizani, and A. Al-Fuqaha, "Smart cities: A survey on data management, security, and enabling technologies," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 4, pp. 2456–2501, 4th Quart., 2017.
38. S. Ijaz, M. A. Shah, A. Khan, and M. Ahmed, "Smart cities: A survey on security concerns," *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, vol. 7, no. 2, pp. 612–625, 2016.
39. R. Cooley, S. Wolf, and M. Borowczak, "Secure and decentralized swarm behavior with autonomous agents for smart cities," 2018, arXiv:1806.02496. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1806.02496>
40. N. Choi, D. Kim, S.-J. Lee, and Y. Yi, "A fog operating system for user-oriented IoT services: Challenges and research directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 8, pp. 44–51, Aug. 2017.
41. O. B. Jensen, "Drone city—Power, design and aerial mobility in the age of 'smart cities,'" *Geograph. Helvetica*, vol. 71, no. 2, pp. 67–75, 2016.
42. S. H. Alsamhi, O. Ma, and M. S. Ansari, "Convergence of machine learning and robotics communication in collaboratively assembly: Mobility, connectivity and future prospects," *J. Intell. Robot. Syst.*, to be published.
43. A. Valcarce, T. Rasheed, K. Gomez, S. Kandeepan, L. Reynaud, R. Hermenier, A. Munari, M. Mohorcic, M. Smolnikar, and I. Bucaille, "Airborne base stations for emergency and temporary events," in *Proc. Int. Conf. Pers. Satell. Services*, 2013, pp. 13–25.
44. Bucaille, S. Héthuin, T. Rasheed, A. Munari, R. Hermenier, and S. Allsopp, "Rapidly deployable network for tactical applications: Aerial base station with opportunistic links for unattended and temporary events absolute example," in *Proc. IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM)*, Nov. 2013, pp. 1116–1120.
45. Merwaday and I. Guvenc, "UAV assisted heterogeneous networks for public safety communications," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. Workshops (WCNCW)*, Mar. 2015, pp. 329–334.
46. Bor-Yaliniz and H. Yanikomeroglu, "The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 11, pp. 48–55, Nov. 2016.
47. Y. Kim and T.-J. Lee, "Service area scheduling in a drone assisted network," in *Computational Science and Its Applications—ICCSA*. Cham, Switzerland: Springer, 2017, pp. 161–171.

48. D. Eckhoff and I. Wagner, "Privacy in the smart city—Applications, technologies, challenges, and solutions," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 1, pp. 489–516, 1st Quart., 2018.
49. I. Parvez, A. I. Sarwat, L. Wei, and A. Sundararajan, "Securing metering infrastructure of smart grid: A machine learning and localization based key management approach," *Energies*, vol. 9, no. 9, p. 691, 2016.
50. S. Sicari, A. Rizzardi, L. A. Grieco, and A. Coen-Porisini, "Security, privacy and trust in Internet of Things: The road ahead," *Comput. Netw.*, vol. 76, pp. 146–164, Jan. 2015.
51. G. Hattab and D. Cabric, "Energy-efficient massive IoT shared spectrum access over UAV-enabled cellular networks," 2018, arXiv:1808.08006. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1808.08006>
52. T. Lagkas, V. Argyriou, S. Bibi, and P. Sarigiannidis, "UAV IoT framework views and challenges: Towards protecting drones as 'Things,'" *Sensors*, vol. 18, no. 11, p. 4015, 2018.
53. A. Sinha, T. Kirubarajan, and Y. Bar-Shalom, "Autonomous ground target tracking by multiple cooperative UAVs," in *Proc. IEEE Aerosp. Conf.*, Mar. 2005, pp. 1–9.
54. E. Gelenbe and Y. Caseau, "The impact of information technology on energy consumption and carbon emissions," *Ubiquity*, vol. 2015, pp. 1–15, Jun. 2015.
55. F. K. Shaikh, S. Zeadally, and E. Exposito, "Enabling technologies for green Internet of Things," *IEEE Syst. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 983–994, Jun. 2017.
56. T. Li, S. S. Wu, S. Chen, and M. C. K. Yang, "Generalized energyefficient algorithms for the RFID estimation problem," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 20, no. 6, pp. 1978–1990, Dec. 2012.
57. V. Namboodiri and L. Gao, "Energy-aware tag anticollision protocols for RFID systems," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 9, no. 1, pp. 44–59, 2010.
58. C. S. Nandyala and H.-K. Kim, "Green IoT agriculture and healthcare application (GAHA)," *Int. J. Smart Home*, vol. 10, no. 4, pp. 289–300, 2016.
59. C. Zhu, V. C. M. Leung, L. Shu, and E. C.-H. Ngai, "Green Internet of Things for smart world," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2151–2162, 2015.
60. B. Hubbard, H. Wang, T. Ropp, T. Lofton, S. Hubbard, S. Lin, and M. Leasure, "Feasibility study of UAV use for RFID material tracking on construction sites," in *Proc. 51st ASC Annu. Int. Conf.*, 2016, pp. 669–676.
61. M. Allegretti and S. Bertoldo, "Recharging RFID tags for environmental monitoring using UAVs: A feasibility analysis," *Wireless Sensor Netw.*, vol. 7, no. 2, p. 13, 2015.
62. G. Greco, C. Lucianaz, S. Bertoldo, and M. Allegretti, "A solution for monitoring operations in harsh environment: A RFID reader for small UAV," in *Proc. Int. Conf. Electromagn. Adv. Appl. (ICEAA)*, 2015, pp. 859–862.
63. J. S. Choi, B. R. Son, H. K. Kang, and D. H. Lee, "Indoor localization of Unmanned Aerial Vehicle based on passive UHF RFID systems," in *Proc. 9th Int. Conf. Ubiquitous Robots Ambient Intell. (URAI)*, 2012, pp. 188–189.
64. B. Prabhu, N. Balakumar, and A. J. Antony, "Wireless sensor network based smart environment applications," *Int. J. Innov. Res. Comput. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 8, pp. 1–10, 2017.
65. A. Mehmood and H. Song, "Smart energy efficient hierarchical data gathering protocols for wireless sensor networks," *SmartCR*, vol. 5, no. 5, pp. 425–462, 2015.

66. Y. E. Aslan, I. Korpeoglu, and Ö. Ulusoy, "A framework for use of wireless sensor networks in forest fire detection and monitoring," *Comput., Environ. Urban Syst.*, vol. 36, no. 6, pp. 614–625, 2012.
67. S. Bhattacharjee, P. Roy, S. Ghosh, S. Misra, and M. S. Obaidat, "Wireless sensor network-based fire detection, alarming, monitoring and prevention system for Bord-and-Pillar coal mines," *J. Syst. Softw.*, vol. 85, no. 3, pp. 571–581, 2012.
68. J. Lloret, M. Garcia, D. Bri, and S. Sendra, "A wireless sensor network deployment for rural and forest fire detection and verification," *Sensors*, vol. 9, no. 11, pp. 8722–8747, 2009.
69. G. Han, J. Shen, L. Liu, A. Qian, and L. Shu, "TGM-COT: Energyefficient continuous object tracking scheme with two-layer grid model in wireless sensor networks," *Pers. Ubiquitous Comput.*, vol. 20, no. 3, pp. 349–359, 2016.
70. G. Han, J. Shen, L. Liu, and L. Shu, "BRTCO: A novel boundary recognition and tracking algorithm for continuous objects in wireless sensor networks," *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 3, pp. 2056–2065, Sep. 2018.
71. F. Viani, L. Lizzi, P. Rocca, M. Benedetti, M. Donelli, and A. Massa, "Object tracking through RSSI measurements in wireless sensor networks," *Electron. Lett.*, vol. 44, no. 10, pp. 653–654, May 2008.
72. C. A. Trasviña-Moreno, R. Blasco, Á. Marco, R. Casas, and A. TrasviñaCastro, "Unmanned aerial vehicle based wireless sensor network for marine-coastal environment monitoring," *Sensors*, vol. 17, no. 3, p. 460, 2017.
73. D. Sharma, "Low cost experimental set up for real time temperature, humidity monitoring through WSN," *Int. J. Eng. Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 4340–4342, 2017.
74. F. Wu, C. Rüdiger, and M. R. Yuce, "Real-time performance of a selfpowered environmental IoT sensor network system," *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 282, 2017.
75. A. Hawbani, X. Wang, A. Abudukelimu, H. Kuhlani, Y. Al-Sharabi, A. Qarariyah, and A. Ghannami, "Zone probabilistic routing for wireless sensor networks," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 18, no. 3, pp. 728–741, Mar. 2019.
76. A. Hawbani, X. Wang, Y. A. Al-Sharabi, A. Ghannami, H. Kuhlani, and S. Karmoshi, "LORA: Load-balanced opportunistic routing for asynchronous duty-cycled WSN," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 18, no. 7, pp. 1601–1615, Jul. 2019.
77. B. Prabhu, N. Balakumar, and A. J. Antony, "Evolving constraints in military applications using wireless sensor networks," *Int. J. Innov. Res. Comput. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 63–95, 2017.
78. G. Anastasi, M. Di Francesco, M. Conti, and A. Passarella, "How to prolong the lifetime of wireless sensor networks," in *Mobile Ad Hoc and Pervasive Communications*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.
79. W. Ye, J. Heidemann, and D. Estrin, "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks," in *Proc. IEEE 21st Annu. Joint Conf. Comput. Commun. Soc. (INFOCOM)*, vol. 3, Jun. 2002, pp. 1567–1576.
80. J. A. R. Azevedo and F. E. S. Santos, "Energy harvesting from wind and water for autonomous wireless sensor nodes," *IET Circuits, Devices Syst.*, vol. 6, no. 6, pp. 413–420, Nov. 2012.
81. Z. A. Eu, H.-P. Tan, and W. K. G. Seah, "Design and performance analysis of MAC schemes for wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting," *Ad Hoc Netw.*, vol. 9, no. 3, pp. 300–323, 2011.

82. F. K. Shaikh and S. Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1041–1054, Mar. 2016.
83. L. Zhao, A. Al-Dubai, X. Li, G. Chen, and G. Min, "A new efficient cross-layer relay node selection model for wireless community mesh networks," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 61, pp. 361–372, Jul. 2017.
84. E. Yaacoub, A. Kadri, and A. Abu-Dayya, "Cooperative wireless sensor networks for green Internet of Things," in *Proc. 8th ACM Symp. QoS Secur. Wireless Mobile Netw.*, 2012, pp. 79–80.
85. R. V. Rekha and J. R. Sekar, "An unified deployment framework for realization of green Internet of Things (GloT)," *Middle-East J. Sci. Res.*, vol. 24, no. 2, pp. 187–196, 2016.
86. C. Mahapatra, Z. Sheng, P. Kamalinejad, V. C. M. Leung, and S. Mirabbasi, "Optimal power control in green wireless sensor networks with wireless energy harvesting, wake-up radio and transmission control," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 501–518, 2017.
87. A. Malaver, N. Motta, P. Corke, and F. Gonzalez, "Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases," *Sensors*, vol. 15, no. 2, pp. 4072–4096, 2015.
88. A. Malaver, N. Motta, P. Corke, and F. J. S. Gonzalez, "Development and integration of a solar powered unmanned aerial vehicle and a wireless sensor network to monitor greenhouse gases," *Sensors*, vol. 15, no. 2, pp. 4072–4096, 2015.
89. D.-T. Ho, E. I. Grøtli, P. B. Sujit, T. A. Johansen, and J. B. Sousa, "Optimization of wireless sensor network and UAV data acquisition," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 78, no. 1, pp. 159–179, 2015.
90. H. Zanjie, N. Hiroki, K. Nei, O. Fumie, M. Ryu, and Z. Baohua, "Resource allocation for data gathering in UAV-aided wireless sensor networks," in *Proc. 4th IEEE Int. Conf. Netw. Infrastruct. Digit. Content (IC-NIDC)*, Sep. 2014, pp. 11–16.
91. V. Sharma, I. You, and R. Kumar, "Energy efficient data dissemination in multi-UAV coordinated wireless sensor networks," *Mobile Inf. Syst.*, vol. 2016, May 2016, Art. no. 8475820.
92. G. Koutitas, "Green network planning of single frequency networks," *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 56, no. 4, pp. 541–550, Dec. 2010.
93. M. Naeem, U. Pareek, D. C. Lee, and A. Anpalagan, "Estimation of distribution algorithm for resource allocation in green cooperative cognitive radio sensor networks," *Sensors*, vol. 13, no. 4, pp. 4884–4905, 2013.
94. W. Feng, H. Alshaer, and J. M. H. Elmirghani, "Green information and communication technology: Energy efficiency in a motorway model," *IET Commun.*, vol. 4, no. 7, pp. 850–860, Apr. 2010.
95. G. Mao, "5G green mobile communication networks," *China Commun.*, vol. 14, no. 2, pp. 183–184, 2017.
96. A. Abrol and R. K. Jha, "Power optimization in 5G networks: A step towards GrEEen communication," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1355–1374, 2016.
97. S. H. Alsamhi, "Quality of service (QoS) enhancement techniques in high altitude platform (HAP) based communication networks," *Dept. Electron. Eng., Ph.D. dissertation, Banaras Hindu Univ., Uttar Pradesh*, 2015.

98. S. H. Alsamhi and N. S. Rajput, "HAP antenna radiation pattern for providing coverage and service characteristics," in *Proc. Int. Conf. Adv. Comput., Commun. Inform. (ICACCI)*, 2014, pp. 1434–1439.
99. S. H. Alsamhi and N. S. Rajput, "Implementation of call admission control technique in HAP for enhanced QoS in wireless network deployment," *Telecommun. Syst.*, vol. 63, no. 2, pp. 141–151, 2015.
100. S. H. Alsamhi and N. S. Rajput, "An intelligent hand-off algorithm to enhance quality of service in high altitude platforms using neural network," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 82, no. 4, pp. 2059–2073, 2015.
101. S. H. Alsamhi and N. S. Rajput, "An efficient channel reservation technique for improved QoS for mobile communication deployment using high altitude platform," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 91, no. 3, pp. 1095–1108, 2016.
102. L. Zhou, Z. Sheng, L. Wei, X. Hu, H. Zhao, J. Wei, and V. C. M. Leung, "Green cell planning and deployment for small cell networks in smart cities," *Ad Hoc Netw.*, vol. 43, pp. 30–42, Jun. 2016.
103. J. Wang, C. Hu, and A. Liu, "Comprehensive optimization of energy consumption and delay performance for green communication in Internet of Things," *Mobile Inf. Syst.*, vol. 2017, Mar. 2017, Art. no. 3206160.
104. A. Liu, Q. Zhang, Z. Li, Y.-J. Choi, J. Li, and N. Komuro, "A green and reliable communication modeling for industrial Internet of Things," *Comput. Elect. Eng.*, vol. 58, pp. 364–381, Feb. 2017.
105. J. Li, Y. Liu, Z. Zhang, J. Ren, and N. Zhao, "Towards green IoT networking: Performance optimization of network coding based communication and reliable storage," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 8780–8791, 2017.
106. M. Shojafar, N. Cordeschi, and E. Baccarelli, "Energy-efficient adaptive resource management for real-time vehicular cloud services," *IEEE Trans. Cloud Comput.*, vol. 7, no. 1, pp. 196–209, Jan./Mar. 2019.
107. S. H. Alsamhi, O. Ma, and M. S. Ansari, "Survey on artificial intelligence based techniques for emerging robotic communication," *Telecommun. Syst.*, pp. 1–21, Mar. 2019. doi: 10.1007/s11235-019-00561-z.
108. C. A. Chan, A. F. Gyga, E. Wong, C. A. Leckie, A. Nirmalathas, and D. C. Kilper, "Methodologies for assessing the use-phase power consumption and greenhouse gas emissions of telecommunications network services," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 485–492, 2012.
109. J. Xu, G. Solmaz, R. Rahmatizadeh, D. Turgut, and L. Boloni, "Internet of Things applications: Animal monitoring with unmanned aerial vehicle," 2016, arXiv:1610.05287. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1610.05287>
110. L. Gupta, R. Jain, and G. Vaszkun, "Survey of important issues in UAV communication networks," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 2, pp. 1123–1152, 2nd Quart., 2016.
111. V. Sharma, K. Srinivasan, H.-C. Chao, K.-L. Hua, and W.-H. Cheng, "Intelligent deployment of UAVs in 5G heterogeneous communication environment for improved coverage," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 85, pp. 94–105, May 2017.

112. S. A. R. Naqvi, S. A. Hassan, H. Pervaiz, and Q. Ni, "Drone-aided communication as a key enabler for 5G and resilient public safety networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 36–42, Jan. 2018.
113. Y. Zheng, Y. Wang, and F. Meng, "Modeling and simulation of pathloss and fading for air-ground link of HAPs within a network simulator," in *Proc. Int. Conf. Cyber-Enabled Distrib. Comput. Knowl. Discovery (CyberC)*, 2013, pp. 421–426.
114. A. Al-Hourani, S. Kandeepan, and A. Jamalipour, "Modeling air-toground path loss for low altitude platforms in urban environments," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, Dec. 2014, pp. 2898–2904.
115. H.-R. Cao, Z. Yang, X.-J. Yue, and Y.-X. Liu, "An optimization method to improve the performance of unmanned aerial vehicle wireless sensor networks," *Int. J. Distrib. Sensor Netw.*, vol. 13, no. 4, 2017, Art. no. 1550147717705614.
116. C. Zhan, Y. Zeng, and R. Zhang, "Energy-efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 3, pp. 328–331, Jun. 2018. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1708.00221>
117. I. H. Jawhar, N. Mohamed, Z. Trabelsi, and J. Al-Jaroodi, "Architectures and strategies for efficient communication in wireless sensor networks using unmanned aerial vehicles," *Unmanned Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 289–305, 2016.
118. S. Rashed and M. Soyuturk, "Effects of UAV mobility patterns on data collection in wireless sensor networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun., Netw. Satell. (COMNESTAT)*, Dec. 2015, pp. 74–79.
119. S. Rashed and M. Soyuturk, "Analyzing the effects of UAV mobility patterns on data collection in wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 17, no. 2, p. 413, 2017.
120. K. Zhang, J. Ni, K. Yang, X. Liang, J. Ren, and X. S. Shen, "Security and privacy in smart city applications: Challenges and solutions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 1, pp. 122–129, Jan. 2017.
121. T. A. Butt and M. Afzaal, "Security and privacy in smart cities: Issues and current solutions," in *Smart Technologies and Innovation for a Sustainable Future*. Cham, Switzerland: Springer, 2019, pp. 317–323.
122. S. Chakrabarty and D. W. Engels, "A secure IoT architecture for smart cities," in *Proc. 13th IEEE Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC)*, Jan. 2016, pp. 812–813.
123. C. Gong, M. Li, L. Zhao, Z. Guo, and G. Han, "Homomorphic evaluation of the integer arithmetic operations for mobile edge computing," *Wireless Commun. Mobile Comput.*, vol. 2018, Nov. 2018, Art. no. 8142102.
124. A. V. Didolkar and F. I. Z. Zama, "SMARTIE: A security solution for a smart city using Internet of things-architecture reference model," *Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ.*, vol. 2, no. 4, pp. 1–6, 2016.
125. A. S. Elmaghraby and M. M. Losavio, "Cyber security challenges in smart cities: Safety, security and privacy," *J. Adv. Res.*, vol. 5, no. 4, pp. 491–497, 2014.
126. V. Sharma, D. N. K. Jayakody, I. You, R. Kumar, and J. Li, "Secure and efficient context-aware localization of drones in urban scenarios," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 4, pp. 120–128, Apr. 2018.
127. D. He, S. Chan, and M. Guizani, "Drone-assisted public safety networks: The security aspect," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, no. 8, pp. 218–223, Aug. 2017.

128. A. Y. Javaid, W. Sun, V. K. Devabhaktuni, and M. Alam, "Cyber security threat analysis and modeling of an unmanned aerial vehicle system," in *Proc. IEEE Conf. Technol. Homeland Secur. (HST)*, Nov. 2012, pp. 585–590.
129. K. Hartmann and C. Steup, "The vulnerability of UAVs to cyber attacks— An approach to the risk assessment," in *Proc. 5th Int. Conf. Cyber Conflict (CYCON)*, 2013, pp. 1–23.
130. S. M. Giray, "Anatomy of unmanned aerial vehicle hijacking with signal spoofing," in *Proc. 6th Int. Conf. Recent Adv. Space Technol. (RAST)*, 2013, pp. 795–800.
131. M. Peacock, "Detection and control of small civilian UAVs," Ph.D. dissertation, School Comput. Secur. Sci., Edith Cowan Univ., Joondalup, WA, Australia, 2014.
132. J.-S. Pleban, R. Band, and R. Creutzburg, "Hacking and securing the AR.Drone 2.0 quadcopter: Investigations for improving the security of a toy," *Proc. SPIE*, vol. 9030, Feb. 2014, Art. no. 90300L.
133. P. Perazzo, F. B. Sorbelli, M. Conti, G. Dini, and C. M. Pinotti, "Drone path planning for secure positioning and secure position verification," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 16, no. 9, pp. 2478–2493, Sep. 2017.
134. R. Altawy and A. M. Youssef, "Security, privacy, and safety aspects of civilian drones: A survey," *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.*, vol. 1, no. 2, p. 7, 2017.
135. J. H. Cheon, K. Han, S.-M. Hong, H. J. Kim, J. Kim, S. Kim, H. Seo, H. Shim, and Y. Song, "Toward a secure drone system: Flying with real-time homomorphic authenticated encryption," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 24325–24339, 2018.
136. M. Gharibi, R. Boutaba, and S. L. Waslander, "Internet of drones," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1148–1162, 2016.
137. C. Lin, D. He, N. Kumar, K.-K. R. Choo, A. Vinel, and X. Huang, "Security and privacy for the Internet of drones: Challenges and solutions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 64–69, Jan. 2018.
138. M. Wazid, A. K. Das, and J.-H. Lee, "Authentication protocols for the Internet of drones: Taxonomy, analysis and future directions," *J. Ambient Intell. Humanized Comput.*, pp. 1–10, Aug. 2018. doi: 10.1007/s12652- 018-1006-x.
139. G. Choudhary, V. Sharma, and I. You, "Sustainable and secure trajectories for the military Internet of Drones (IoD) through an efficient medium access control (MAC) protocol," *Comput. Elect. Eng.*, vol. 74, pp. 59–73, Mar. 2019.
140. Z. A. Baig, P. Szewczyk, C. Valli, P. Rabadia, P. Hannay, M. Chernyshev, M. Johnstone, P. Kerai, A. Ibrahim, N. Syed, N. Peacock, and K. Sansurooah, "Future challenges for smart cities: Cyber-security and digital forensics," *Digit. Invest.*, vol. 22, pp. 3–13, Sep. 2017.
141. R. N. Akram, P.-F. Bonnefoi, S. Chaumette, K. Markantonakis, and D. Sauveron, "Secure autonomous UAVs fleets by using new specific embedded secure elements," in *Proc. IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA*, Aug. 2016, pp. 606–614.
142. J. Granjal, E. Monteiro, and J. S. Silva, "Security for the Internet of Things: A survey of existing protocols and open research issues," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 3, pp. 1294–1312, 3rd Quart., 2015.
143. I. Gurulian, R. N. Akram, K. Markantonakis, and K. Mayes, "Preventing relay attacks in mobile transactions using infrared light," in *Proc. Symp. Appl. Comput.*, 2017, pp. 1724–1731.

144. R. N. Akram, K. Markantonakis, K. Mayes, P.-F. Bonnefoi, D. Sauveron, and S. Chaumette, "An efficient, secure and trusted channel protocol for avionics wireless networks," in Proc. IEEE/AIAA 35th Digit. Avionics Syst. Conf. (DASC), Sep. 2016, pp. 1–10.
145. N. Tsitsiroudi, P. Sarigiannidis, E. Karapistoli, and A. A. Economides, "EyeSim: A mobile application for visual-assisted wormhole attack detection in IoT-enabled WSNs," in Proc. 9th IFIP Wireless Mobile Netw. Conf. (WMNC), 2016, pp. 103–109.
146. T. Tsvetkov and A. Klein, RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks, document RFC 6550, 2011.
147. L. Zhang, A. Afanasyev, J. Burke, V. Jacobson, P. Crowley, C. Papadopoulos, L. Wang, and B. Zhang, "Named data networking," ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 44, no. 3, pp. 66–73, Jul. 2014.
148. L. Wallgren, S. Raza, and T. Voigt, "Routing attacks and countermeasures in the RPL-based Internet of Things," Int. J. Distrib. Sensor Netw., vol. 9, no. 8, 2013, Art. no. 794326.
149. V. Bloom, V. Argyriou, and D. Makris, "Hierarchical transfer learning for online recognition of compound actions," Comput. Vis. Image Understand., vol. 144, pp. 62–72, Mar. 2016.
150. S.-J. Yoo, J.-H. Park, S.-H. Kim, and A. Shrestha, "Flying path optimization in UAV-assisted IoT sensor networks," ICT Express, vol. 2, no. 3, pp. 140–144, Sep. 2016.
151. M. Mozaffari, W. Saad, M. Bennis, and M. Debbah, "Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis," in Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM), Dec. 2015, pp. 1–6.
152. H. Cao, Y. Liu, X. Yue, and W. Zhu, "Cloud-assisted UAV data collection for multiple emerging events in distributed WSNs," Sensors, vol. 17, no. 8, p. 1818, 2017.
153. M. Dong, K. Ota, M. Lin, Z. Tang, S. Du, and H. Zhu, "UAV-assisted data gathering in wireless sensor networks," J. Supercomput., vol. 70, no. 3, pp. 1142–1155, 2014.
154. D. Zorbas, T. Razafindralambo, D. P. P. Luigi, and F. Guerriero, "Energy efficient mobile target tracking using flying drones," Procedia Comput. Sci., vol. 19, pp. 80–87, Jun. 2013.
155. B. Uragun, "Energy efficiency for unmanned aerial vehicles," in Proc. 10th Int. Conf. Mach. Learn. Appl. Workshops (ICMLA), vol. 2, 2011, pp. 316–320.
156. D. H. Choi, S. H. Kim, and D. K. Sung, "Energy-efficient maneuvering and communication of a single UAV-based relay," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 50, no. 3, pp. 2320–2327, Jul. 2014.
157. Y. Yu, S. Lee, J. Lee, K. Cho, and S. Park, "Design and implementation of wired drone docking system for cost-effective security system in IoT environment," in Proc. IEEE Int. Conf. Consum. Electron. (ICCE), Jan. 2016, pp. 369–370.
158. S.-H. Seo, J.-I. Choi, and J. Song, "Secure utilization of beacons and UAVs in emergency response systems for building fire hazard," Sensors, vol. 17, no. 10, p. 2200, 2017.
159. K. Fujii, K. Higuchi, and J. Rekimoto, "Endless flyer: A continuous flying drone with automatic battery replacement," in Proc. IEEE IEEE 10th Int. Conf. Ubiquitous Intell. Comput., 10th Int. Conf. Auto. Trusted Comput. (UIC/ATC), Dec. 2013, pp. 216–223.

160. Z. Dawy, W. Saad, A. Ghosh, J. G. Andrews, and E. Yaacoub, "Toward massive machine type cellular communications," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 1, pp. 120–128, Feb. 2017.
161. P. Sathyamoorthy, E. C.-H. Ngai, X. Hu, and V. C. M. Leung, "Energy efficiency as an orchestration service for mobile Internet of Things," in *Proc. IEEE 7th Int. Conf. Cloud Comput. Technol. Sci. (CloudCom)*, Nov./Dec. 2015, pp. 155–162.
162. M. Hassanalieragh, A. Page, T. Soyata, G. Sharma, M. Aktas, G. Mateos, B. Kantarci, and S. Andreescu, "Health monitoring and management using Internet-of-Things (IoT) sensing with cloud-based processing: Opportunities and challenges," in *Proc. IEEE Int. Conf. Services Comput. (SCC)*, Jun./Jul. 2015, pp. 285–292.
163. F. Schaub and P. Knierim, "Drone-based privacy interfaces: Opportunities and challenges," in *Proc. WSF@ SOUPS*, 2016, pp. 1–4.
164. A. T. Erman, L. V. Hoesel, P. Havinga, and J. Wu, "Enabling mobility in heterogeneous wireless sensor networks cooperating with UAVs for mission-critical management," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 15, no. 6, pp. 38–46, Dec. 2008.
165. S. Koulali, E. Sabir, T. Taleb, and M. Azizi, "A green strategic activity scheduling for UAV networks: A sub-modular game perspective," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 58–64, May 2016.
166. D. Ahsan, "Rescue Emergency Drone for fast response to medical emergencies due to traffic accidents," *World Acad. Sci., Eng. Technol. Int. J. Health Med. Eng.*, vol. 11, no. 11, pp. 637–641, 2018.
167. E. P. de Freitas, T. Heimfarth, I. F. Netto, C. E. Lino, C. E. Pereira, A. M. Ferreira, F. R. Wagner, and T. Larsson, "UAV relay network to support WSN connectivity," in *Proc. Int. Congr. Ultra Modern Telecommun. Control Syst. Workshops (ICUMT)*, 2010, pp. 309–314.
168. D. G. Reina, T. Camp, A. Munjal, S. L. Toral, and H. Tawfik, "Evolutionary deployment and hill climbing-based movements of multi-UAV networks in disaster scenarios," *Appl. Big Data Anal.*, pp. 63–95, 2018. doi: 10.1007/978-3-319-76472-6_4.
169. E. Tuyishimire, A. Bagula, S. Rekhis, and N. Boudriga, "Cooperative data muling from ground sensors to base stations using UAVs," in *Proc. IEEE Symp. Comput. Commun. (ISCC)*, Jul. 2017, pp. 35–41.
170. M. Quaritsch, K. Kruggl, D. Wischounig-Strucl, S. Bhattacharya, M. Shah, and B. Rinner, "Networked UAVs as aerial sensor network for disaster management applications," *Elektrotech. Informationtech.*, vol. 127, no. 3, pp. 56–63, 2010.
171. A. Klimkowska, I. Lee, and K. Choi, "Possibilities of UAS for maritime monitoring," *ISPRS-Int. Arch. Photogram., Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, vol. 41-B1, pp. 885–891, Jul. 2016.
172. T. F. Villa, F. Gonzalez, B. Miljevic, Z. D. Ristovski, and L. Morawska, "An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives," *Sensors*, vol. 16, no. 7, p. 1072, 2016.
173. T. F. Villa, F. Salimi, K. Morton, L. Morawska, and F. Gonzalez, "Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements," *Sensors*, vol. 16, no. 12, p. 2202, 2016.
174. J. Wang, E. Schluntz, B. Otis, and T. Dey, "A new vision for smart objects and the Internet of Things: Mobile robots and long-range UHF RFID sensor tags," 2015, arXiv:1507.02373. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1507.02373>

175. A. Telesetsky, "Navigating the legal landscape for environmental monitoring by unarmed aerial vehicles," *George Washington J. Energy Environ. Law*, vol. 7, p. 140, 2016.
176. O. Alvear, C. T. Calafate, E. Hernández, J.-C. Cano, and P. Manzoni, "Mobile pollution data sensing using UAVs," in *Proc. 13th Int. Conf. Adv. Mobile Comput. Multimedia*, 2015, pp. 393–397.
177. O. A. Alvear, N. R. Zema, E. Natalizio, and C. T. Calafate, "A chemotactic pollution-homing uav guidance system," in *Proc. 13th Int. Wireless Commun. Mobile Comput. Conf. (IWCMC)*, 2017, pp. 2115–2120.
178. O. Alvear, N. R. Zema, E. Natalizio, and C. T. Calafate, "Using UAVbased systems to monitor air pollution in areas with poor accessibility," *J. Adv. Transp.*, vol. 2017, Aug. 2017, Art. no. 8204353.
179. V. C. Koo, Y. K. Chan, G. Vetharatnam, M. Y. Chua, C. H. Lim, C.-S. Lim, C. C. Thum, T. S. Lim, Z. bin Ahmad, K. A. Mahmood, M. H. Bin Shahid, C. Y. Ang, W. Q. Tan, P. N. Tan, K. S. Yee, W. G. Cheaw, H. S. Boey, A. L. Choo, and B. C. Sew, "A new unmanned aerial vehicle synthetic aperture radar for environmental monitoring," *Prog. Electromagn. Res.*, vol. 122, pp. 245–268, 2012. [Online]. Available: <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=11092604>
180. V. Šmídl and R. Hofman, "Tracking of atmospheric release of pollution using unmanned aerial vehicles," *Atmos. Environ.*, vol. 67, pp. 425–436, Mar. 2013.
181. W. Zang, J. Lin, Y. Wang, and H. Tao, "Investigating small-scale water pollution with UAV remote sensing technology," in *Proc. World Automat. Congr. (WAC)*, 2012, pp. 1–4.
182. Q. Gu, D. R. Michanowicz, and C. Jia, "Developing a modular unmanned aerial vehicle (UAV) platform for air pollution profiling," *Sensors*, vol. 18, no. 12, p. 4363, Dec. 2018.
183. L.-Y. Chen, H.-S. Huang, C.-J. Wu, Y.-T. Tsai, and Y.-S. Chang, "A lorabased air quality monitor on unmanned aerial vehicle for smart city," in *Proc. Int. Conf. System Sci. Eng. (ICSSE)*, 2018, pp. 1–5.
184. P. P. Ray, M. Mukherjee, and L. Shu, "Internet of Things for disaster management: State-of-the-art and prospects," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 18818–18835, 2017.
185. D. G. Reina, T. Camp, A. Munjal, and S. L. Toral, "Evolutionary deployment and local search-based movements of 0th responders in disaster scenarios," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 88, pp. 61–78, Nov. 2018.
186. N. Chaudhuri and I. Bose, "Application of image analytics for disaster response in smart cities," in *Proc. 52nd Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, 2019, pp. 3036–3045.
187. P. Sakhardande, S. Hanagal, and S. Kulkarni, "Design of disaster management system using IoT based interconnected network with smart city monitoring," in *Proc. Int. Conf. Internet Things Appl. (IOTA)*, 2016, pp. 185–190.
188. Z. Alazawi, O. Alani, M. B. Abdljabar, S. Altowaijri, and R. Mehmood, "A smart disaster management system for future cities," in *Proc. ACM Int. Workshop Wireless Mobile Technol. Smart Cities*, 2014, pp. 1–10.
189. A. Boukerche and R. W. L. Coutinho, "Smart disaster detection and response system for smart cities," in *Proc. IEEE Symp. Comput. Commun. (ISCC)*, Jun. 2018, pp. 1102–1107.

190. M. Aljehani and M. Inoue, "Safe map generation after a disaster, assisted by an unmanned aerial vehicle tracking system," *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 271–282, 2019.
191. J. S. Kumar, M. A. Zaveri, S. Kumar, and M. Choksi, "Situationaware conditional sensing in disaster-prone areas using unmanned aerial vehicles in IoT environment," in *Data and Communication Networks*. Singapore: Springer, 2019, pp. 135–146.
192. A. Caragliu, C. D. Bo, and P. Nijkamp, "Smart cities in europe," *J. Urban Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 65–82, 2011.
193. A. Giyenko and Y. I. Cho, "Intelligent UAV in smart cities using IoT," in *Proc. 16th Int. Conf. Control, Automat. Syst. (ICCAS)*, 2016, pp. 207–210.
194. J. Won, S.-H. Seo, and E. Bertino, "Certificateless cryptographic protocols for efficient drone-based smart city applications," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 3721–3749, 2017.
195. C. Luo, J. Nightingale, E. Asemota, and C. Grecos, "A UAV-cloud system for disaster sensing applications," in *Proc. IEEE 81st Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, May 2015, pp. 1–5.
196. K.-W. Chiang, M.-L. Tsai, and C.-H. Chu, "The development of an UAV borne direct georeferenced photogrammetric platform for Ground Control Point free applications," *Sensors*, vol. 12, no. 7, pp. 9161–9180, 2012.
197. S. W. Loke, "The Internet of flying-things: Opportunities and challenges with airborne fog computing and mobile cloud in the clouds," 2015, arXiv:1507.04492. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1507.04492>
198. M. Cochez, J. Periaux, V. Terziyan, K. Kamlyk, and T. Tuovinen, "Evolutionary cloud for cooperative UAV coordination," *Dept. Math. Inf. Technol., Softw. Eng. Comput. Intell., Jyväskylä Univ., Jyväskylä, Finland, Tech. Rep. 1/2014*, 2014.
199. S. Morgenthaler, T. Braun, Z. Zhao, T. Staub, and M. Anwander, "UAVNet: A mobile wireless mesh network using unmanned aerial vehicles," in *Proc. IEEE Globecom Workshops*, Dec. 2012, pp. 1603–1608.
200. S. H. Alsamhi, M. S. Ansari, O. Ma, F. Almalki, and S. K. Gupta, "Tethered balloon technology in design solutions for rescue and relief team emergency communication services," *Disaster Med. Public Health Preparedness*, vol. 13, no. 2, pp. 203–210, 2018.
201. S. H. Alsamhi and N. S. Rajput, "An intelligent HAP for broadband wireless communications: Developments, QoS and applications," *Int. J. Electron. Electr. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 134–143, 2015.
202. S. Alsamhi, S. K. Gupta, N. Rajput, and R. Saket, "Network architectures exploiting multiple tethered balloon constellations for coverage extension," in *Proc. 6th Int. Conf. Adv. Eng. Sci. Appl. Math.*, 2016, pp. 1–6.
203. S. H. Alsamhi, M. S. Ansari, and N. S. Rajput, "Disaster coverage predication for the emerging tethered balloon technology: Capability for preparedness, detection, mitigation, and response," *Disaster Med. Public Health Preparedness*, vol. 12, no. 2, pp. 222–231, 2018.
204. S. A. Khaleefa, S. H. Alsamhi, and N. S. Rajput, "Tethered balloon technology for telecommunication, coverage and path loss," in *Proc. IEEE Students' Conf. Electr., Electron. Comput. Sci.*, Mar. 2014, pp. 1–4.

205. A. Ataei and I. C. Paschalidis, "Quadrotor deployment for emergency response in smart cities: A robust MPC approach," in *Proc. 54th IEEE Conf. Decis. Control (CDC)*, 2015, pp. 5130–5135.
206. G. Tuna, B. Nefzi, and G. Conte, "Unmanned aerial vehicle-aided communications system for disaster recovery," *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 41, pp. 27–36, May 2014.
207. I. Jawhar, N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, and S. Zhang, "Data communication in linear wireless sensor networks using unmanned aerial vehicles," in *Proc. Int. Conf. Unmanned Aircraft Syst. (ICUAS)*, 2013, pp. 492–499.
208. I. Jawhar, N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, and S. Zhang, "A framework for using unmanned aerial vehicles for data collection in linear wireless sensor networks," *J. Intell. Robot. Syst.*, vol. 74, nos. 1–2, pp. 437–453, Apr. 2014.
209. I. Jawhar, N. Mohamed, and J. Al-Jaroodi, "UAV-based data communication in wireless sensor networks: Models and strategies," in *Proc. Int. Conf. Unmanned Aircraft Syst. (ICUAS)*, 2015, pp. 687–694.
210. E. N. Barmounakis, E. I. Vlahogianni, and J. C. Golias, "Unmanned aerial aircraft systems for transportation engineering: Current practice and future challenges," *Int. J. Transp. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 111–122, 2016.
211. Y. M. Chen, L. Dong, and J.-S. Oh, "Real-time video relay for UAV traffic surveillance systems through available communication networks," in *Proc. IEEE wireless Commun. Netw. Conf.*, Mar. 2007, pp. 2608–2612.
212. K. Kanistras, G. Martins, M. J. Rutherford, and K. P. Valavanis, "Survey of unmanned aerial vehicles (UAVs) for traffic monitoring," in *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2015, pp. 2643–2666.
213. M. D'Aloia, M. Rizzi, R. Russo, M. Notarnicola, and L. Pellicani, "A marker-based image processing method for detecting available parking slots from UAVs," in *Proc. Int. Conf. Image Anal. Process.*, 2015, pp. 275–281.
214. L. Hull, "Drone makes first UK 'arrest' as police catch car thief hiding under bushes," *Tech. Rep.*, 2016. [Online]. Available: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-1250177/Police-make-arrest-usingunmanned-drone.html>
215. O. P. Popoola and K. Wang, "Video-based abnormal human behavior recognition—A review," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev.*, vol. 42, no. 6, pp. 865–878, Nov. 2012.
216. N. Kiryati, T. R. Raviv, Y. Ivanchenko, and S. Rochel, "Real-time abnormal motion detection in surveillance video," in *Proc. 19th Int. Conf. Pattern Recognit.*, 2008, pp. 1–4.
217. F. Bonomi, R. Mito, J. Zhu, and S. Addepalli, "Fog computing and its role in the Internet of Things," presented at the 1st ed. MCC Workshop Mobile Cloud Comput., Helsinki, Finland, 2012, pp. 13–15.
218. N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, S. Lazarova-Molnar, I. Jawhar, and S. Mahmoud, "A service-oriented middleware for cloud of things and fog computing supporting smart city applications," in *Proc. IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intell. Comput., Adv. Trusted Comput., Scalable Comput. Commun., Cloud Big Data Comput., Internet People Smart City Innov. (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCom/IOP/SCI)*, Aug. 2017, pp. 1–7.
219. C. Perera, Y. Qin, J. C. Estrella, S. Reiff-Marganiec, and A. V. Vasilakos, "Fog computing for sustainable smart cities: A survey," *ACM Comput. Surv.*, vol. 50, no. 3, 2017, Art. no. 32.

220. M. Yannuzzi, F. van Lingen, A. Jain, O. L. Parellada, M. M. Flores, D. Carrera, J. L. Pérez, D. Montero, P. Chacin, and A. Corsaro, "A new era for cities with fog computing," *IEEE Internet Comput.*, vol. 21, no. 2, pp. 54–67, Mar. 2017.
221. N. Mohamed, J. Al-Jaroodi, I. Jawhar, H. Noura, and S. Mahmoud, "UAVFog: A UAV-based fog computing for Internet of Things," in *Proc. IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intell. Comput., Adv. Trusted Comput., Scalable Comput. Commun., Cloud Big Data Comput., Internet People Smart City Innov. (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCom/IOP/SCI)*, Aug. 2017, pp. 1–8.
222. S. Mahmoud and N. Mohamed, "Collaborative UAVs cloud," in *Proc. Int. Conf. Unmanned Aircraft Syst. (ICUAS)*, 2014, pp. 365–373.
223. S. Mahmoud and N. Mohamed, "Broker architecture for collaborative UAVs cloud computing," in *Proc. Int. Conf. Collaboration Technol. Syst. (CTS)*, 2015, pp. 212–219.
224. M. Gheisari, J. Irizarry, and B. N. Walker, "UAS4SAFETY: The potential of unmanned aerial systems for construction safety applications," in *Proc. Construct. Res. Congr., Construct. Global Netw.*, 2014, pp. 1801–1810.
225. B. Vergouw, H. Nagel, G. Bondt, and B. Custers, "Drone technology: Types, payloads, applications, frequency spectrum issues and future developments," in *The Future of Drone Use*. The Hague, The Netherlands: T.M.C. Asser Press, 2016, pp. 21–45.
226. R. L. Finn and D. Wright, "Unmanned aircraft systems: Surveillance, ethics and privacy in civil applications," *Comput. Law Secur. Rev.*, vol. 28, no. 2, pp. 184–194, 2012.
227. L. Huang, A. D. Joseph, B. Nelson, B. I. P. Rubinstein, and J. D. Tygar, "Adversarial machine learning," in *Proc. 4th ACM Workshop Secur. Artif. Intell.*, 2011, pp. 43–58.
228. A. Kurakin, I. Goodfellow, and S. Bengio, "Adversarial machine learning at scale," 2016, arXiv:1611.01236. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/1611.01236>
229. P. McDaniel, N. Papernot, and Z. B. Celik, "Machine learning in adversarial settings," *IEEE Security Privacy*, vol. 14, no. 3, pp. 68–72, May/Jun. 2016.
230. N. Papernot, P. McDaniel, S. Jha, M. Fredrikson, Z. B. Celik, and A. Swami, "The limitations of deep learning in adversarial settings," in *Proc. IEEE Eur. Symp. Secur. Privacy (EuroS P)*, Mar. 2016, pp. 372–387.
231. D. Wang, D. He, P. Wang, and C.-H. Chu, "Anonymous two-factor authentication in distributed systems: Certain goals are beyond attainment," *IEEE Trans. Dependable Secure Comput.*, vol. 12, no. 4, pp. 428–442, Jul./Aug. 2015.
232. S. H. Alsamhi, O. Ma, M. S. Ansari and F. A. Almalki, "Survey on Collaborative Smart Drones and Internet of Things for Improving Smartness of Smart Cities," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 128125-128152, 2019.
233. Skondras, E., Zoumi, E., Michalas, A., and Vergados, D. D., "A Network Selection Algorithm for supporting Drone Services in 5G Network Architectures," in *Proceedings of the 2019 IEEE Wireless Telecommunications Symposium (WTS)*, New York, NY, USA, 9-12 April 2019, pp. 1-6.
234. I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, and S. Temel, "Flying ad-hoc networks (fanets): A survey," *Ad Hoc Networks*, Elsevier, vol. 11, no. 3, pp. 1254–1270, 2013.
235. O. K. Sahingoz, "Networking models in flying ad-hoc networks (fanets): Concepts and challenges," *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Springer, vol. 74, no. 1-2, pp. 513–527, 2014.

236. Y. Gu, M. Zhou, S. Fu, and Y. Wan, "Airborne wifi networks through directional antennae: An experimental study," in Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2015 IEEE. IEEE, 2015, pp. 1314–1319.
237. L. M. Schalk and M. Herrmann, "Suitability of lte for drone-toinfrastructure communications in very low level airspace," in Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2017 IEEE/AIAA 36th. IEEE, 2017, pp. 1–7.
238. R. Vilalta et al., "Telcofog: A unified flexible fog and cloud computing architecture for 5g networks," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 8, pp. 36–43, 2017.
239. F. Z. Yousaf, M. Bredel, S. Schaller, and F. Schneider, "Nfv and sdn-key technology enablers for 5g networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 35, no. 11, pp. 2468–2478, 2017.
240. K. Zhang, Y. Mao, S. Leng, Y. He, and Y. Zhang, "Mobile-edge computing for vehicular networks: A promising network paradigm with predictive off-loading," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 12, no. 2, pp. 36–44, 2017.
241. T. Bilen, B. Canberk, and K. R. Chowdhury, "Handover management in software-defined ultra-dense 5g networks," IEEE Network, vol. 31, no. 4, pp. 49–55, 2017.
242. H. Wang, S. Chen, M. Ai, and H. Xu, "Localized mobility management for 5g ultra dense network," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 66, no. 9, pp. 8535–8552, 2017.
243. D. Calabuig, S. Bampounakis, S. Gimenez, A. Kousaridas, T. R. Lakshmana, J. Lorca, P. Lunden, Z. Ren, P. Sroka, E. Ternon et al., "Resource and mobility management in the network layer of 5g cellular ultra-dense networks," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 6, pp. 162–169, 2017.
244. E. G. Larsson, T. L. Marzetta, H. Q. Ngo, and H. Yang, "Antenna count for massive mimo: 1.9 ghz vs. 60 ghz," IEEE Communications Magazine, vol. 56, no. 9, pp. 132–137, 2018.
245. "TS 136 306 V15.1.0 (2018-07) LTE, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), User Equipment (UE) radio access capabilities (Release 15)," Technical Specification, 3GPP, 2018.
246. H. Ji, Y. Kim, J. Lee, E. Onggosanusi, Y. Nam, J. Zhang, B. Lee, and B. Shim, "Overview of full-dimension mimo in lte-advanced pro," IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 2, pp. 176–184, 2017.
247. M. Lahby, C. Leghris, and A. Adib, "New multi access selection method based on mahalanobis distance," Applied Mathematical Sciences, vol. 6, no. 53-56, pp. 2745–2760, 2012.
248. I. Martinez and V. Ramos, "Netanpi: A network selection mechanism for lte traffic offloading based on the analytic network process," in Sarnoff Symposium, 2015 36th IEEE. IEEE, 2015, pp. 117–122.
249. S. Kaur, S. K. Sehra, and S. S. Sehra, "A framework for software quality model selection using topsis," in Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT), IEEE International Conference on. IEEE, 2016, pp. 736–739.
250. E. Skondras, A. Sgora, A. Michalas, and D. D. Vergados, "An analytic network process and trapezoidal interval-valued fuzzy technique for order preference by similarity to ideal solution network access selection method," International Journal of Communication Systems, vol. 29, no. 2, pp. 307–329, 2016.

251. I. Bisio, C. Braccini, S. Delucchi, F. Lavagetto, and M. Marchese, "Dynamic multi-attribute network selection algorithm for vertical handover procedures over mobile ad hoc networks," in Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014, pp. 342–347.
252. I. Lassoued, J.-M. Bonnin, Z. Ben Hamouda, and A. Belghith, "A methodology for evaluating vertical handoff decision mechanisms," in Networking, 2008. ICN 2008. Seventh International Conference on. IEEE, 2008, pp. 377–384.
253. E. Roszkowska and D. Kacprzak, "The fuzzy saw and fuzzy topsis procedures based on ordered fuzzy numbers," Information Sciences, vol. 369, pp. 564–584, 2016.
254. D. A. Maroua Drissi, Mohammed Oumsis, "A fuzzy ahp approach to network selection improvement in heterogeneous wireless networks," Networked Systems, pp. 169–182.
255. E. Skondras, A. Michalas, N. Tsois, and D. D. Vergados, "A network selection scheme with adaptive criteria weights for 5g vehicular systems," in Information Intelligence Systems and Applications (IISA), 2018 IEEE International Conference on. IEEE, 2018.
256. S.-H. Wei and S.-M. Chen, "Fuzzy risk analysis based on interval-valued fuzzy numbers," Expert Systems with Applications, vol. 36, no. 2, pp. 2285–2299, 2009.
257. "Network simulator 3 (ns3)," <https://www.nsnam.org/>, accessed: 2018.
258. F. Wex, G. Schryen, S. Feuerriegel, and D. Neumann, "Emergency response in natural disaster management: Allocation and scheduling of rescue units," European Journal of Operational Research, vol. 235, no. 3, pp. 697–708, 2014.