



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ**  
**ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών**  
**Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και**  
**των Υπολογιστών**  
**Ειδίκευση Δικτύων Επικοινωνιών και Κατανεμημένων**  
**Συστημάτων,**  
**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και Εφαρμογές Αδόμητων**  
**Δικτύων Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (FANETs)**

**Δέσποινα Π. Μπαζίνη**  
**A.M. : 19013**

**Εισηγητής: Δρ Βασίλειος Μάμαλης, Καθηγητής**

Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και Εφαρμογές Αδόμητων Δικτύων Μη Επανδρωμένων  
Ιπτάμενων Οχημάτων (FANETs)

Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και Εφαρμογές Αδόμητων Δικτύων Μη Επανδρωμένων  
Ιπτάμενων Οχημάτων (FANETs)

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και Εφαρμογές Αδόμητων Δικτύων  
Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων (FANETs)**

**Δέσποινα Π. Μπαζίνη  
Α.Μ. 19013**

**Εισηγητής:**

**Δρ Βασίλειος Μάμαλης, Καθηγητής**

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Γραμματή Πάντζιου, Καθηγήτρια  
Καντζάβελου Ιωάννα, Επίκουρη Καθηγήτρια**

**Ημερομηνία εξέτασης 12/7/2021**

Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και Εφαρμογές Αδόμητων Δικτύων Μη Επανδρωμένων  
Ιπτάμενων Οχημάτων (FANETs)

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Δέσποινα Μπαζίνη του Παύλου, με αριθμό μητρώου 19013 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών "Επιστήμη και Τεχνολογία της Πληροφορικής και των Υπολογιστών" του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή.

Η Δηλούσα



Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και Εφαρμογές Αδόμητων Δικτύων Μη Επανδρωμένων  
Ιπτάμενων Οχημάτων (FANETs)

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή, Δρ Βασίλειο Μάμαλη, για την υποστήριξή του, αρχικά, με την ανάθεση του θέματος της εργασίας και στη συνέχεια με την καίρια και μεστή καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια συγγραφής της εργασίας. Οι συμβουλές του και οι υποδείξεις του συνετέλεσαν καθοριστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επίκουρη Καθηγήτρια του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, της Σχολής Τεχνολογικών Εφαρμογών του Τ.Ε.Ι. Αθήνας, Κα Φουντά Ιφιγένεια, που με παρότρυνε να ξεκινήσω την παρακολούθηση ενός μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών και με ενθάρρυνε να συνεχίσω μέχρι το τέλος.

Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και Εφαρμογές Αδόμητων Δικτύων Μη Επανδρωμένων  
Ιπτάμενων Οχημάτων (FANETs)



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής θα αποτελέσει η επισταμένη διερεύνηση, μελέτη και κριτική αξιολόγηση των πρωτοκόλλων επικοινωνίας-δρομολόγησης και των εφαρμογών των αδόμητων δικτύων μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων (FANETs). Αρχικά θα καταγραφούν-ταξινομηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων-αεροσκαφών (UAVs/Drones) και θα αναγνωριστούν τα βασικά ζητήματα επικοινωνίας μεταξύ τους στα πλαίσια μιας εφαρμογής. Στη συνέχεια θα αναλυθούν οι σημαντικότερες εφαρμογές - σενάρια χρήσης τους, τόσο μεμονωμένα όσο και σε σχηματισμό αδόμητου δικτύου (FANET). Ειδικότερα, όσον αφορά το σχηματισμό αντίστοιχων αδόμητων δικτύων, θα μελετηθούν και κατηγοριοποιηθούν-ταξινομηθούν κατάλληλα τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης (με ή χωρίς ομαδοποίηση) και συγκέντρωσης δεδομένων. Θα παρουσιαστούν-συζητηθούν επίσης τα βασικότερα μοντέλα κίνησης (mobility models) τέτοιου είδους οχημάτων και άλλα απαιτούμενα χαρακτηριστικά σχετικά με τις δυνατότητες προσομοίωσης και πειραματικής μελέτης της συμπεριφοράς τους.

## ABSTRACT

The object of the dissertation will be the diligent investigation, study and critical evaluation of the communication-routing protocols and the applications of the ad-hoc flying networks of unmanned aerial vehicles (FANETs). Initially, the basic characteristics of unmanned aerial vehicles (UAVs / Drones) will be recorded-classified and the basic communication issues between them within an application will be identified. Then the most important applications will be analyzed - scenarios of their use both individually and in the formation of an ad-hoc network (FANET). In particular, regarding the formation of respective ad-hoc networks, the existing routing protocols (with or without clustering) and data collection will be studied and categorized-appropriate. The basic mobility models of such vehicles and other required features related to the possibilities of simulation and experimental study of their behavior will also be presented-discussed.

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Δίκτυα Υπολογιστών

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: UAV, FANET, πρωτόκολλα δρομολόγησης, μοντέλα  
κινητικότητας, αδόμητα δίκτυα

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b> .....	<b>20</b>
1.1 Τι είναι τα Μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα-UAVs .....	20
1.2 Κατηγοριοποίηση των UAVs .....	21
1.2.1 Κατηγοριοποίηση βασιζόμενη στην αεροδυναμική τους .....	21
1.2.1.1 Με σταθερά-άκαμπτα πτερύγια (fixed-wings) .....	21
1.2.1.2 Παλλόμενων πτερύγων ή ορνιθόπτερα (flapping-wings) ....	23
1.2.1.3 Με περιστρεφόμενα πτερύγια-πολλαπλούς έλικες ή πολυκόπτερα (multicopter ή multicopter) .....	24
1.2.1.4 Τύπου μικρού αερόστατου (blimps) .....	26
1.2.1.5 Υβριδικά ή κεκλιμένου στροφείου (hybrid UAVs ή tiltrotor)	27
1.2.2 Κατηγοριοποίηση βασιζόμενη στο βάρος τους και την εμβέλεια πτήσης .....	28
1.2.3 Κατηγοριοποίηση βασιζόμενη στο σχηματισμό/διάταξη/λειτουργία τους: μεμονωμένα UAVs ή σμήνη από UAVs .....	31
1.2.4 Κατηγοριοποίηση βασιζόμενη στη χρήση τους .....	33
1.3 Ιστορική αναδρομή .....	33
1.4 Συστατικά μέρη ενός UAV .....	42
1.4.1 Η εναέρια πλατφόρμα .....	43
1.4.1.1 Η άτρακτος .....	43
1.4.1.2 Το σύστημα πλοήγησης .....	43
1.4.1.2.1 Ο ελεγκτής πτήσης .....	43
1.4.1.2.2 Η μονάδα GPS/GNSS .....	44
1.4.1.2.3 Το αδρανειακό σύστημα .....	45
1.4.1.3 Το σύστημα ισχύος/τροφοδοσίας .....	46
1.4.1.4 Το ωφέλιμο φορτίο .....	47
1.4.2 Ο επίγειος σταθμός ελέγχου .....	48
1.4.3 Το σύστημα επικοινωνίας .....	49

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b> .....	<b>50</b>
2.1 Βασική χρήση των UAVs – Εφαρμογές .....	50
2.1.1 Τα UAVs στην υπηρεσία της γεωργίας .....	50
2.1.1.1 Αισθητήρες που προσαρμόζονται στα UAVs στη γεωργία ακριβείας .....	51
2.1.1.2 Εφαρμογές των UAVs στη γεωργία ακριβείας .....	52
2.1.1.2.1 Χαρτογράφηση και διαχείριση ζιζανίων .....	53
2.1.1.2.2 Παρακολούθηση της ανάπτυξης της βλάστησης και εκτίμηση της απόδοσης .....	54
2.1.1.2.3 Παρακολούθηση της υγείας της βλάστησης και ανίχνευση ασθενειών .....	54
2.1.1.2.4 Διαχείριση άρδευσης .....	55
2.1.1.2.5 Ψεκασμός φυτών καλλιέργειας .....	55
2.1.1.2.6 Τεχνητή επικοινωνία .....	56
2.1.1.2.7 Εναέρια επιθεώρηση και συγκέντρωση κοπαδιών ζώων .....	57
2.1.2 Διαχείριση καταστροφών και συνδρομή των UAVs στην έρευνα και τη διάσωση .....	57
2.1.2.1 Διαρροή επικίνδυνων υλικών και πυρηνικά ατυχήματα .....	57
2.1.2.2 Σεισμοί .....	58
2.1.2.3 Πλημμύρες .....	59
2.1.2.4 Δασικές πυρκαγιές .....	59
2.1.2.5 Έρευνα και Διάσωση .....	60
2.1.2.5.1 Θαλάσσιες διασώσεις .....	61
2.1.2.5.2 Τα UAVs στην υπηρεσία της αστυνομίας .....	61
2.1.3 Πρόγνωση καιρού .....	62
2.1.4 Ιατρική και υγεία .....	63
2.1.5 Μεταφορά φορτίων .....	65
2.1.6 UAVs και έξυπνες πόλεις .....	65
2.1.6.1 Διαχείριση κυκλοφορίας .....	67
2.1.6.2 Διαχείριση πλήθους .....	67
2.1.6.3 Έλεγχος και παρακολούθηση φυσικών καταστροφών .....	67
2.1.6.4 Μεταφορά φορτίων .....	68

2.1.6.5 Επιθεώρηση υποδομών .....	68
2.1.6.6 Μέτρηση ρύπων .....	68
2.1.7 Τα UAVs προστατεύουν το περιβάλλον και τη φύση .....	69
2.1.8 Κάλυψη δικτύου και τηλεπικοινωνιών .....	69
2.1.9 Στρατιωτικές εφαρμογές .....	72
2.1.10 Εναέρια φωτογράφιση .....	72
2.1.11 Ψυχαγωγία .....	72
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 .....</b>	<b>74</b>
3.1 Δίκτυα UAVs – FANETs .....	74
3.1.1 Δικτύωση βάσει υποδομής .....	74
3.1.2 Κατ' απαίτηση δικτύωση .....	75
3.2 Χαρακτηριστικά των FANETs .....	76
3.3 Αρχιτεκτονικές επικοινωνίας και εφαρμογής .....	79
3.3.1 Αρχιτεκτονική επικοινωνίας .....	79
3.3.1.1 Ενός επιπέδου και μιας ομάδας .....	82
3.3.1.2 Ενός επιπέδου και πολλών ομάδων .....	83
3.3.1.3 Πολλών επιπέδων και πολλών ομάδων .....	83
3.3.2 Αρχιτεκτονική εφαρμογής .....	85
3.3.2.1 Σφιχτά συνδεδεμένοι κόμβοι .....	86
3.3.2.1.1 Αρχιτεκτονικές φυσικά συνδεδεμένες .....	86
3.3.2.1.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες σε σχηματισμό .....	87
3.3.2.2 Χαλαρά συνδεδεμένοι κόμβοι .....	87
3.3.2.2.1 Υποκατηγορία κατανομής εργασίας .....	87
3.3.2.2.2 Υποκατηγορία συνεργασίας σμήνους .....	88
3.4 Μοντέλα κινητικότητας .....	88
3.4.1 Pure Randomized μοντέλα κινητικότητας .....	89
3.4.1.1 Random Waypoint (RWP) .....	89
3.4.1.2 Random Direction (RD) .....	90
3.4.2 Time Dependent μοντέλα κινητικότητας .....	91
3.4.2.1 Gauss-Markov (GM) .....	91
3.4.2.2 Smooth-Turn (ST) .....	92
3.4.3 Path-planned μοντέλα κινητικότητας .....	93

3.4.3.1 Semi-random Circular Movement (SRCM) .....	93
3.4.3.2 Paparazzi (PPRZM) .....	94
3.4.4 Group μοντέλα κινητικότητας .....	96
3.4.4.1 Column (CLMN) .....	96
3.4.4.2 Nomadic Community (NC) .....	97
3.4.4.3 Pursue (PRS) .....	99
3.4.5 Topology-control-based μοντέλα κινητικότητας .....	99
3.4.5.1 Distributed Pheromone Repel (DPR) .....	100
3.4.5.2 Self Deployable Point Coverage (SDPC) .....	100
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 .....</b>	<b>102</b>
4.1 Πρωτόκολλα δρομολόγησης για FANETs .....	102
4.2 Απαιτήσεις σχεδιασμού για πρωτόκολλα δρομολόγησης για FANETs ..	102
4.2.1 Τεχνικές δρομολόγησης κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs .....	105
4.3 Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs .....	107
4.3.1 Βασισμένα στην τοπολογία (Topology-based) .....	108
4.3.1.1 Επίπεδα (Flat) .....	108
4.3.1.1.1 Proactive .....	109
4.3.1.1.1.1 Improved OLSR-ETX .....	109
4.3.1.1.1.2 Ground Control System routing (GCS- routing) .....	110
4.3.1.1.2 Reactive .....	115
4.3.1.1.2.1 Secure UAV Ad hoc routing Protocol (SUAP) .....	116
4.3.1.1.3 Hybrid .....	119
4.3.1.1.3.1 An Hybrid Routing Algorithm (HRA) ...	119
4.3.1.2 Ιεραρχικά (Hierarchical cluster-based) .....	121
4.3.1.2.1 Mobility Prediction Clustering Algorithm (MPCA) ....	122
4.3.1.2.2 Energy Aware Link-based Clustering (EALC) .....	123
4.3.2 Γεωγραφικά (Geographic) .....	126
4.3.2.1 Non-DTN routing protocols .....	127
4.3.2.1.1 Mobility Prediction-based Geographic Routing	

Πρωτόκολλα Δρομολόγησης και Εφαρμογές Αδόμητων Δικτύων Μη Επανδρωμένων  
Ιπτάμενων Οχημάτων (FANETs)

(MPGR) .....	127
4.3.2.2 DTN routing protocols .....	132
4.3.2.2.1 Location Aware Routing for Opportunistic Delay Tolerant Networks (LAROD) .....	133
4.3.3 Υβριδικά (Hybrid - Topology & geographic) .....	136
4.3.3.1 Reactive-Greedy-Reactive (RGR) .....	138
4.3.4 Bio-inspired .....	141
4.3.4.1 Boids of Reinolds-AODV (BR-AODV) .....	142
4.4 Σύγκριση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs .....	144
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>149</b>

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

<b>Εικόνα 1.1:</b> UAV με σταθερά πτερύγια .....	<b>22</b>
<b>Εικόνα 1.2:</b> Ορνιθόπτερα .....	<b>24</b>
<b>Εικόνα 1.3:</b> Μονοκόπτερο .....	<b>24</b>
<b>Εικόνα 1.4:</b> Είδη πολυκοπτέρων σύμφωνα με τον αριθμό ελίκων και τον σχηματισμό τους .....	<b>25</b>
<b>Εικόνα 1.5:</b> UAV Τύπου μικρού αερόστατου στην υπηρεσία της αστυνομίας .....	<b>27</b>
<b>Εικόνα 1.6:</b> Υβριδικό UAV .....	<b>27</b>
<b>Εικόνα 1.7:</b> Κατηγοριοποίηση των UAVs σύμφωνα με το υψόμετρο και τη διάρκεια πτήσης .....	<b>29</b>
<b>Εικόνα 1.8:</b> Η ιπτάμενη περιστέρα του Αρχύτα .....	<b>35</b>
<b>Εικόνα 1.9:</b> Ένα διακοσμημένο Ιαπωνικό μπαμπού-κόπτερο .....	<b>35</b>
<b>Εικόνα 1.10:</b> Ένα ουράνιο φανάρι .....	<b>36</b>
<b>Εικόνα 1.11:</b> Ιπτάμενη μηχανή Λεονάρντο Ντα Βίντσι 1843 .....	<b>36</b>
<b>Εικόνα 1.12:</b> Τα μπαλόνια των Αυστριακών .....	<b>37</b>
<b>Εικόνα 1.13:</b> Τα μικρά ελικόπτερα του Ponton d'Amécourt .....	<b>37</b>
<b>Εικόνα 1.14:</b> Η ιδέα του Nikola Tesla .....	<b>38</b>
<b>Εικόνα 1.15:</b> Το Bug Kettering .....	<b>38</b>
<b>Εικόνα 1.16:</b> Το Predator εν δράση .....	<b>40</b>
<b>Εικόνα 1.17:</b> Ένα μικροσκοπικό στρατιωτικό UAV .....	<b>42</b>
<b>Εικόνα 1.18:</b> Hawk 30-Solara 50, UAVs τροφοδοτούμενα με ηλιακή ενέργεια ....	<b>46</b>
<b>Εικόνα 1.19:</b> Σχηματικό διάγραμμα των στοιχείων του συστήματος προώθησης ενός UAV .....	<b>47</b>
<b>Εικόνα 2.1:</b> UAV επικοινωνιαστής .....	<b>56</b>
<b>Εικόνα 2.2:</b> Σενάριο ελέγχου πλήθους με UAV .....	<b>62</b>
<b>Εικόνα 2.3:</b> Εφαρμογές UAVs σε έξυπνη πόλη .....	<b>67</b>
<b>Εικόνα 2.4:</b> Τρεις τυπικές περιπτώσεις ασύρματων επικοινωνιών υποβοηθούμενων από UAVs .....	<b>71</b>
<b>Εικόνα 2.5:</b> Τρισδιάστατες κινούμενες παραστάσεις με UAVs .....	<b>73</b>
<b>Εικόνα 3.1:</b> MANET, VANET και FANET .....	<b>75</b>
<b>Εικόνα 3.2:</b> Αρχιτεκτονική επικοινωνίας .....	<b>82</b>
<b>Εικόνα 3.3:</b> Αρχιτεκτονική εφαρμογής .....	<b>86</b>

<b>Εικόνα 3.4:</b> Σχήμα ενός κινούμενου κόμβου, που χρησιμοποιεί το μοντέλο κινητικότητας Random Waypoint .....	<b>90</b>
<b>Εικόνα 3.5:</b> Σχήμα ενός κινούμενου κόμβου, που χρησιμοποιεί το μοντέλο κινητικότητας Random Direction .....	<b>95</b>
<b>Εικόνα 3.6:</b> Σχήμα ενός κινούμενου κόμβου, που χρησιμοποιεί το μοντέλο κινητικότητας Gauss-Markov .....	<b>92</b>
<b>Εικόνα 3.7:</b> Σχήμα ενός κινούμενου κόμβου, που χρησιμοποιεί το μοντέλο κινητικότητας Smooth-Turn .....	<b>93</b>
<b>Εικόνα 3.8:</b> Ένα παράδειγμα σχήματος διαδρομής, που εκτελείται από έναν κόμβο με το μοντέλο κινητικότητας SRCM .....	<b>94</b>
<b>Εικόνα 3.9:</b> Όλα τα σχήματα διαδρομών που προσδιορίζονται από το μοντέλο κινητικότητας PPRZM Way-Point, (b) Eight, (c) Stay-At, (d) Scan, and (e) Oval .....	<b>95</b>
<b>Εικόνα 3.10:</b> Παράδειγμα κίνησης ενός βήματος με CLMN, στο οποίο ένα σύνολο τριών σημείων αναφοράς καθορίζονται σε μια γραμμή, που κινείται για $\pi$ και στρέφεται για $\theta$ .....	<b>96</b>
<b>Εικόνα 3.11:</b> Σχήμα τριών κινούμενων κόμβων, που χρησιμοποιούν το μοντέλο κινητικότητας CLMN .....	<b>97</b>
<b>Εικόνα 3.12:</b> Παράδειγμα πέντε κινούμενων κόμβων γύρω από ένα κινούμενο σημείο αναφοράς, χρησιμοποιώντας το μοντέλο κινητικότητας NC .....	<b>98</b>
<b>Εικόνα 3.13:</b> Σχήμα τριών κινούμενων κόμβων, που χρησιμοποιούν το μοντέλο κινητικότητας NC .....	<b>98</b>
<b>Εικόνα 3.14:</b> Παράδειγμα κίνησης ενός βήματος με το PRS, όπου πέντε κιν- ούμενοι κόμβοι ακολουθούν τον κινούμενο μαύρο επιδιωκόμενο στόχο ...	<b>99</b>
<b>Εικόνα 4.1:</b> Τεχνικές δρομολόγησης FANETs .....	<b>105</b>
<b>Εικόνα 4.2:</b> Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs	<b>108</b>
<b>Εικόνα 4.3:</b> Παράδειγμα Αρχιτεκτονική δρομολόγησης GCS .....	<b>112</b>
<b>Εικόνα 4.4:</b> Παραδειγματική συμπεριφορά του Αλγορίθμου Hybrid Routing	<b>120</b>
<b>Εικόνα 4.5:</b> Λειτουργίες πρωτοκόλλου MPGR .....	<b>128</b>
<b>Εικόνα 4.6:</b> Αποφυγή Routing Void χρησιμοποιώντας προώθηση Two-Hop Perimeter .....	<b>130</b>
<b>Εικόνα 4.7:</b> Reactive-Greedy-Reactive (RGR) διαδικασία δρομολόγησης .	<b>140</b>



## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

**Πίνακας 1.1 :** Διαχωρισμός των UAVs σε υποκατηγορίες ανάλογα με τη μάζα, το υψόμετρο και τη διάρκεια πτήσης, καθώς και το φορτίο τους ..... **28**

**Πίνακας 1.2 :** Σύγκριση αυτόνομων UAVs σε σχέση με τα σμήνη ..... **31**

**Πίνακας 4.1:** Σύγκριση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs ..... **144**

## ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

**ABC** Artificial Bee Colony

**ACO** Ant Colony Optimization

**AIST** Advanced Industrial Science and Technology

**BLR** BeaconLess Routing

**BR-AODV** Boids of Reynolds-AODV

**CH** Cluster Head

**Column** CLMN

**DPR** Distributed Pheromone Repel

**DTN** Delay Tolerant Networking

**DTS** Dictionary Trie Structure

**EALC** Energy Aware Link-based Clustering

**EGNOS** European Geostationary Navigation Overlay Service

**ETED** Estimated Time Enroute to Destination

**FAA** Federal Aviation Administration

**FANETs** Flying Ad hoc NETworks

**GCS** Ground Control Station

**GCS** Ground Control System

**GGF** Greedy Geographic Forwarding

**GHSC-PSM** Global Health Supply Chain Program-Procurement Supply  
Management

**GLONASS** Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya

**GM** Gauss-Markov

**GNSS** Global Navigation Satellite System

**GPS** Global Positioning System

**GPSR** Greedy Perimeter Stateless Routing

**HALE** High Altitude, Long Endurance

**HIV** Human Immunodeficiency Virus

**HRA** Hybrid Routing Algorithm

**IMU** Inertial Measurement Unit

**ISR** Intelligence, Surveillance, Reconnaissance

**ITU** International Telecommunications Union

**LALE** Low Altitude, Long Endurance

**LAROD** Location Aware Routing for Opportunistic Delay Tolerant Networks

**LASE** Low Altitude, Short Endurance

**LET** Link Expiration Time

**LiDAR** Light Detection And Ranging

**LoS** Line of Sight

**MALE** Medium Altitude, Long Endurance

**MANET** Mobile Ad hoc NETwork

**MAV** Micro-UAV

**MITM** Man-In-The-middle

**MPCA** Mobility Prediction Clustering Algorithm

**MPGR** Mobility Prediction-based Geographic Routing

**MPR** Multi Point Relay

**NAV** Nano-UAV

**NC** Nomadic Community

**PA** Precision Agriculture

**PPRZM** Paparazzi

**PRS** Pursue

**PSO** Particle Swarm Optimization

**QoS** Quality of Service

**RD** Random Direction

**RERR** Route Error

**RGB** Red Green Blue

**RGR** Reactive-Greedy-Reactive

**RNH** Reliable Next Hop

**ROA** Remotely Operated Aircraft

**RPAS** Remotely Piloted Aircraft System

**RPV** Remotely Piloted Vehicle

**RREP** Route Reply

**RREQ** Route Request

**RWP** Random Waypoint

**SAR** Search And Rescue

**SAR** Synthetic Aperture Radar

**SBAS** Satellite-Based Augmentation Systems

**SDN** Software-Defined Networking

**SDPC** Self Deployable Point Coverage

**SRCM** Semi-random Circular Movement

**SSWM** Site-Specific Weed Management

**ST** Smooth-Turn

**SUAP** Secure UAV Ad hoc routing Protocol

**SWAP** Size, Weight And Power

**TTL** Time To Live

**UAS** Unmanned Aerial System

**UAVs** Unmanned Aerial Vehicles

**UCAV** Unmanned Aerial Combat Vehicle

**UNICEF** United Nations Children's Fund

**VANET** Vehicular Ad Hoc NETwork

**VTOL** Vertical Take-Off and Landing

**WAAS** Wide Area Augmentation System

**MEMA** Μη Επανδρωμένα Μαχητικά Αεροσκάφη

**ΣμηΕΑ** Σύστημα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών

**ΤΠΕ** Τεχνολογίες Πληροφορικής και Επικοινωνιών

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### 1.1 Τι είναι τα Μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα-UAVs

Τα UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) - Μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα-αεροσκάφη είναι ιπτάμενες μηχανές (μηχανοκίνητα οχήματα), που μετακινούνται χωρίς την παρουσία πιλότου εντός τους. Το ιπτάμενο όχημα είναι δυνατό να ελέγχεται από κάποιον χειριστή, που βρίσκεται στο έδαφος και τότε αποκαλείται ημιαυτόνομο ή να ελέγχεται από ηλεκτρονικά συστήματα και να χαρακτηρίζεται ως αυτόνομο.

Για την αυτόνομη λειτουργία απαιτείται εξειδικευμένο λογισμικό για τον έλεγχο του σχεδίου πτήσης σε συνδυασμό με ηλεκτρονικές διατάξεις, όπως μικροϋπολογιστές, κινητήρες, θερμικές κάμερες, ενσωματωμένους εξελιγμένους αισθητήρες, συσκευές ανίχνευσης, καθώς και GPS-Global Positioning System (Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού Θέσης: είναι ένα σύστημα πλοήγησης στο χώρο, το οποίο ανήκει στην κυβέρνηση των Ηνωμένων Πολιτειών και διαχειρίζεται από την πολεμική αεροπορία των Ηνωμένων Πολιτειών. Το σύστημα αποτελείται από δορυφόρους δέκτες και άλλους σταθμούς και παρέχει ακριβείς πληροφορίες θέσεις και χρόνου για πολιτική και στρατιωτική χρήση [44] ), εξοπλισμό τηλεπικοινωνιών και συλλογής πληροφοριών [1], [2], [3].

Είναι απαραίτητο, ο επί του εδάφους χειριστής να έχει οπτική επαφή με το UAV, ειδικά όταν πετά κοντά σε πόλεις, για λόγους ασφαλείας και αποφυγής ατυχημάτων [1].

Αξιοσημείωτο είναι, ότι ένα UAV έχει την ιδιότητα να αναλώνεται ή να ανακτάται (να επιστρέφει, δηλαδή, χωρίς αλλοιώσεις-φθορές στη βάση του) και μπορεί να μεταφέρει ένα θανατηφόρο ή μη θανατηφόρο ωφέλιμο φορτίο συγκεκριμένου βάρους και όγκου. Συνεπώς, οι πύραυλοι, παρόλο, που είναι μη επανδρωμένοι και καθοδηγούνται από απόσταση, δεν θεωρούνται UAVs, επειδή δεν επαναχρησιμοποιούνται, αφού είναι κατασκευασμένοι για μία και μόνο αποστολή [4].

Ας υπογραμμίσουμε ότι ο όρος UAV αφορά μόνο το χωρίς χειριστή αεροσκάφος. Τα UAVs αποτελούν συστατικό του Συστήματος μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών- ΣμηEA (UAS-Unmanned Aerial System). Ο

όρος UAS υιοθετήθηκε από το Υπουργείο Άμυνας των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής και την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Αεροπορίας (FAA-Federal Aviation Administration) των Ηνωμένων Πολιτειών το 2005. Εκτός του αεροσκάφους, περιλαμβάνει στοιχεία, όπως, σταθμοί ελέγχου εδάφους, συστήματα για την επικοινωνία μεταξύ του ελεγκτή και του αεροσκάφους, συνδέσεις δεδομένων και άλλον εξοπλισμό υποστήριξης. Η έννοια του “συστήματος” υπογραμμίζει αυτήν ακριβώς την άρρηκτη σύνδεση σκάφους-απομακρυσμένου χειριστή, αλλά και την ύπαρξη συνδέσμου επικοινωνίας μεταξύ τους [4].

Τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα συνήθως έχουν τη μορφή μικρού αεροπλάνου ή ελικοπτέρου με έναν ή περισσότερους κινητήρες και έλικες συντονισμένους για πλήρως ελεγχόμενη πτήση από ειδικό πρόγραμμα ή χειριστήριο εδάφους [5].

Συνώνυμοι όροι του UAV είναι Drone (κηφήνας) ή RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) ή RPV (Remotely Piloted Vehicle) ή ROA (Remotely Operated Aircraft) ή ΣμηΕΑ (Συστήματα μη Επανδρωμένων Αεροσκαφών) [18].

## **1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ UAVs**

### **1.2.1 Βασιζόμενη στην αεροδυναμική τους**

#### **1.2.1.1 Με σταθερά-άκαμπτα πτερύγια (fixed-wings)**

Αυτό το είδος των UAVs έχει το γνωστό σχήμα του αεροπλάνου. Οι πτέρυγες του οχήματος είναι σταθερές στον κορμό του, συγκεκριμένης αεροτομής και ως σύνολο δημιουργούν την απαραίτητη άνωση για να απογειωθεί αλλά συμβάλλουν επίσης και στη διατήρηση του ύψους πτήσης του (Εικόνα 1.1).

Λόγω της καμπύλης δομής του φτερού, ο αέρας πάνω και κάτω από αυτό έχει διαφορετική ταχύτητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να δημιουργείται χαμηλή πίεση στο πάνω μέρος του φτερού και το UAV να ανυψώνεται, αφού δημιουργείται άντωση κάνοντας χρήση της εμπρόσθιας ταχύτητας του αέρα. Αυτή η εμπρόσθια ταχύτητα του αέρα οφείλεται στην πρόσθιο ώση, που παράγεται μέσω ενός έλικα, που στρέφεται από μια μηχανή εσωτερικής καύσης ή από ένα ηλεκτρικό κινητήρα.



**Εικόνα 1.1:** UAV με σταθερά πτερύγια [12]

Ο έλεγχος του οχήματος κατά τη διάρκεια της πτήσης προέρχεται από τις επιφάνειες ελέγχου, που είναι ενσωματωμένες στη διάταξη του πτερυγίου και συνήθως αποτελούνται από ένα πηδάλιο κλίσεως αέρα, από έναν εξυψωτήρα και από ένα πηδάλιο τιμόνι. Αυτές οι επιφάνειες επιτρέπουν στο UAV να περιστρέφεται ελεύθερα γύρω από τρεις άξονες, που είναι κάθετοι ο ένας στον άλλο και τέμνονται στο κέντρο βάρους του.

Το κύριο πλεονέκτημα ενός μη επανδρωμένου οχήματος τύπου σταθερής πτέρυγας, είναι ότι αποτελείται από μια σχετικά απλή δομή, που παρέχει μια λιγότερο περίπλοκη διαδικασία συντήρησης και επιδιόρθωσης, επιτρέποντας έτσι στον χρήστη περισσότερο χρόνο λειτουργίας του με χαμηλότερο κόστος. Επίσης, λόγω της κατασκευής του, έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει πιο βαρύ εξοπλισμό/φορτίο και για μεγαλύτερες αποστάσεις· κάτι το οποίο το καθιστά ιδανικό για διανομές πακέτων, ιδίως σε απομακρυσμένα μέρη. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα είναι ότι λόγω της απλής δομής του εξασφαλίζεται πιο αποτελεσματική αεροδυναμική και έτσι προκύπτουν πτήσεις μεγαλύτερης διάρκειας σε υψηλότερες ταχύτητες δίνοντας τη δυνατότητα έρευνας σε μεγαλύτερες περιοχές ανά δεδομένη πτήση. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι μπορεί να πετά με μηδενική κατανάλωση ενέργειας λόγω της φυσικής ιδιότητας, που έχει να γλιστρά στον αέρα.

Τέλος, το σημαντικό μειονέκτημα αυτού του είδους UAV είναι η αδυναμία σταθερής πτήσης πάνω από ένα σημείο – το γνωστό hovering των ελικοπτέρων – το οποίο ωθεί το UAV στην έλλειψη ακρίβειας θέσης, δεδομένου ότι τα μη επανδρωμένα οχήματα τύπου σταθερής πτέρυγας

απαιτούν την ροή αέρα πάνω από τα πτερύγια τους, καθώς και τη συνεχή εμπρόσθια κίνησή τους για την παραγωγή άντωσης, γεγονός, που τα αποτρέπει από το να μπορούν να μείνουν στατικά πάνω από μια περιοχή. Ως εκ τούτου δεν είναι κατάλληλα για στατικές εφαρμογές όπως π.χ. εργασίες παρακολούθησης υποδομών.

Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι για την απογείωση καθώς και την προσγείωσή τους απαιτείται η χρήση ενός εκτοξευτή ή ενός αεροδιαδρόμου προσγείωσης-απογείωσης, όπως επίσης και αρκετό χώρος για την πραγματοποίηση ελιγμών [7], [8], [9], [10].

### **1.2.1.2 Παλλόμενων πτερύγων ή ορνιθόπτερα (flapping-wings)**

Τα UAVs αυτής της κατηγορίας έχουν ελαφριά και ευέλικτα πτερύγια (Εικόνα 1.2), καθώς είναι εμπνευσμένα από την κίνηση των φτερών των πουλιών και των εντόμων. Διαμορφώνονται με βάση τα πραγματικά πτηνά, τόσο σε εμφάνιση, όσο και σε λειτουργία και χρησιμοποιούν σύνθετους αεροδυναμικούς υπολογισμούς για να μιμηθούν την λειτουργία τους.

Θεωρείται ότι τα κινούμενα φτερά μπορούν να εξοικονομήσουν ενέργεια και να κάνουν την απογείωση ευκολότερη σε σύγκριση με τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα σταθερής πτέρυγας. Υποστηρίζουν με ευκολία σταθερές πτήσεις σε καιρικές συνθήκες με ανέμους, σε αντίθεση με τα UAVs σταθερής πτέρυγας. Τα πλεονεκτήματά τους είναι ότι δεν κάνουν θόρυβο σε σχέση με τα UAVs, που χρησιμοποιούν κινητήρα, μπορούν σχεδόν να αιωρηθούν σε σταθερό ύψος και να πραγματοποιούν δύσκολους ελιγμούς. Από την άλλη πλευρά, βέβαια, λόγω της σχεδιαστικής και κατασκευαστικής πολυπλοκότητάς τους, δεν μεταφέρουν φορτίο.

Τα UAVs αυτής της κατηγορίας, συναντώνται και με την ονομασία ορνιθόπτερα και συχνά είναι διακοσμημένα με τέτοιο τρόπο ώστε να μιμούνται τα φυσικά πτηνά μιας περιοχής. Με αυτή την προκάλυψη (καμουφλάζ), οι ερευνητές μπορούν να διεισδύσουν σε πραγματικά σμήνη με σκοπό να μελετήσουν και να παρατηρήσουν τη συμπεριφορά τους. Τέλος, τα ορνιθόπτερα μερικές φορές χρησιμοποιούνται για να μιμούνται πραγματικά γεράκια ή αετούς ώστε να απομακρύνουν τα τρωκτικά από τις καλλιέργειες ή να τα οδηγούν σε παγίδες [7], [8], [10].





Εικόνα 1.2: Ορνιθόπτερα [13], [37]

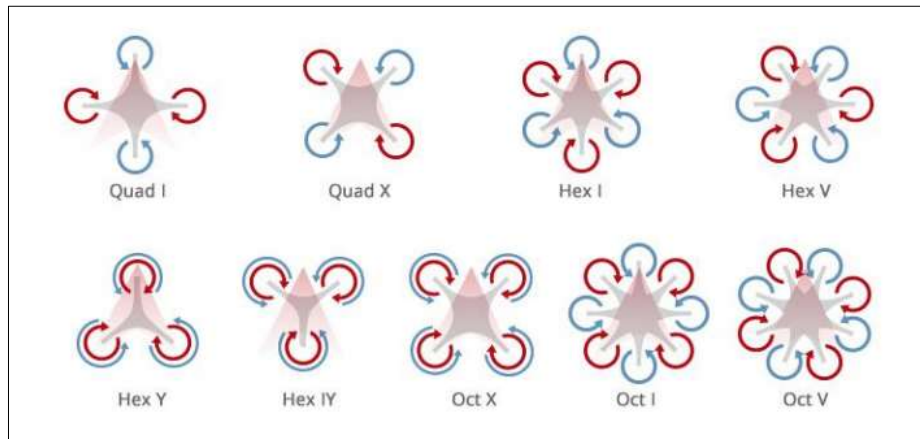
### 1.2.1.3 Με περιστρεφόμενα πτερύγια-πολλαπλούς έλικες ή πολυκόπτερα (multirotor ή multicopter)

Τα UAVs με περιστρεφόμενα πτερύγια (ή πολυκόπτερα) - όπως τα ελικόπτερα - αποτελούνται από 2 ή 3 πτερύγια ανά έλικα, που περιστρέφονται γύρω από έναν σταθερό άξονα (Εικόνα 1.3).



Εικόνα 1.3: Μονοκόπτερο [14]

Αυτή η διάταξη μαζί με τον κινητήρα είναι γνωστή και ως ρότορας (στροφείο). Συνήθως, αποτελούνται από έναν ρότορα (μονοκόπτερο), τρεις ρότορες (τρικόπτερο), τέσσερις ρότορες (τετρακόπτερο), έξι ρότορες (εξακόπτερο), οκτώ ρότορες (οκτακόπτερο) (Εικόνα 1.4). Ωστόσο εμφανίζονται και σε πιο ασυνήθιστες διατάξεις, όπως με δώδεκα και με δεκαέξι ρότορες. Κάθε διάταξη έχει τα δικά της μοναδικά χαρακτηριστικά, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα.



**Εικόνα 1.4:** Είδη πολυκοπτέρων σύμφωνα με τον αριθμό ελίκων και τον σχηματισμό τους [9]

Τα πτερύγια του ρότορα λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο όπως ένα άκαμπτο φτερό, ωστόσο δεν απαιτείται η σταθερή κίνηση προς τα εμπρός προκειμένου να παραχθεί ροή αέρα πάνω από αυτά, αλλά για να παράγουν την απαιτούμενη ροή αέρα ώστε να υπάρξει άντωση του πολυκοπτέρου βρίσκονται σε διαρκή κίνηση. Ο έλεγχος των πολυκοπτέρων προέρχεται από τη μεταβολή της ώσης και της ροπής των ροτόρων. Για παράδειγμα, ένα τετρακόπτερο, προκειμένου να πάρει μια καθοδική κλίση, οι ρότορες, που βρίσκονται στο πίσω μέρος του πρέπει να παράγουν περισσότερη άντωση από τους ρότορες, που βρίσκονται στο μπροστινό μέρος του, με αποτέλεσμα το πίσω μέρος του τετρακοπτέρου να ανέβει ψηλότερα από το εμπρόσθιο. Η κίνηση της εκτροπής χρησιμοποιεί τη δύναμη ροπής του ρότορα. Έτσι οι διαγώνιοι ρότορες είτε περιστρέφονται περισσότερο ή λιγότερο από τους αντιδιαγώνιους ροτόρες τους, δημιουργώντας, έτσι, μια ανισοροπία στον άξονα εκτροπής, προκαλώντας την περιστροφή του τετρακοπτέρου στον κάθετο άξονα. Μοναδική εξαίρεση στον τρόπο κίνησης των πολυκοπτέρων αποτελούν τα τρικόπτερα, καθώς ο ρότορας στο πίσω μέρος τους χρειάζεται ένα σερβομηχανισμό προκειμένου να είναι σε θέση να κατευθύνει την ώση που παράγει και να υπάρξει κίνησή του στον κατάκορφο άξονα.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των πολυκοπτέρων, είναι η ικανότητά τους να απογειώνονται και να προσγειώνονται κάθετα. Αυτό επιτρέπει την χρήση τους ακόμη και σε περιοχές με περιορισμένο χώρο καθώς δεν απαιτείται περιοχή προσγείωσης/απογείωσης. Η ικανότητά τους να αιωρούνται (σταθερή πτήση

πάνω από ένα σημείο-hovering) και να εκτελούν ευέλικτους ελιγμούς, καθιστά τα UAVs αυτής της κατηγορίας κατάλληλα για εφαρμογές όπως, παρακολούθηση περιοχής περιορισμένου εύρους, χαρτογράφηση, κινηματογραφική φωτογράφιση και βιντεοσκόπηση τοπίων, όπου απαιτούνται χειρισμοί ακριβείας καθώς και διατήρηση οπτικής επαφής με στόχους για παρατεταμένες χρονικές περιόδους. Επίσης, τα πολυκόπτερα είναι αποτελεσματικά σε δύσβατες περιοχές όπου δε μπορούν να επιχειρήσουν άλλα εναέρια μέσα.

Από την άλλη μεριά, τα πολυκόπτερα έχουν αυξημένη μηχανική και ηλεκτρονική πολυπλοκότητα, με αποτέλεσμα να απαιτούν πολυπλοκότερες διαδικασίες συντήρησης. Αυτό με τη σειρά του οδηγεί σε μείωση του χρόνου λειτουργίας τους, και συνεπώς, σε αύξηση του λειτουργικού τους κόστους. Λόγω της μικρότερης ταχύτητάς τους και των συντομότερων πτήσεων, απαιτούνται πολλές επιπλέον πτήσεις για τη διερεύνηση μεγάλων περιοχών, γεγονός που στοιχίζει τόσο σε χρόνο όσο και σε λειτουργικά έξοδα [11], [10], [7], [3].

#### **1.2.1.4 Τύπου μικρού αερόστατου (blimps)**

Είναι χαρακτηρισικά για τη μορφή και το μεγάλο μέγεθος τους. Πρέπει να είναι ελαφρύτερα από τον αέρα και είναι γεμισμένα με αέρια, όπως ήλιο ή υδρογόνο για να ανυψώνονται σαν μπαλόνια. Επιτυγχάνουν πτήσεις μεγάλης διάρκειας, αλλά χαμηλής ταχύτητας. Διαθέτουν πολύ καλή αντοχή των υλικών τους. Επιτρέπουν την κάθετη απογείωση και έχουν την ικανότητα μεταφοράς μεγάλου φορτίου (Εικόνα 1.5) [8]. Είναι σχεδιασμένα για διάφορες εφαρμογές όπως εμπορικές, εναέρια έρευνα/τοπογράφηση, για διαφημιστικές εφαρμογές και για τις ανάγκες της επιβολής του νόμου στην υπηρεσία επιχειρήσεων των αστυνομικών αρχών. Έχουν τη δυνατότητα να υποστηρίζουν ακόμη και προσπάθειες διάσωσης σε οποιαδήποτε περιοχή. Για να υποστηρίξουν τις παραπάνω εφαρμογές φέρουν κάμερες υψηλής ευκρίνειας [16], [17].



**Εικόνα 1.5:** UAV Τύπου μικρού αερόστατου στην υπηρεσία της αστυνομίας [17]

#### **1.2.1.5 Υβριδικά ή κεκλιμένου στροφείου (hybrid or tiltrotor)**

Τα υβριδικά UAVs (Εικόνα 1.6) συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά της πρώτης και της τρίτης κατηγορίας. Μπορούν να απογειώνονται και να προσγειώνονται κάθετα σαν ελικόπτερο και να πετούν σαν κανονικό αεροπλάνο. Τα φτερά τους, σε κάποια από αυτά, μπορούν να κλείσουν ή να ανοίξουν πλήρως, για μεγαλύτερη σταθερότητα σε κατάσταση κάθετης απογείωσης/προσγείωσης ή να παρέχουν μεγαλύτερη ανύψωση σε κανονική πτήση.



**Εικόνα 1.6:** Υβριδικό UAV [20]

Κατά τα τελευταία χρόνια, τα υβριδικά UAVs έχουν προσελκύσει έντονο ενδιαφέρον, καθώς παρέχουν μεγαλύτερη ευελιξία σε ό,τι αφορά στο περιβάλλον λειτουργίας τους. Η δυνατότητα κάθετης απογείωσης/προσγείωσης ελαχιστοποιεί την ανάγκη για εκτεταμένες

εγκαταστάσεις απογείωσης και προσγείωσης, ενώ έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιούν αποστολές μακράς εμβέλειας και μεγάλης διάρκειας [19].

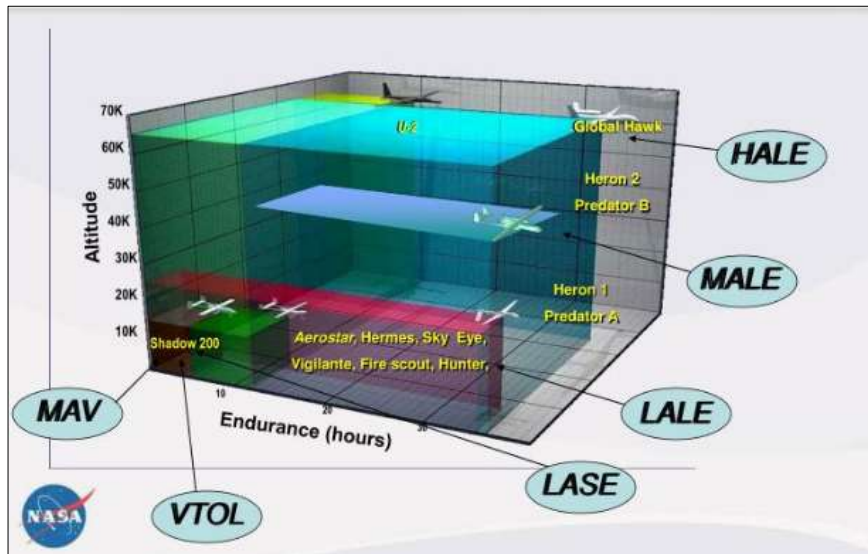
### 1.2.2 Βασιζόμενη στο βάρος τους και την εμβέλεια πτήσης

Τα UAVs κατηγοριοποιούνται, σύμφωνα με τον Πίνακα 1, ανάλογα με το βάρος τους, το υψόμετρο και τη διάρκεια πτήσης, καθώς και το φορτίο τους [6], [22].

Category	NASA UAS Class	Weight (in kg)	Normal Operating Altitude (in m)	Mission Radius, Range (in Km)	Typical Endurance (in hrs)	Payload (in kg)
Micro		<2	<140	5	<1	<1
Mini	sUAS Class I	2–25	<1000	25	2–8	<10
Small		25–150	<1700	50	4–12	<50
Medium	Class II	150–600	<3300	200–500	8–20	<200
Large/Tactical	Class III	>600	>3300	>1000	>20	>200

**Πίνακας 1.1 :** Διαχωρισμός των UAVs σε υποκατηγορίες ανάλογα με τη μάζα, το υψόμετρο και τη διάρκεια πτήσης, καθώς και το φορτίο τους [6], [22]

Στο [23] αναφέρεται μια ειδικότερη κατηγοριοποίηση με ιδιαίτερη ονομασία των UAVs, βασισμένη μόνο στο υψόμετρο και τη διάρκεια πτήσης (Εικόνα 1.7).



Εικόνα 1.7: Κατηγοριοποίηση των UAVs σύμφωνα με το υψόμετρο και τη διάρκεια πτήσης [23]

- ✓ **MAV/ NAV** (Micro-UAV/ Nano-UAV)  
Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται μικροσκοπικές συσκευές, που αναπτύσσονται για κατασκοπικούς σκοπούς από τις Αμερικανικές στρατιωτικές δυνάμεις. Το υψόμετρο, που μπορούν να φτάσουν είναι μόλις τα 300 μέτρα και η διάρκεια πτήσης από 5 έως 30 λεπτά.
- ✓ **VTOL** (Vertical Take-Off and Landing – Κάθετης απογείωσης και προσγείωσης)  
Τα VTOL UAVs έχουν το πλεονέκτημα της αιώρησης αλλά και της πραγματοποίησης ελιγμών. Δεν χρειάζονται έναν αεροδιάδρομο για προσγείωση ή απογείωση και για αυτό το λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε απομακρυσμένες περιοχές για διαχείριση καταστροφικών συμβάντων.
- ✓ **LASE** (Low Altitude, Short Endurance – Χαμηλού υψομέτρου, Μικρής αντοχής)  
Σε αυτή την κατηγορία μπορούμε να έχουμε πτήσεις σε υψόμετρο έως 450 μέτρα και διάρκειας 45 λεπτών έως 2 ωρών. Τα χαρακτηριστικά της κατηγορίας είναι ότι δεν είναι και τόσο σταθερή σε καιρικές συνθήκες με ανέμους, το φορτίο των αισθητήρων είναι περιορισμένο, αφού το σύστημα έχει τη δυνατότητα να συγκεντρώνει και να αποθηκεύει όλα τα

δεδομένα σε SD κάρτα, η μικρή αντοχή της πτήσης, το σχετικά μικρό βάρος του UAV. Συνεπώς, αυτή η κατηγορία δεν είναι πρακτική σε παροχή υπηρεσιών σε καταστάσεις πυρκαγιών.

- ✓ **LALE** (Low Altitude, Long Endurance - Χαμηλού υψομέτρου, Μεγάλης αντοχής)

Τα LALE UAVs μπορούν να φτάσουν μέχρι υψόμετρο 5.000 μέτρων και να πετούν για εκτεταμένες περιόδους 20 και περισσότερων ωρών. Παρόλο που και αυτή η κατηγορία έχει περιορισμούς, όπως αδύναμη σύνδεση επικοινωνίας δεδομένων, έχει και πλεονεκτήματα. Είναι μεγάλης αντοχής. Μπορεί να συλλέξει και να παρέχει γεωγραφικό χρώμα, ασπρόμαυρες εικόνες και videos. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για επιτήρηση πυρκαγιών.

- ✓ **MALE** (Medium Altitude, Long Endurance – Μεσαίου υψομέτρου, Μεγάλης αντοχής)

Αυτή η κατηγορία απευθύνεται κατά κύριο λόγο σε στρατιωτικές εφαρμογές. Τα UAVs αυτής της κατηγορίας είναι πολύ μεγαλύτερα σε μέγεθος από τις προηγούμενες κατηγορίες. Έχουν πιο ανεπτυγμένη αεροδυναμική σχεδίαση και συστήματα ελέγχου, λόγω των υψηλών λειτουργικών απαιτήσεων. Μπορούν να λειτουργούν σε υψόμετρο πάνω από 9.000 μέτρα. Οι αποστολές διαρκούν πολλές ώρες, από 20 μέχρι 40. Μπορούν να μεταφέρουν ποικιλία εξεζητημένων αισθητήρων όπως ηλεκτρο-οπτικών (EO), υπέρυθρων και ραντάρ συνθετικού διαφράγματος (SAR - Synthetic-aperture radar). Είναι ιδανικά για απεικόνιση ενός ευρέος φάσματος σεναρίων καταστροφών και για χαρτογράφηση.

- ✓ **HALE** (High Altitude, Long Endurance - Υψηλού υψομέτρου, Μεγάλης αντοχής)

Τα HALE UAVs είναι μεγάλα και περίπλοκα, είναι ικανά να λειτουργούν σαν χαμηλής τροχιάς δορυφόροι. Παραμένουν στον αέρα σε υψόμετρο πάνω από 14.000 μέτρα για μέρες, εβδομάδες, ακόμη και μήνες. Οτιδήποτε κινείται ανάμεσα σε υψόμετρο από 12.000-25.000 μέτρα,

ανήκει στην περιοχή της στρατόσφαιρας. Το πλεονέκτημα με την περιοχή της στρατόσφαιρας είναι ότι ένα αεροσκάφος, που κυκλοφορεί σε υψόμετρο πάνω από 14.000 μέτρα δεν περιορίζεται στις κινήσεις του, αφού στην πραγματικότητα δεν υπάρχει εναέρια κυκλοφορία, κάτι το οποίο επιτρέπει πιο αποτελεσματικό σχεδιασμό της αποστολής. Τα UAVs αυτής της κατηγορίας μπορούν να επιτηρούν οποιαδήποτε περιοχή για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Ο ρόλος αυτών είναι κυρίως επιστημονικός με σκοπό τη συλλογή πληροφοριών σε παγκόσμιες κλίμακες (π.χ. για να αξιολογηθεί η κλιματική αλλαγή σε μεγάλες περιοχές του πλανήτη) [21], [2].

### 1.2.3 Κατηγοριοποίηση βασιζόμενη στο σχηματισμό/διάταξη/λειτουργία τους: μεμονωμένα UAVs ή σμήνη από UAVs

Επιπλέον, μπορούμε να ορίσουμε δύο κύριες κατηγορίες συστημάτων UAVs. Τα μεμονωμένα συστήματα UAVs και τα σμήνη από UAVs ή Flying Ad hoc NETWORKS (FANETs), το καθένα με τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα [25].

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΣΜΗΝΗ		
FEATURE	SINGLE UAV SYSTEM	MULTI UAV SYSTEM
Impact of failure	High, mission fails	Low, system reconfigures
Scalability	Limited	High
Survivability	Poor	High
Speed of mission	Slow	Fast
Cost	Medium	Low
Bandwidth required	High	Medium
Antenna	Omni-directional	Directional
Complexity of control	Low	High
Failure to coordinate	Low	Present

**Πίνακας 1.2 :** Σύγκριση αυτόνομων UAVs σε σχέση με τα σμήνη [25]

Τα UAVs μπορούν να λειτουργούν με διαφορετικούς βαθμούς αυτονομίας, είτε ελεγχόμενα απομακρυσμένα από έναν χειριστή, που βρίσκεται στο σταθμό εδάφους, είτε μέσω ενός πλήρως αυτόνομου ενσωματωμένου υπολογιστή στο UAV. Για δεκαετίες τα συστήματα ενός μεμονωμένου UAV έχουν χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσουν αποστολές. Τέτοια συστήματα



αποτελούνται από ένα μόνο μεγάλο UAV, που επικοινωνεί απευθείας με την υποδομή του σταθμού ελέγχου εδάφους. Για να συνδεθεί το UAV με τον ελεγκτή εδάφους χρειάζεται να είναι εξοπλισμένο με περίπλοκα συστήματα υλικού. Μία αποτυχία του UAV μπορεί να εξαναγκάσει τερματισμό της αποστολής [26].

Ένα σύστημα πολλαπλών UAVs έχει περισσότερα πλεονεκτήματα από ένα σύστημα ενός μεμονωμένου UAV [27]:

- ✓ *Αποδοτικότητα*: Πολλαπλά UAVs διασυνδέονται ασύρματα με έναν αυτόνομο τρόπο και συνεργάζονται για να βελτιώσουν τη συνδεσιμότητα του δικτύου, που μειώνει το χρόνο ολοκλήρωσης της αποστολής σε σχέση με τη χρήση ενός μόνο UAV.
- ✓ *Κλιμακωσιμότητα*: Τα συστήματα πολλαπλών UAVs μπορούν εύκολα να επεκτείνουν τη λειτουργική κλιμακωσιμότητα και να έχουν έτσι μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα.
- ✓ *Ικανότητα επιβίωσης*: Σε ένα σύστημα ενός μεμονωμένου UAV, εάν το UAV αποτύχει, η αποστολή δεν θα ολοκληρωθεί. Σε ένα σμήνος από UAVs, εάν ένα UAV αποτύχει, το σύστημα δεν καταρρέει και η αποστολή μπορεί να επιτευχθεί με τα εναπομείναντα UAVs.
- ✓ *Ακρίβεια*: Ένα σύστημα σμήνους από UAVs παράγει μια πολύ μικρή διατομή ραδιοεντοπιστή (radar cross section) η οποία είναι πολύ κρίσιμη για στρατιωτικές εφαρμογές.

Η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί ένα σμήνος από UAVs, που πρέπει να συνεργαστούν μεταξύ τους για τη διεκπεραίωση μιας εργασίας, εισάγει σημαντικά θέματα επικοινωνίας και ποιότητας υπηρεσίας. Τα UAVs χρειάζεται να μεταδίδουν μηνύματα μεταξύ τους και προς τον σταθμό βάσης. Λόγω των υψηλών επιπέδων κινητικότητας των UAVs, για να είναι εφικτή η παραπάνω συνεργασία, εισάγεται η έννοια της δρομολόγησης [28]. Τα πρωτόκολλα

δρομολόγησης, που αναπτύσσονται πρέπει να φροντίζουν θέματα όπως η αλλαγή της τοπολογίας, η κινητικότητα και οι περιορισμοί της ισχύος [25].

#### **1.2.4 Κατηγοριοποίηση βασιζόμενη στη χρήση τους**

Ένας άλλος τρόπος κατηγοριοποίησης των UAVs είναι με βάση τη χρήση τους, σε πολιτικά ή στρατιωτικά [53]. Οι χρήσεις των πολιτικών UAVs ταξινομούνται σε δύο περαιτέρω βασικές κατηγορίες : την ερασιτεχνική και την επαγγελματική χρήση. Για ερασιτεχνική χρήση προορίζονται τα λεγόμενα UAVs αναψυχής, που κυκλοφορούν στο λιανικό εμπόριο σε σχετικά χαμηλές τιμές. Οι επαγγελματικές χρήσεις των UAVs είναι πολλές και μπορούν να χωριστούν στις εμπορικές και τις χρήσεις δημοσίου συμφέροντος. Η πιο συνήθης εμπορική χρήση είναι εκείνη από φωτογράφους, βιντεογράφους και κινηματογραφιστές για εναέριες λήψεις. Άλλες εμπορικές χρήσεις είναι ο ψεκασμός και η παρακολούθηση καλλιεργειών, η χαρτογράφηση και η αγρονομία, καθώς και η από αέρος επιθεώρηση αγωγών και δικτύων. Στις χρήσεις δημόσιου συμφέροντος συγκαταλέγονται οι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης, πυροπροστασίας και επιτήρησης χερσαίων και θαλάσσιων συνόρων, καθώς και η επιστημονική έρευνα της ατμόσφαιρας και των μετεωρολογικών φαινομένων.

Τα στρατιωτικά UAVs έχουν δύο βασικές χρήσεις. Η δημοφιλέστερη είναι η χρήση για πληροφόρηση, επιτήρηση και ανίχνευση ή αναγνώριση (Intelligence, Surveillance, Reconnaissance – ISR), τόσο σε καιρό ειρήνης όσο και σε καιρό πολέμου, για τακτικούς, αλλά και για στρατηγικούς σκοπούς. Η άλλη περίπτωση είναι ο οπλισμός των UAVs και η αξιοποίησή τους για την εκτέλεση στρατιωτικών χτυπημάτων. Στην περίπτωση αυτή αναφερόμαστε συχνά σε μη επανδρωμένα μαχητικά αεροσκάφη (μΕΜΑ) (Unmanned Aerial Combat Vehicle – UCAV).

### **1.3 Ιστορική αναδρομή**

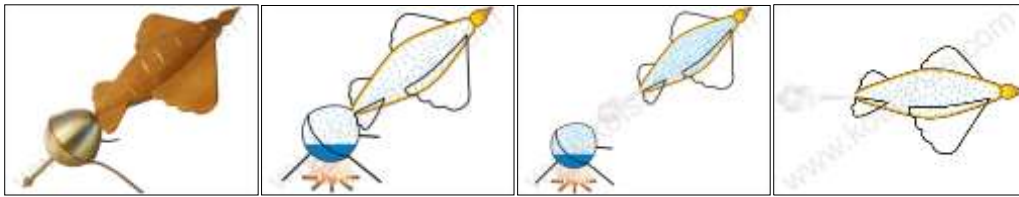
Ιπτάμενη περιστερά ονομάστηκε η πρώτη αυτόνομη ιπτάμενη μηχανή της ανθρωπότητας ή πετομηχανή. Κατασκευάστηκε, πολύ πιθανόν το 405 π.Χ., από τον Αρχύτα.

Ο Αρχύτας καταγόταν από τον Τάραντα, μια αρχαία ελληνική αποικία στη Σικελία, ήταν γιος του Μνησαγόρα (ή Εστιαίου) και έδρασε ανάμεσα στο 428 και 347 π.Χ., χωρίς να γνωρίζουμε με σαφήνεια το έτος γέννησης ή του θανάτου του. Επρόκειτο για ισχυρή και έντονα πνευματική προσωπικότητα, φίλος του Πλάτωνα και οπαδός του Πυθαγόρα. Επιγραμματικά στοιχεία για αυτόν διασώζει ο Διογένης Λαέρτιος. Είναι γνωστός ως φιλόσοφος (πυθαγόρειος), ως μηχανικός και ίσως ως ο σημαντικότερος μελετητής της ακουστικής. Για τη ζωή του και τα συγγράμματά του έγραψαν γραμματείς ο Αριστοτέλης και ο Αριστόξενος. Ο Πλάτων χρησιμοποίησε τις εργασίες του στα μαθηματικά [30].

Ήταν ο πρώτος, που εφάρμοσε μαθηματικές αρχές στη μηχανική, και ο πρώτος που χρησιμοποίησε την αρχή της δράσης-αντίδρασης πάνω στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των πυραύλων και των αεριωθούμενων αεροπλάνων. Σύμφωνα με μαρτυρία του Φαβωρίνου, ιστορικού των αρχαίων παραδόσεων και του Ρωμαίου Αύλου Γέλλιου (Aulus Gellius) - που μεταφέρει τις απόψεις του Πλίνιου του Πρεσβύτερου από το βιβλίο του "Φυσική Ιστορία" - ο Αρχύτας επινόησε και κατασκεύασε ένα αεριοπρωθούμενο περιστέρι, που λέγονταν «πετομηχανή» ή «περιστερά» [31].

Η ιπτάμενη περιστερά (Εικόνα 1.8) ήταν μία μικρή συσκευή σε σχήμα αεροπλάνου, που λειτουργούσε με σύστημα αεροπρώθησης. Φτιαγμένη ως κέλυφος είχε στο εσωτερικό της μία κύστη ζώου σαν μπαλόνι. Η κύστη κατέληγε στο άκρο της περιστεράς, όπου συνδεόταν με αεραντλία ή λέβητα μέσω ανοίγματος. Κάθε φορά, που η πίεση του αέρα περνούσε από αυτό το άνοιγμα, η περιστερά εκτοξευόταν λόγω του πεπιεσμένου αέρα, που έβγαινε από πίσω με ορμή. Ουσιαστικά, λειτουργούσε σαν αεριωθούμενο αεροπλάνο βάσει της αρχής δράσης-αντίδρασης. Η ιπτάμενη περιστερά του Αρχύτα λειτούργησε από την πρώτη της πτήση, καλύπτοντας απόσταση 200 μέτρων και έπεσε αφού είχε εξαντλήσει όλη της την ενέργεια. (Το αεροπλάνο των Ράιτ πέταξε 37 μέτρα στην πρώτη του πτήση, πολλούς αιώνες αργότερα, τον Δεκέμβριο του 1903.) Το γεγονός περιγράφει ο Ρωμαίος συγγραφέας Αύλος Γέλλιος στο έργο του «Αττικές Νύκτες». Την αρχαία εφεύρεση ερεύνησε σε βάθος ο Έλληνας μαθηματικός Ευάγγελος Σταμάτης. Σύμφωνα με τις μελέτες

του, η ιπτάμενη περιστέρα φανερώνει τις προηγμένες γνώσεις αεροδυναμικής, που διέθετε ο Αρχύτας [32].



**Εικόνα 1.8:** Η ιπτάμενη περιστέρα του Αρχύτα

Κατά την ίδια χρονική περίοδο, το 400 π.Χ., στην Κίνα, μηχανικοί συνέλαβαν την ιδέα της κάθετης πτήσης με τη χρήση στροφείου (ρότορα) με τη μορφή του μπαμπου-κόπτερου, ενός αρχαίου Κινέζικου παιχνιδιού. Το μπαμπου-κόπτερο περιστρέφεται μέσω της στροφής ενός ραβδιού, που είναι συνδεδεμένο με ένα στροφείο. Η περιστροφή προκαλεί άνωση, και το παιχνίδι πετά όταν αφήνεται (Εικόνα 1.9) [33],[34].



**Εικόνα 1.9:** Ένα διακοσμημένο Ιαπωνικό μπαμπου-κόπτερο [34]

Με το πέρασμα των χρόνων, οι Κινέζοι πειραματίστηκαν και με άλλα είδη ιπτάμενων μηχανών. Αργότερα, περίπου το 200 μ.Χ., χρησιμοποίησαν χάρτινα μπαλόνια (ουράνια φανάρια), εξοπλισμένα με λάμπες λαδιού για να θερμαίνουν τον αέρα. Οι Κινέζοι είχαν κατανοήσει πως ο θερμός αέρας ανυψώνεται και εφάρμοσαν αυτή την αρχή. Τα ουράνια φανάρια ρίπτονταν αρχικά για λόγους ψυχαγωγίας ή κατά τη διάρκεια γιορτών. Στη συνέχεια, τα πετούσαν κατά των εχθρών τους τη νύχτα, κάτι το οποίο προκαλούσε φόβο και τρόμο μεταξύ των στρατιωτών του εχθρικού στρατοπέδου, αφού πίστευαν ότι πρόκειται για κάποιου είδους θεϊκής δύναμης, που στρέφονταν εναντίον τους [29], [34].



**Εικόνα 1.10:** Ένα ουράνιο φανάρι [34]

Αρκετούς αιώνες μετά, Το 1483, ο Λεονάρντο Ντα Βίντσι, σχεδίασε μια μηχανή με δυνατότητα κάθετης προσγείωσης, που ονομάστηκε αερική βίδα ή γυροσκόπιο (Εικόνα 1.11), που θεωρείται από τους επιστήμονες ως πρόδρομος του σημερινού ελικοπτέρου. Αποτελούνταν από μια ελικοειδή επιφάνεια φτιαγμένη από σιδερένιο σύρμα και λινό και είχε διάμετρο 5 μέτρα [33], [36].



**Εικόνα 1.11:** Ιπτάμενη μηχανή Λεονάρντο Ντα Βίντσι 1843 [36]

Το 1840, ο Horatio Phillips σχεδίασε μια μηχανή με δυνατότητα διαδρομών κάθετης πτήσης. Περιείχε ένα μικροσκοπικό λέβητα για την παραγωγή ατμού [36].

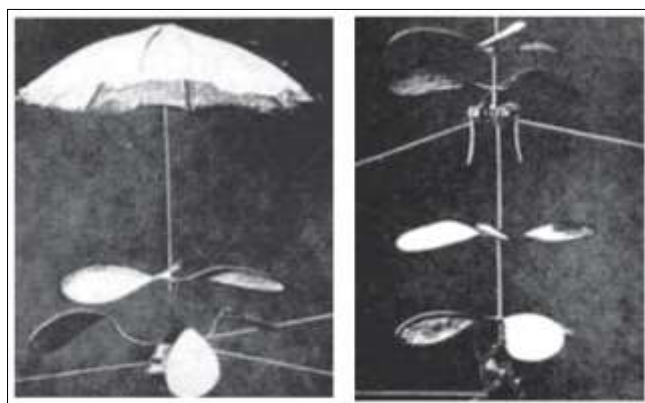
Η ιδέα των UAVs εφαρμόστηκε και το 1849, όταν η Αυστρία επιτέθηκε στη Βενετία χρησιμοποιώντας μπαλόνια εξοπλισμένα με εκρηκτικά και μηχανισμό χρονομέτρησης (Εικόνα 1.12). Οι Αυστριακές δυνάμεις, που πολιορκούσαν τη Βενετία, εκτόξευσαν περίπου διακόσια μπαλόνια πάνω από την πόλη, καθένα από τα οποία, μετέφερε 11-14 κιλά εκρηκτικών. Τα εκρηκτικά έπεφταν από τα μπαλόνια καταστρέφοντας την πόλη. Ευτυχώς για τους Βενετούς, τα

εκρηκτικά ενός μόνο μπαλονιού βρήκαν το στόχο τους, λόγω μιας ξαφνικής αλλαγής της κατεύθυνσης του αέρα [35], [36].



**Εικόνα 1.12:** Τα μπαλόνια των Αυστριακών [35]

Το 1860 ο Ponton d'Amécourt δημιούργησε μοντέλα μικρών ελικοπτέρων (Εικόνα 1.13), που πέταξαν με τη δύναμη του ατμού [36].

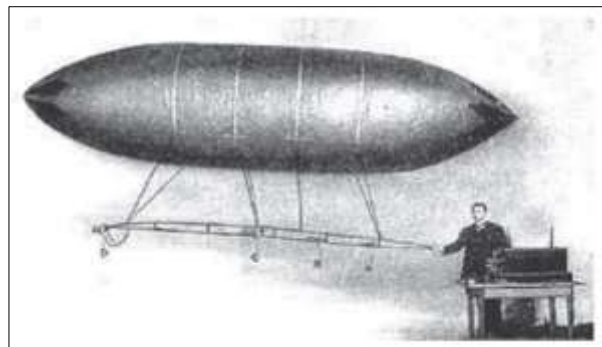


**Εικόνα 1.13:** Τα μικρά ελικοπτερα του Ponton d'Amécourt [36]

Το 1883, ο Douglas Archibald πέταξε ένα ανεμόμετρο στη γραμμή ενός χαρταετού και μετρούσε την ταχύτητα του ανέμου σε υψόμετρο μέχρι 1.200 μέτρα.

Το 1887, ο Archibald έδωσε κάμερες πάνω σε χαρταετούς και δημιούργησε έτσι το πρώτο UAV παγκόσμιας αναγνώρισης. Επίσης, κατά τη διάρκεια του ισπανικού-αμερικανικού πολέμου (1898), ο William Eddy πήρε εκατοντάδες φωτογραφίες από τέτοιου είδους χαρταετούς.

Το 1900, ο Νικόλα Tesla (1856-1943) παρουσίασε την ιδέα του ασύρματου ελέγχου μπαλονιού (Εικόνα 1.14) και το 1915 περιέγραψε ένα στόλο μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων σε εναέρια μάχη [36].



**Εικόνα 1.14:** Η ιδέα του Nikola Tesla [36]

Έπειτα μέχρι τον Α΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, τα UAVs ήταν ήδη αναγνωρισμένα συστήματα. Πιο συγκεκριμένα ο Charles Kettering δημιούργησε το πρώτο αεροπλάνο διπλής όψης για το στρατό (Εικόνα 1.15), που έφερε το όνομα Kettering Aerial Torpedo, γνωστό ως "Bug Kettering", που είχε αποσπώμενα πτερύγια και απελευθερώνονταν όταν περνούσε από το στόχο, μπορούσε να πετάξει σχεδόν 40 μίλια και μπορούσε να φέρει 180 λίβρες εκρηκτικών [11], [21].



**Εικόνα 1.15:** Το Bug Kettering [21]

Μετά το τέλος του Α΄ Παγκοσμίου Πολέμου, με τη χρήση των UAVs και των συστημάτων τους, άρχισαν να ιδρύονται εταιρείες αεροφωτογράφισης με τη βοήθεια αεροσκαφών με σκοπό αποτυπώσεις του χώρου και χαρτογράφηση, ενισχύοντας έτσι το ρόλο των UAVs. Το 1920, ο Sherman Fairchild κατασκεύασε το αεροπλάνο Fairchild Cabin Monoplane-FC1 και το Fairchild Cabin Monoplane-FC2 με ειδικό θάλαμο για τη φωτογραφική μηχανή, για πολιτικές και στρατιωτικές εφαρμογές [11].

Έπειτα, το 1924, ο Archibald Montgomery Low, δημιούργησε τον πρώτο σύνδεσμο δεδομένων και επίλυσε τα προβλήματα παρεμβολής, που δημιουργούνταν από τον κινητήρα UAV και το Σεπτέμβριο του 1924, έκανε την πρώτη επιτυχημένη πτήση στον κόσμο με ραδιοεπικοινωνία. Το 1933, στη Μεγάλη Βρετανία πέταξαν τρία αεροσκάφη με τηλεχειριστήριο, τα οποία πήραν το όνομα “Fairey Queen” αλλά τα δύο από τα τρία συνετρίβησαν [21].

Κατά τη διάρκεια της Πυραυλικής Κρίσης της Κούβας, το 1962, αναπτύχθηκαν UAVs για αναγνώριση, με την ονομασία Fireflys. Δεν χρησιμοποιήθηκαν, όμως, εξαιτίας της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης εκείνης της εποχής. Η Northrop-Ventura Division δημιούργησε μια επιτυχημένη σειρά UAVs στόχου, που ονομάστηκαν Falconer, στα οποία υιοθετήθηκε ένα εξελισσόμενο σύστημα ραδιοελέγχου [21].

Τον Αύγουστο του 1971, το συμβούλιο των επιστημών του υπουργείου Άμυνας των Η.Π.Α., δημιούργησε τα μίνι-RPVs για εντοπισμό πυροβολικών στόχων και προσδιορισμό λέιζερ και μέχρι το τέλος του πολέμου του Βιετνάμ, τα αεροσκάφη αυτά είχαν ποσοστό επιτυχίας 90% [11].

Στη δεκαετία του 1980 παρατηρήθηκε, επίσης, η συνεχιζόμενη αναπτυξιακή δραστηριότητα των UAVs με περιστροφικά σκάφη για δραστηριότητες αναγνώρισης και επιτήρησης στενής εμβέλειας, τα οποία τροφοδοτήθηκαν με κινητήρες περιστροφικών εμβόλων με ωφέλιμα φορτία και σταθεροποιημένες βιντεοκάμερες ημέρας. Το 1981, εξοπλίστηκαν με τηλεοπτικές κάμερες και το 1987, εξοπλίστηκαν με θερμικές κάμερες [11].

Στη δεκαετία του 1990, άρχισαν να κατασκευάζονται UAVs με μεγαλύτερο εύρος και καλύτερη ακρίβεια θέσης. Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, η General Atomics Gnat δημιουργεί UAVs μεγάλου εύρους και συγκεκριμένα τα MALE και HALE. Πολλά από αυτά τα UAVs, χρησιμοποιήθηκαν στον πόλεμο



του Κόλπου το 1991, από τις Αμερικανικές, τις Γαλλικές και τις Βρετανικές δυνάμεις.

Το 1995, το NATO έστειλε UAVs στον πόλεμο στη Βοσνία με συστήματα για αναγνώριση και επιτήρηση σε 7 Βοσνιακές-Σερβικές στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Όμως, οι θερμικές κάμερες IR των UAVs, δεν μπορούσαν να αποτυπώσουν πληροφορία μέσα από τα σύννεφα και αυτό είχε ως αποτέλεσμα να περιοριστεί η χρήση τους σε μεγάλα ύψη. Έτσι, αναπτύχθηκαν συστήματα ραντάρ συνθετικού διαφράγματος (SAR) για UAVs. Όμως, τα αρχικά SARs ήταν βαριά, με αποτέλεσμα την επέκταση του εύρους και της αντοχής των UAVs και την ανάπτυξη μεγαλύτερων και βαρύτερων συστημάτων [11], [21].

Το 2000 εισήχθη στις Η.Π.Α. το διάσημο UAV Predator (Εικόνα 1.16) [35] και έδωσε τη δυνατότητα στο στρατό να επιτίθεται σε στόχους, που βρίσκονται στην άλλη πλευρά της γης. Το Predator είναι ένα μαχητικό αεροσκάφος, που μπορεί να ίπταται σε ύψη μέχρι 25.000 πόδια και για περίπου 40 ώρες. Το 2001, το Predator έγινε το πρώτο όπλο στην ιστορία, με τους χειριστές του να σκοτώνουν στην άλλη άκρη του πλανήτη, με την ίδια ευκολία, που σκοτώνουν οι ελεύθεροι σκοπευτές. Η μεγάλη διάρκεια πτήσης του, προσέφερε ένα πανίσχυρο νέο δεδομένο για επιτήρηση και αναγνώριση, παρέχοντας δυνατότητες στα επίγεια στρατεύματα, όπως παροχή πληροφοριών για τις κινήσεις του εχθρού, παρακολούθηση των εχθρικών επικοινωνιών και επισκόπηση του πεδίου μάχης [45].



**Εικόνα 1.16:** Το Predator εν δράση [35]

Πρίν ακόμη δεχθεί πάνω του οπλικά συστήματα, το Predator ήταν εκείνο που συνετέλεσε καθοριστικά στην εύρεση του Osama bin Laden. Στον πόλεμο του

Αφγανιστάν, το Predator σε συνεργασία με μαχητικά βομβαρδιστικά F-15E, έπαιξε ρόλο κλειδί σε επιχείρηση, που σκότωσε τον στρατιωτικό διοικητή και αρχηγό της Al Qaeda, Mohammed Atef [45], το Νοέμβριο του 2001.

Νέες παραλλαγές του Predator δημιουργήθηκαν, για να επεκτείνουν τις δυνατότητές του. Τροποποιώντας την άτρακτο και επεκτείνοντας το άνοιγμα των πτερύγων στα 86 πόδια (26 m), το Predator μπορεί να πετάξει σε ύψος μέχρι 50.000 πόδια (15.240 m). Το νέο μοντέλο ονομάστηκε MQ-9 Altair. Χρησιμοποιείται από το 2003 σε ειρηνικές περιόδους για επιστημονική έρευνα και έρευνα στην ατμόσφαιρα. Το ναυτικό των Η.Π.Α. έχει τις δικές του εκδόσεις του νέου Predator για αποστολές επιτήρησης και αναγνωριστικές [46].

Τα επόμενα χρόνια αναπτύχθηκαν UAVs επιτήρησης μικρού μεγέθους και σταθερών πτερύγων, όπως τα Raven, Wasp και Puma. Το 2006 ήταν μια χρονιά σταθμός στην ιστορία των UAVs, αφού η FAA εξέδωσε επίσημα την πρώτη άδεια για εμπορικό UAV [35].

Την τελευταία δεκαετία, εξελίσσεται συνεχώς η τεχνολογία των UAVs, βελτιώνοντας σημαντικά την αποτελεσματικότητά τους. Επίσης, εμπλουτίζεται ο σχεδιασμός τους, αυξάνεται το ωφέλιμο φορτίο τους και η αυτονομία τους γίνεται όλο και μεγαλύτερη, καθιστώντας τα ικανά για περισσότερες χρήσεις, συμπεριλαμβανομένου τη χρήση τους ως οχήματα διανομής και όχι μόνο.

Το 2015 η FAA εξέδωσε 1000 άδειες για εμπορικά UAVs. Αυτός ο αριθμός τριπλασιάστηκε μέσα σε ένα χρόνο και αυξάνεται με γεωμετρική πρόοδο από τότε. Ο εξοπλισμός των UAVs με κάμερες για φωτογράφιση και βιντεολήψεις είναι πλέον κοινός. Η ραγδαία ανάπτυξη της χρήσης των έξυπνων τηλεφώνων μείωσε τις τιμές των μικροελεγκτών, αλλά και των αισθητήρων, που φέρει ένα UAV. Η χρήση των DIY UAVs γίνεται όλο και πιο δημοφιλής. Λόγω του μικρού μεγέθους τους και της φορητότητάς τους, τα DIY UAVs χρησιμοποιούνται από την αστυνομία και την πυροσβεστική για επιχειρήσεις επιτήρησης. Παρόλα αυτά, η παράνομη χρήση μη αδειοδοτημένων UAVs, εγείρει ερωτηματικά σχετικά με την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα [35].

Το μέλλον των UAVs φαίνεται πολλά υποσχόμενο. Η ανάπτυξή τους θα εξελιχθεί στους τομείς της γεωργίας, κατασκευών και εξόρυξης, τηλεπικοινωνιών. Όσον αφορά τις στρατιωτικές εφαρμογές, τα UAVs

αναμένεται να γίνουν μικρότερα και ελαφρύτερα, με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής μπαταρίας και περισσότερη διάρκεια πτήσης. Στις πολιτικές εφαρμογές, η βελτίωση του χρόνου πτήσης θα επιτρέψει στα UAVs να εξυπηρετούν σε έκτακτες αποστολές και στη συλλογή δεδομένων σε περιοχές επικίνδυνες για τους ανθρώπους.

Αξίζει να αναφερθεί ότι, καθώς τα συστατικά στοιχεία των UAVs γίνονται όλο και πιο μικρά με την εξέλιξη της τεχνολογίας, τα UAVs τείνουν να μικραίνουν σημαντικά σε μέγεθος και να αξιοποιούνται, αναλόγως, για στρατιωτικούς ή εμπορικούς/ βιομηχανικούς σκοπούς. Ήδη, μικροσκοπικά UAVs σε μέγεθος τσέπης χρησιμοποιούνται από το στρατό των Η.Π.Α. (Εικόνα 1.17), παρέχοντας πολλά πλεονεκτήματα στη μάχη, αφού είναι ιδιαίτερα αθόρυβα, πετούν



**Εικόνα 1.17:** Ένα μικροσκοπικό στρατιωτικό UAV [47]

έως και 25 λεπτά συνεχόμενα, οι αισθητήρες τους μεταδίδουν ζωντανά βίντεο και υψηλής ευκρίνειας εικόνες στο χειριστή τους, μέσω ασφαλούς σύνδεσης δεδομένων [47].

#### **1.4 Συστατικά μέρη ενός UAV**

Τα UAVs είναι περίπλοκα συστήματα κατασκευασμένα από δομές υλικού, αλλά και λογισμικού. Τα κύρια συστατικά ενός UAV μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις κύριες κατηγορίες [38]:

- α) Την *εναέρια πλατφόρμα*, που περιλαμβάνει την άτρακτο (airframe), το σύστημα πλοήγησης, το σύστημα ισχύος/τροφοδοσίας και το ωφέλιμο φορτίο.
- β) Τον *επίγειο σταθμό ελέγχου*, ο οποίος επιτρέπει τον έλεγχο από χειριστή, που βρίσκεται σε μία απομακρυσμένη τοποθεσία.

γ) Το *σύστημα επικοινωνίας*, που υποστηρίζει την επικοινωνία μεταξύ των δύο προηγούμενων στοιχείων του UAV.

#### **1.4.1. Η εναέρια πλατφόρμα**

Η εναέρια πλατφόρμα συντίθεται από διάφορα συστατικά στοιχεία των οποίων ο σκοπός είναι να επιτρέπουν την πτήση και να μεταφέρουν ορισμένους αισθητήρες κατά τη διάρκεια της πτήσης, που στοχεύουν στη συγκέντρωση των δεδομένων της εκάστοτε αποστολής.

##### **1.4.1.1 Η άτρακτος**

Η άτρακτος είναι το κύριο δομικό συστατικό ενός UAV. Κατά το σχεδιασμό της, θα πρέπει πάντοτε να λαμβάνονται υπόψιν το βάρος της, ιδιαιτέρως δε τα συστήματα ισχύος/τροφοδοσίας, επικοινωνίας και ελέγχου, που βρίσκονται πάνω της. Επιπλέον, η άτρακτος θα πρέπει να είναι επαρκώς σχεδιασμένη, ώστε να αντέχει στις δυνάμεις, που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της πτήσης, έτσι ώστε να μην προκαλούνται παραμορφώσεις/αλλοιώσεις (deformation) και κραδασμοί.

Τα UAVs σταθερής πτέρυγας, είναι κυρίως κατασκευασμένα από πολυστερένιο ή πλαστικό. Η άτρακτος των κοινών UAVs με περιστρεφόμενα πτερύγια είναι κατασκευασμένη από αλουμίνιο ή ανθρακόνημα, με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι ελαφριά και ανθεκτική [38]. Το ανθρακόνημα αποτελείται από ίνες, κυρίως, άνθρακα και παρέχει υψηλή στοιβαρότητα και αντοχή σε θραύση και έχει χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής [11]. Τα UAVs κατασκευάζονται, επίσης, από κράματα μετάλλων αλουμινίου και τιτάνιου [7].

##### **1.4.1.2 Το σύστημα πλοήγησης**

Το σύστημα πλοήγησης είναι το κύριο συστατικό στοιχείο του αεροηλεκτρονικού εξοπλισμού (avionics). Είναι ο αυτόματος πιλότος, που επιτρέπει αυτόνομες ή ημιαυτόνομες πτήσεις μέσω υλικού και λογισμικού. Το σύστημα πλοήγησης αποτελείται από τον ελεγκτή πτήσης, το GPS/GNSS και το αδρανειακό (inertial) σύστημα.

###### **1.4.1.2.1 Ο ελεγκτής πτήσης**

Ο ελεγκτής πτήσης είναι ο πυρήνας του συστήματος πλοήγησης. Αυτή η μονάδα διαχειρίζεται το σχεδιασμό της πτήσης και μπορεί να επαληθεύσει σε πραγματικό χρόνο τη θεωρητική πορεία/διαδρομή σε σχέση με την πραγματική. Είναι δυνατόν σε αυτή τη μονάδα, να συνδεθούν διάφοροι αισθητήρες, όπως γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρα, GPS, αισθητήρες όρασης, αισθητήρες υπερήχων, βαρόμετρα, μαγνητόμετρα για να συγχρονίσουν τη συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιώντας το GPS. Ο ελεγκτής πτήσης παίρνει εισόδους από τους αισθητήρες, αλλά και από το τηλεχειριστήριο και στη συνέχεια στέλνει τις κατάλληλες εντολές στους Ηλεκτρονικούς Ελεγκτές Ταχύτητας των κινητήρων, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κίνηση.

Σε κάποιες περιπτώσεις, φιλοξενεί μια μικρή ψηφιακή μνήμη, με σκοπό να συγκεντρώνει αρκετή πληροφορία και να την αποθηκεύει, είτε σε ένα αρχείο καταγραφής, είτε σαν φωτογραφία ή σαν άλλου είδους δεδομένα [38], [44].

#### **1.4.1.2.2 Η μονάδα GPS/GNSS**

Η μονάδα GPS/GNSS είναι ένα άλλο λειτουργικό στοιχείο των σύγχρονων UAVs. (Το GNSS-Global Navigation Satellite System-Παγκόσμιο Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης αναφέρεται σε σχηματισμό/συστοιχία δορυφόρων, που παρέχουν σήματα από το διάστημα για την αποστολή δεδομένων αναφορικά με τη θέση/τόπο και τον χρόνο στους δέκτες GNSS. Οι δέκτες, στη συνέχεια, χρησιμοποιούν αυτά τα δεδομένα για να αποφασίσουν την τοποθεσία. Εξ ορισμού, το GNSS παρέχει παγκόσμια κάλυψη. Παραδείγματα του GNSS περιλαμβάνουν το Galileo της Ευρώπης, το NAVSTAR Global Positioning System-GPS των Η.Π.Α., το GLONASS-Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema της Ρωσίας και το BeiDou Δορυφορικό Σύστημα Πλοήγησης της Κίνας [40].)

Συνήθως, είναι εγκατεστημένο ένα σύστημα μιας συχνότητας (single-frequency) και διπλής συστοιχίας (dualconstellation) (GPS and GLONASS). Σε κάποιες συνθέσεις, μπορεί να είναι διαθέσιμος ακόμη και δέκτης GPS δύο συχνοτήτων και πολλαπλών συστοιχιών. Ο δέκτης χρησιμοποιείται μόνο για να προσδιορίσει τη θέση του UAV σε αυτονομία (τυπική απόκλιση: 3–5 m), ενδεχομένως με τη λύση EGNOS ή WAAS-Wide Area Augmentation System [41] (τυπική απόκλιση: 1-3 m) [38]. (Η απόδοση του GNSS μπορεί να βελτιωθεί με συστήματα Satellite-Based Augmentation Systems (SBAS), όπως το EGNOS-European Geostationary Navigation Overlay Service. Το EGNOS βελτιώνει την

ακρίβεια και την αξιοπιστία της πληροφορίας του, διορθώνοντας λάθη μετρήσεων του σήματος και παρέχοντας πληροφορία για την ακεραιότητα των σημάτων του [40].)

#### **1.4.1.2.3 Το αδρανειακό σύστημα**

Το αδρανειακό σύστημα είναι το τελευταίο συστατικό στοιχείο του συστήματος πλοήγησης. Έχει ενσωματωμένη μία μικροηλεκτρονική συσκευή, που λέγεται αδρανειακή μονάδα μέτρησης (Inertial Measurement Unit-IMU) και εγκαθίσταται στη μονάδα, με σκοπό να ελέγχει τον προσανατολισμό του UAV σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο της γης. Ο σκοπός της είναι να σταθεροποιήσει και να οριζοντιώσει το UAV [44]. Το αδρανειακό σύστημα χρησιμοποιεί τις μετρήσεις της αδρανειακής μονάδας μέτρησης για να υπολογίσει τον προσανατολισμό, την ταχύτητα και την θέση ενός UAV. Είναι χρήσιμο όταν το UAV χάνει το σήμα από το GPS.

Η αδρανειακή μονάδα μέτρησης για να επιτελέσει τη λειτουργία της, χρησιμοποιεί:

- τρισδιάστατα *επιταχυνσιόμετρα* για την εκτίμηση της κατεύθυνσης,
- *γυροσκόπια*, που είναι συσκευές για τη μέτρηση και διατήρηση του προσανατολισμού, μέσω της περιστροφής και επιτρέπουν την ακριβή αναγνώριση της κίνησης μέσα σε τρισδιάστατο χώρο. Το γυροσκόπιο είναι ο αισθητήρας, που παρακολουθώντας τον προσανατολισμό του UAV στο χώρο, δίνει πληροφορίες στον ελεγκτή πτήσης ώστε να μπορεί να κρατάει το UAV σε οριζόντια θέση [21], [11], [44],
- *βαρόμετρα*, που υπολογίζουν την ατμοσφαιρική/βαρομετρική πίεση και προσαρμόζονται στις εκάστοτε ατμοσφαιρικές αλλαγές, την ώρα και την περιοχή, που γίνεται η οποιαδήποτε πτήση για να παρέχουν δεδομένα ύψους [21], [11] και
- *μαγνητόμετρα*, για την αλλαγή στο υψόμετρο.

Το εύρος της ακρίβειας κατά την εκτίμηση της γωνίας μιας κοινής IMU, που χρησιμοποιείται στα mini ή στα micro UAVs είναι περίπου 1–4° [38], [39], [2].

### 1.4.1.3 Το σύστημα ισχύος/τροφοδοσίας

Το σύστημα ισχύος/τροφοδοσίας είναι ένα άλλο λειτουργικό στοιχείο των UAVs, με σκοπό την παροχή ενέργειας στο σύστημα και είναι μέρος του γενικότερου συστήματος προώθησης (propulsion system) των UAVs [50]. Ανάλογα με την κάθε φορά επιλεγμένη άτρακτο, υιοθετούνται και διαφορετικά συστήματα τροφοδοσίας: ορυκτά καύσιμα, βιοκαύσιμα, ηλεκτρική ενέργεια, υδρογόνο, μεθανόλη [50, 52].

Τα UAVs μπορούν να τροφοδοτηθούν ακόμη και με ηλιακή ενέργεια [49], η οποία κατά τη διάρκεια της ημέρας συλλέγεται πάνω στα φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα, που είναι τοποθετημένα στο UAV και κατά τη διάρκεια της νύχτας φορτίζει μπαταρίες ιόντων-Λιθίου, που είναι αποθηκευμένες στο εσωτερικό του UAV, δίνοντάς του τη δυνατότητα να συνεχίζει την πτήση, ακόμη και τη νύχτα, παράγοντας μηδενικές εκπομπές ρύπων (Εικόνα 1.18).

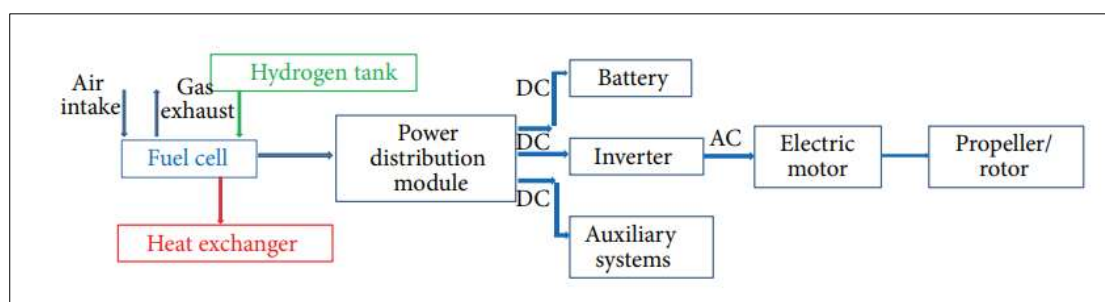


**Εικόνα 1.18:** Hawk 30-Solara 50, UAVs τροφοδοτούμενα με ηλιακή ενέργεια [48],[49]

Εν συντομία, τα μέρη του συστήματος προώθησης είναι τα εξής [50] :

- Πηγή ενέργειας
- Μέσο αποθήκευσης : δεξαμενές, μπαταρίες, πυκνωτές, tanks, batteries, capacitors, μεταλλικά υδρίδια κ.ο.κ.
- Μετατροπέας μηχανικής ενέργειας : μηχανή εσωτερικής καύσης και κυψέλη καυσίμου και ηλεκτρικός κινητήρας
- Μετατροπέας ανύψωσης/ώσης : κινητήρας, ανεμιστήρας, προπέλλα, μηχανή jet κ.ο.κ.

Ένα παράδειγμα είναι το σύστημα προώθησης της Εικόνας 1.19, όπου το υδρογόνο είναι η πηγή ενέργειας, το μέσο αποθήκευσης είναι η δεξαμενή υδρογόνου. Ο μετατροπέας μηχανικής ενέργειας βασίζεται στο συνδυασμό μιας κυψέλης καυσίμου και ηλεκτρικού κινητήρα και ο μετατροπέας ανύψωσης/ώσης αποτελείται από μία προπέλλα. Αυτή είναι μία τυπική αρχιτεκτονική από ένα σύστημα προώθησης βασισμένο σε κυψέλη καυσίμου, που χρησιμοποιείται στα UAVs [50].



**Εικόνα 1.19:** Σχηματικό διάγραμμα των στοιχείων του συστήματος προώθησης ενός UAV [50]

#### 1.4.1.4 Το ωφέλιμο φορτίο

Το ωφέλιμο φορτίο καθορίζεται από τις ανάγκες της εκάστοτε αποστολής και αποτελείται από αισθητήρες ή άλλα όργανα ποικίλου βάρους, που μεταφέρει το UAV και χρησιμοποιούνται για να συλλέξουν ειδικά δεδομένα ή παραμέτρους: RGB/πολυφασματικές κάμερες, θερμικές κάμερες, υπερφασματικές κάμερες, ψηφιακές κάμερες, βίντεο-κάμερες, ραντάρ για την ανίχνευση στόχων, laser σαρωτές, ελαφρείς LiDAR αισθητήρες (LiDAR-Light Detection And Ranging, οι οποίοι θεωρούνται σαν ένας από τους πιο ακριβείς τρόπους για την απόκτηση γεωμετρικών δεδομένων. Το LiDAR είναι μία μέθοδος ανίχνευσης, μέτρησης και απεικόνισης χρησιμοποιώντας λέιζερ. Το LiDAR, τυπικά, χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου είναι δύσκολη η εφαρμογή των κλασικών τοπογραφικών μεθόδων και όπου απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια [44]), αισθητήρες αποφυγής εμποδίων (Τα περισσότερα σύγχρονα UAVs διαθέτουν σύστημα αποφυγής εμποδίων. Το σύστημα αυτό λαμβάνει δεδομένα από συγκεκριμένους αισθητήρες και αλλάζει την κατεύθυνση κίνησής του, όποτε ανιχνεύσει εμπόδιο εντός της διαδρομής πτήσης. Οι αισθητήρες, που συνθέτουν το σύστημα αποφυγής εμποδίων είναι



κάμερες και εξαρτήματα μέτρησης απόστασης με την χρήση υπερηχητικών κυμάτων [2]) ή άλλου είδους αισθητήρες. Η μάζα του ωφέλιμου φορτίου μπορεί να κυμαίνεται, για παράδειγμα, από περίπου 200g έως και 1.000 kg [42], [21], [1], [7], [43].

Τα άλλα συστατικά του ωφέλιμου φορτίου είναι όργανα, απαραίτητα για τον εξοπλισμό της μονάδας και την ενεργοποίηση της συσκευής. Ειδικά, στην περίπτωση των καμερών, ένα λειτουργικό συστατικό είναι το gimbal (Σύστημα Ευστάθειας, που βελτιώνει την ποιότητα των φωτογραφιών [1] και δίνει τη δυνατότητα ευρύτερων γωνιών για αεροφωτογράφιση ή βιντεολήψη [44]), το οποίο επιτρέπει την περιστροφική κίνηση του ωφέλιμου φορτίου κατά μήκος ενός ή περισσοτέρων αξόνων, συχνά εξοπλισμένων με σερβομηχανισμούς, που μπορούν να προσαρμόσουν ή να σταθεροποιήσουν τον προσανατολισμό ενός αισθητήρα. Ανάλογα με τον αισθητήρα το gimbal μπορεί να διορθωθεί, σταθεροποιηθεί και να ελέγχεται από το έδαφος [38].

#### **1.4.2 Ο επίγειος σταθμός ελέγχου**

Ο επίγειος σταθμός ελέγχου εξασφαλίζει ένα μόνιμο και διαδραστικό έλεγχο του UAV, ενημερώνοντας τον πιλότο για την πρόοδο της αυτόνομης πτήσης. Η βασική σύνθεση ενός επίγειου σταθμού ελέγχου είναι ένας υπολογιστής, επιτραπέζιος ή φορητός, με δυνατότητα σχεδιασμού της πτήσης και ελέγχου της υλοποίησής της και ένας ασύρματος δρομολογητής. Ο υπολογιστής θα πρέπει να συλλέγει, να επεξεργάζεται και να εμφανίζει τα δεδομένα. Ο επίγειος σταθμός ελέγχου θα πρέπει να έχει την ικανότητα να ελέγχει ακόμη και πολλαπλά UAVs και να επικοινωνεί και με άλλους σταθμούς ελέγχου, αν χρειαστεί. Ο επίγειος σταθμός ελέγχου είναι εκείνος, που αναμένεται να υλοποιήσει ένα έκτακτο σχέδιο δράσης σε περίπτωση οποιασδήποτε αποτυχίας κατά την πτήση του/των UAV/s [7].

Εάν το UAV δεν είναι εντελώς αυτόνομο, θα χρειαστεί ένας πιλότος εξοπλισμένος με ένα τηλεχειριστήριο για έκτακτες περιπτώσεις ή για την προσγείωση και την απογείωσή του. Ένας ή περισσότεροι άνθρωποι είναι υπεύθυνοι για τη διαχείριση και τον έλεγχο των παραμέτρων του UAV κατά τη διάρκεια της πτήσης. Τα εμπορικά UAVs έχουν ειδικό σχεδιαστή πτήσης ή χρησιμοποιούν λογισμικό ανοιχτού κώδικα ανεπτυγμένο από την

επιστημονική κοινότητα. Οι σχεδιαστές πτήσης είναι εφαρμογές, με τις οποίες είναι δυνατόν να προσδιορισθεί μια σειρά πλοήγησης ή να τεθεί μια φωτογραμμετρική πτήση (φωτογραμμετρία είναι μία μέθοδος αποτύπωσης και χαρτογράφησης μέσω συρραφής φωτογραφιών, ώστε να δημιουργηθεί μία μεγαλύτερη εικόνα) ορίζοντας την περιοχή του ενδιαφέροντος, τις παραμέτρους της κάμερας και άλλες φωτογραμμετρικές παραμέτρους (π.χ. πλευρική και μετωπική επικάλυψη, απόσταση δειγματοληψίας εδάφους) [38].

#### **1.4.3 Το σύστημα επικοινωνίας**

Το τελευταίο συστατικό του UAV είναι το σύστημα επικοινωνίας, το οποίο αναφέρεται στην ασύρματη σύνδεση μεταξύ του επίγειου σταθμού ελέγχου και του εναέριου μη επανδρωμένου οχήματος. Η επίτευξη ασύρματης επικοινωνίας είναι υποχρεωτική κατά την καθοδήγηση και τον έλεγχο ενός UAV και ειδικά σε έκτακτες και επείγουσες αποστολές, οπότε και πρέπει να διασφαλιστεί η συνέχεια της σύνδεσης. Οι ραδιοσυχνότητες από 30 MHz έως 3 GHz αποτελούν γενικά το εύρος ζώνης, όπου τα μικρά UAVs περιστρεφόμενων πτερύγων λειτουργούν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Βασική χρήση των UAVs - Εφαρμογές

Θα ακολουθήσει μια γενική παρουσίαση και περιγραφή των εφαρμογών των μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων. Διευκρινίζεται ότι οι αποστολές που εκτελούνται από ένα UAV, στις περισσότερες περιπτώσεις, θα μπορούσαν να εκτελεστούν αποδοτικότερα από ένα σμήνος UAVs. Υπάρχουν διάφοροι τομείς στους οποίους μπορούν να συνεισφέρουν τα UAVs. Σύμφωνα με το [54], μερικοί από αυτούς είναι : η γεωργία ακριβείας, η διαχείριση καταστροφών, η έρευνα και διάσωση, οι στρατιωτικές εφαρμογές, οι εφαρμογές στις έξυπνες πόλεις, η εναέρια φωτογράφιση, η ψυχαγωγία, η επιβολή του Νόμου, η γεωγραφική χαρτογράφηση, οι διανομές, η παρακολούθηση της ζωής των άγριων ζώων, η πρόγνωση του καιρού κ.ά. .

#### 2.1.1 Τα UAVs στην υπηρεσία της γεωργίας

Στον τομέα της γεωργίας ακριβείας (PA-Precision Agriculture), η χρήση των UAVs κερδίζει μέρα με την ημέρα, ολοένα και περισσότερο έδαφος, αφού τα μεγάλα οφέλη, που προσφέρει αναγνωρίζονται απ' όλο και περισσότερους αγρότες σε όλο το κόσμο. Η εισαγωγή της Τεχνολογίας της Πληροφορικής στη γεωργία ακριβείας έδωσε τη δυνατότητα σε ένα ή περισσότερα UAVs να κινούνται σε μια προκαθορισμένη καλλιεργημένη έκταση με σκοπό τη συλλογή δεδομένων για τον έλεγχο της υγιούς ανάπτυξης των φυτών της καλλιέργειας αλλά και της ύπαρξης επιδρομών από παράσιτα, αγριόχορτα ή ζώα [28], [55].

Τα UAVs μπορούν να κινούνται σε μια προδιαγεγραμμένη διαδρομή σε ποικίλες καιρικές συνθήκες και να επιστρέφουν στο σταθμό βάσης όταν η αποστολή τους έχει ολοκληρωθεί. Τα δίκτυα αισθητήρων υιοθετούν τη χρήση των UAVs με ραγδαία αναπτυσσόμενο ρυθμό. Τα UAVs ανιχνεύουν δεδομένα από το περιβάλλον και τα αποθηκεύουν. Με την επιστροφή των UAVs στο σταθμό βάσης τα δεδομένα ανακτώνται σε λίγα δευτερόλεπτα, μέσω εφαρμογών από έξυπνες συσκευές, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν στην πρόγνωση της απόδοσης της παραγωγής καθώς και τις απαιτήσεις σε φυτοφάρμακα, λιπάσματα, σπόρους για σπορά κ.ά. [28], [55].

Τα UAVs λόγω της ικανότητάς τους να απογειώνονται και να προσγειώνονται εντελώς κάθετα, μπορούν να αλληλεπιδρούν με σημεία πολύ περιορισμένα από άποψη χώρου και δυσπρόσιτα. Τα UAVs μπορούν να τραβήξουν υψηλής ευκρίνειας φωτογραφίες ενώ βρίσκονται σε απόσταση 50 έως και 100 μέτρα από το στόχο τους [55]. Στην Ιαπωνία, χρησιμοποιούνται για τον ακριβή ψεκασμό των φυτειών ρυζιού, εδώ και κάποια χρόνια. Αυτή η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική και οικολογική από τη χρήση μία αγροτικής μηχανής ή ακόμη και ενός επανδρωμένου ελικοπτέρου [33].

#### **2.1.1.1 Αισθητήρες που προσαρμόζονται στα UAVs στη γεωργία ακριβείας**

Για τη συλλογή χρήσιμων για επεξεργασία δεδομένων από τις καλλιεργούμενες εκτάσεις, τα UAVs είναι εξοπλισμένα με διάφορους εξελιγμένους και εξειδικευμένους αισθητήρες [55]. Οι κυριότεροι από αυτούς είναι :

- 1) Αισθητήρες τοποθεσίας:** Χρησιμοποιούνται για να εντοπίσουν διαφορετικές περιοχές και σημεία στις αγροτικές εκτάσεις γης, επισημαίνοντας την περιοχή παρακολούθησης της αυξανόμενης καλλιέργειας για τις ανάγκες της σε νερό, λίπανση αλλά και χειρισμό εξόντωσης των ζιζανίων.
- 2) Ηλεκτροχημικοί αισθητήρες:** Στην έξυπνη γεωργία αυτοί οι αισθητήρες χρησιμοποιούνται γενικά για να ανιχνεύουν επίπεδα pH και θρεπτικά συστατικά χώματος καθώς τα ηλεκτρόδια του αισθητήρα ανιχνεύουν συγκεκριμένα ιόντα μέσα στο χώμα.
- 3) Αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας:** Σωστή μέτρηση των περιβαλλοντικών παραγόντων της θερμοκρασίας και της υγρασίας βοηθούν τον αγρότη να προσαρμόσει την ποσότητα του λιπάσματος και του νερού, που χρειάζεται η καλλιέργειά του. Αυτοί οι αισθητήρες έχουν τη δυνατότητα να είναι ασύρματοι και να λειτουργούν με μπαταρία.
- 4) Οπτικοί αισθητήρες:** Οι αισθητήρες λειτουργούν με βάση την αρχή της μετατροπής των ακτίνων φωτός σε ηλεκτρικά σήματα. Υπάρχουν

πολλοί οπτικοί αισθητήρες, που χρησιμοποιούν τα UAVs σε εφαρμογές σχετιζόμενες με τη γεωργία ακριβείας.

**A) Αισθητήρες ορατού φωτός (RGB):** Οι RGB αισθητήρες είναι οι πιο δημοφιλείς στη γεωργία ακριβείας. Το ανθρώπινο μάτι είναι ευαίσθητο στις κόκκινες, πράσινες και μπλε ζώνες του φωτός. Ο RGB αισθητήρας στην κάμερα ενός UAV καταγράφει μια φωτογραφία, έτσι ώστε να αναπαράγεται το ίδιο αποτέλεσμα όπως αν την είχε δει ανθρώπινο μάτι. Επίσης, τα κόστη στις κάμερες με αισθητήρα RGB είναι σχετικά όχι υψηλά, όσον αφορά το βάρος τους είναι ελαφριές και εξαιρετικά καλές στη δημιουργία ορθομωσαϊκών χαρτών σε ένα στιγμιότυπο.

**B) Πολυφασματικοί αισθητήρες:** Η συλλογή των πολυφασματικών δεδομένων είναι απόλυτη αναγκαιότητα για την ανάλυση της υγείας της σοδειάς. Οι πολλαπλές ζώνες του φωτός επιτρέπουν στους ερευνητές να δημιουργήσουν αναλυτικές ακριβείας και να παράγουν πληροφορίες σχετικά με τη δυναμική των φυτών.

**Γ) Υπερφασματικοί αισθητήρες:** Οι υπερφασματικοί αισθητήρες είναι εξαιρετικά ικανοί να λαμβάνουν λεπτομερείς εικόνες στο φασματικό και χωρικό εύρος.

**5) Θερμικοί υπέρυθροι αισθητήρες:** Οι θερμικοί υπέρυθροι αισθητήρες λαμβάνουν τη θερμοκρασία των αντικειμένων, παράγουν τις εικόνες και τις εμφανίζουν βασιζόμενοι στη συλλεχθείσα πληροφορία. Οι υπέρυθροι αισθητήρες και οι οπτικοί φακοί χρησιμοποιούνται στις θερμικές κάμερες για να αποθηκεύσουν τη θερμική ενέργεια. Υπάρχουν θερμικοί αισθητήρες ικανοί να παράγουν έγχρωμες εικόνες στις οποίες οι θερμότερες εικόνες παρουσιάζονται με κίτρινο χρώμα και οι ψυχρότερες με μπλε χρώμα. Οι θερμικοί αισθητήρες χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές γεωργίας, όπως παρακολούθηση συνθηκών σοδειάς και εδάφους.

#### 2.1.1.2 Εφαρμογές των UAVs στη γεωργία ακριβείας

Οι πιο συνήθεις εφαρμογές των UAVs για τη γεωργία ακριβείας είναι οι ακόλουθες [55], [56]:

- Χαρτογράφηση και διαχείριση ζιζανίων

- Παρακολούθηση της ανάπτυξης της βλάστησης και εκτίμηση της απόδοσης
- Παρακολούθηση της υγείας της βλάστησης και ανίχνευση ασθενειών
- Διαχείριση άρδευσης
- Ψεκασμός φυτών καλλιέργειας
- Τεχνητή επικοινωνία
- Εναέρια επιθεώρηση κοπαδιών ζώων

#### **2.1.1.2.1 Χαρτογράφηση και διαχείριση ζιζανίων**

Τα ζιζάνια, που αναπτύσσονται σε μια καλλιέργεια δεν είναι επιθυμητά φυτά και μπορούν να προκαλέσουν πολλαπλά προβλήματα. Ανταγωνίζονται τους διαθέσιμους πόρους όπως το νερό, ακόμη και το χώμα, προκαλώντας απώλειες στην ανάπτυξη της καλλιέργειας, τη συγκομιδή αλλά και τα έσοδα που προκύπτουν. Η χρήση της ίδιας ποσότητας ζιζανιοκτόνων σε όλη την έκταση της καλλιέργειας είναι η κυρίαρχη και παραδοσιακή επιλογή για τον έλεγχο των ζιζανίων. Τα αποτελέσματά της είναι τα ζιζάνια να γίνονται ανθεκτικά στα φάρμακα, που σκοπό έχουν να τα εξοντώσουν, το περιβάλλον να μολύνεται όλο και περισσότερο, τα κόστη που δαπανά ο αγρότης να αυξάνονται.

Για να υπερπηδηθούν τα παραπάνω προβλήματα, η γεωργία ακριβείας χρησιμοποιεί την εξειδικευμένη για κάθε περιοχή διαχείριση των ζιζανίων (Site-Specific Weed Management-SSWM). Αντί, δηλαδή, να εφαρμόζονται ζιζανιοκτόνα σε ολόκληρη την καλλιεργούμενη έκταση, η έκταση διαιρείται σε ζώνες διαχείρισης, έτσι ώστε να είναι δυνατή η προσαρμογή του τρόπου εξόντωσης των ζιζανίων. Εξάλλου, τα ζιζάνια διασπείρονται μόνο σε κάποια σημεία περιορισμένης έκτασης της καλλιεργούμενης γης. Για να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός, ένα ή περισσότερα UAVs είναι απαραίτητο να δημιουργήσουν έναν ακριβή χάρτη κάλυψης ζιζανίων στην καλλιεργούμενη έκταση, ο οποίος θα απεικονίζει τα σημεία για τον ακριβή ψεκασμό με ζιζανιοκτόνα.

#### **2.1.1.2.2 Παρακολούθηση της ανάπτυξης της βλάστησης και εκτίμηση της απόδοσης**

Η τακτική συλλογή πληροφοριών και η οπτικοποίηση των καλλιεργειών χρησιμοποιώντας UAVs, παρέχει αυξημένες ευκαιρίες για την παρακολούθηση της ανάπτυξης των καλλιεργειών και για την καταγραφή της μεταβλητότητας, που παρατηρείται σε διάφορες παραμέτρους της καλλιεργούμενης έκτασης. Πολλές πρόσφατες μελέτες εστιάζουν στην επισκόπηση των επιπέδων της βιομάζας και του αζώτου των καλλιεργειών μαζί με την εκτίμηση της απόδοσης. Η βιομάζα είναι η πιο κοινή παράμετρος της καλλιέργειας, η οποία μαζί με την πληροφορία που σχετίζεται με την περιεκτικότητα σε άζωτο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον περιορισμό της ανάγκης σε πρόσθετα λιπάσματα ή άλλες δράσεις.

Επιπρόσθετα, οι πληροφορίες που αποκτήθηκαν από τα UAVs μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία τρισδιάστατων ψηφιακών χαρτών της καλλιέργειας και για τη μέτρηση ποικίλων παραμέτρων, όπως το ύψος της καλλιέργειας, η απόσταση μεταξύ των γραμμών φύτευσης ή μεταξύ των φυτών. Με τα UAVs προσφέρεται η δυνατότητα να συλλέγονται συστηματικά οι πληροφορίες για την καλλιέργεια, οδηγώντας τους αγρότες σε διαχείριση της καλλιέργειάς τους (για παράδειγμα χρήση θρεπτικών ουσιών) με ελεγχόμενο τρόπο [55].

#### **2.1.1.2.3 Παρακολούθηση της υγείας της βλάστησης και ανίχνευση ασθενειών**

Η υγεία της καλλιέργειας είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ερευνάται, αφού οι ασθένειες στις καλλιέργειες προκαλούν σημαντικές οικονομικές απώλειες λόγω της μειωμένης απόδοσης και της ποιότητας, που επιφέρουν. Για αυτό το λόγο, οι καλλιέργειες πρέπει να παρακολουθούνται, συνεχώς, ώστε να ανιχνεύονται οι ασθένειες άμα τη γενέσει τους, περιορίζοντας την εξάπλωσή τους [55].

Τα UAVs μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δύο στάδια για την υποστήριξη της συγκεκριμένης εφαρμογής της γεωργίας ακριβείας:

**α)** στο αρχικό στάδιο του ελέγχου της ασθένειας, συλλέγουν τη σχετική πληροφορία για την υγεία της καλλιέργειας και χαρτογραφούν το μέγεθος της προσβολής των φυτών από την ασθένεια σε διαφορετικά σημεία στην καλλιέργεια.

**β)** κατά τη διάρκεια της θεραπείας, οι αγρότες εφαρμόζουν στοχευμένο ψεκασμό μέσω των UAVs.

Κομμάτι της έξυπνης γεωργίας μπορεί να θεωρηθεί και η παρακολούθηση επιβλαβών πληθυσμών εντόμων, πράγμα που ήδη υλοποιείται στην χώρα μας τουλάχιστον σε ότι αφορά τον πληθυσμό των κουνουπιών [25].

#### **2.1.1.2.4 Διαχείριση άρδευσης**

Η χρήση των UAVs, που ενσωματώνουν κατάλληλων ειδών αισθητήρες καθιστά δυνατή την εξεύρεση τμημάτων της καλλιέργειας, που έχουν ανάγκη για περισσότερο ή λιγότερο νερό, βοηθώντας τους αγρότες να εξοικονομήσουν χρόνο αλλά και υδάτινους πόρους. Επίσης, η παραγωγή εξειδικευμένων χαρτών, που εικονογραφούν τη μορφολογία του εδάφους, υποστηρίζουν πιο επιδέξιο σχεδιασμό άρδευσης για κάθε καλλιέργεια ξεχωριστά, έτσι ώστε οι πόροι του νερού να εφαρμόζονται αποτελεσματικά στα σωστά τμήματα της καλλιέργειας και με τη σωστή ποσότητα, αφού η προς άρδευση έκταση διαιρείται σε διαφορετικές ζώνες άρδευσης, ώστε να γίνει ακριβής διαχείριση των πόρων του νερού [55].

#### **2.1.1.2.5 Ψεκασμός φυτών καλλιέργειας**

Ο παραδοσιακός τρόπος ψεκασμού των καλλιεργειών έχει τρία βασικά μειονεκτήματα: μεγάλες απώλειες φυτοφαρμάκων, έκθεση του αγρότη σε επικίνδυνα για την υγεία του φυτοφάρμακα και η όλη διαδικασία είναι πολύ χρονοβόρα. Τα UAVs μπορούν να φανούν χρήσιμα και να εξαλείψουν τα παραπάνω μειονεκτήματα. Για να εφαρμόσουν το ψεκασμό μιας καλλιέργειας, μετρούν με ακρίβεια αποστάσεις, ακολουθούν τη μορφολογία του εδάφους και διατηρούν σταθερό το ύψος από το οποίο ψεκάζουν. Η συμβολή τους είναι ιδιαίτερα αποφασιστική, ειδικά όταν εμφανιστούν ασθένειες και ο ψεκασμός πρέπει να εφαρμοστεί σε ένα ή περισσότερα τμήματα της καλλιέργειας χωρίς να επηρεαστούν τα υγιή φυτά [55].



### 2.1.1.2.6 Τεχνητή επικοινωνία

Τα έντομα επικοινωνίας και ιδίως οι μέλισσες έχουν μειωθεί σημαντικά και ως εκ τούτου έχει προκληθεί μεγάλη ανησυχία παγκοσμίως. Η επικοινωνία είναι αναγκαία για την αναπαραγωγή των ανθοφόρων φυτών. Η γύρη που παράγουν τα αρσενικά μέρη των φυτών μεταφέρεται στα θηλυκά μέρη τους και επιτρέπει έτσι τη δημιουργία σπόρων. Όμως η γύρη πρέπει να μεταφερθεί με κάποιο τρόπο και τα έντομα παίζουν το ρόλο του μεταφορέα, καθώς αυτή κολλά στο σώμα τους, όταν κάθονται σε ένα λουλούδι, και μετά μεταφέρεται στο επόμενο.

Οι ερευνητές του Εθνικού Ινστιτούτου Προωθημένης Βιομηχανικής Επιστήμης και Τεχνολογίας (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology-AIST) της Tsukuba της Ιαπωνίας, με επικεφαλής τον μηχανικό Eiji Miyako, κατασκεύασαν ένα τηλεκατευθυνόμενο μίνι-UAV (Εικόνα 2.1) σε μέγεθος κουτιού σπέρτων με τέσσερις έλικες, το οποίο έχει διάμετρο μόνο τεσσάρων εκατοστών και βάρος 15 γραμμαρίων, που θα μπορούσε να βοηθήσει στην τεχνητή επικοινωνία.



**Εικόνα 2.1:** UAV επικοινωνιαστής [59]

Στο κάτω μέρος του UAV υπάρχει μια ειδική κολλητική ουσία (γέλη), έτσι ώστε όταν αυτό κάθεται πάνω σε ένα λουλούδι, οι κόκκοι της γύρης προσκολλώνται ελαφρά πάνω του. Όταν το UAV κάθεται στο επόμενο φυτό, η γύρη αποκολλάται και μένει πάνω στο νέο λουλούδι. Τα πειράματα έδειξαν ότι το εν λόγω UAV είναι ικανό να επικοινωνήσει ιαπωνικούς κρίνους (με ποσοστό επιτυχίας 37%), χωρίς να προξενεί ζημιά στα λουλούδια, όταν κάθεται πάνω τους.

Οι ερευνητές προσπαθούν πλέον να εξελίξουν το UAV, ώστε να γίνει πλήρως αυτόνομο και να αποτελέσει σύμμαχο των γεωργών στο μέλλον, εφοδιασμένο με GPS, κάμερα υψηλής ανάλυσης και τεχνητή νοημοσύνη [56], [57], [58].

#### **2.1.1.2.7 Εναέρια επιθεώρηση και συγκέντρωση κοπαδιών ζώων**

Τα UAVs έχουν βοηθήσει πάρα πολύ στον τομέα της επιθεώρησης και της συγκέντρωσης πολυπληθών κοπαδιών ζώων, που εκτείνονται σε πολύ μεγάλες εκτάσεις σε περιοχές της Αυστραλίας και της Νέας Ζηλανδίας. Αυτά τα UAVs είναι εξοπλισμένα με σειρήνες, που καθοδηγούν τα ζώα του κοπαδιού προς τις ειδικές περιοχές για το άρμεγμα, τη σίτιση ή προς το χώρο φύλαξής τους. Είναι γνωστά με την ονομασία Βοσκοί Αέρος (Air Shepherd UAVs) και είναι UAVs σταθερών πτερύγων εξοπλισμένα με υπέρυθρες κάμερες [56].

#### **2.1.2 Διαχείριση καταστροφών και συνδρομή των UAVs στην έρευνα και τη διάσωση**

Μια καταστροφή είναι ένας κίνδυνος, που προκαλείται είτε από τη φύση, είτε από ανθρώπινη παρέμβαση και έχει ως αποτέλεσμα φυσικές καταστροφές, απώλειες ζώων ή δραματικές αλλαγές στο περιβάλλον. Τραγικά γεγονότα, όπως σεισμοί, πλημμύρες, ατυχήματα, πυρκαγιές ή εκρήξεις είναι διάφορα είδη καταστροφικών συμβάντων. Εφαρμογές των UAVs είναι δυνατόν να γίνουν αρωγοί στη διαχείριση των καταστροφών [60].

##### **2.1.2.1 Διαρροή επικίνδυνων υλικών και πυρηνικά ατυχήματα**

Σε ατυχήματα που περιλαμβάνουν διαρροή επικίνδυνων υλικών, οι πτήσεις των UAVs έχουν πρωταρχικό σκοπό να εξακριβώσουν έγκαιρα και με ακρίβεια τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης της εξάπλωσης των υγρών ή αερίων υλικών. Αυτό το πρόβλημα επιλύεται, αφού μέσω των πτήσεων των UAVs τρισδιάστατες εικόνες, μπορούν να ληφθούν, που να καλύπτουν μεγάλες περιοχές, ώστε να γίνει η χαρτογράφηση γρήγορα και αντικειμενικά, πράγμα το οποίο θα αξιολογήσει την επικινδυνότητα της κατάστασης βάσει των πραγματικών στοιχείων και θα βοηθήσει στην υποστήριξη των αποφάσεων για την αντιμετώπιση του προβλήματος [60], [61].

Σε καταστάσεις διαρροής επικίνδυνων υλικών τα UAVs είναι η μόνη επιλογή, αφού ο άνθρωπος δεν μπορεί να τις αντιμετωπίσει ερχόμενος σε άμεση επαφή, ειδικά, αν πρόκειται για πυρηνική καταστροφή, η οποία εξαπλώνεται και στο περιβάλλον της ευρύτερης περιοχής, δημιουργώντας πολύ επικίνδυνες συνθήκες για τα σωστικά συνεργεία. Τα σωστικά συνεργεία, αν και φορούν εξοπλισμό ατομικής προστασίας, έχουν περιορισμένο χρόνο έκθεσης στην τοποθεσία της διαρροής και γύρω από αυτή, καθώς εγκυμονούν κίνδυνο για την σωματική τους υγεία και την ίδια τους την ζωή [61].

Στο πυρηνικό ατύχημα του Τσερνομπίλ τον Απρίλιο του 1986 χρησιμοποιήθηκαν επανδρωμένα αεροσκάφη. Οι αεροπόροι που είχαν βοηθήσει στον περιορισμό της ζημιάς έχασαν την ζωή τους μετά από λίγο καιρό, καθώς εκτέθηκαν στη ραδιενεργό ακτινοβολία. Στο πυρηνικό ατύχημα στην παραγωγική μονάδα ενέργειας της Φουκουσίμα τον Μάρτιο του 2011 στην Ιαπωνία, χρησιμοποιήθηκαν UAVs για να αποτυπώσουν το μέγεθος της καταστροφής. Με τη βοήθεια των UAVs έγινε η απαραίτητη χαρτογράφηση για την αξιολόγηση της κατάστασης χωρίς, όμως, να κινδυνέψουν ανθρώπινες ζωές [61].

Επίσης, σε περίπτωση βιολογικού κινδύνου και σε επιβολή υγειονομικού περιορισμού σε μία περιοχή, τα UAVs είναι αυτά τα οποία θα μπορούσαν να βοηθήσουν στην μεταφορά φαρμάκων και κατάλληλου εξοπλισμού χωρίς να χρειαστεί να εκτεθούν υγιή άτομα (μη μολυσμένα) σε κίνδυνο [61].

#### **2.1.2.2 Σεισμοί**

Οι σεισμοί είναι μια τυπική καταστροφή, η οποία ξεσπά χωρίς προειδοποιήσεις και προκαλεί σοβαρές κτιριακές καταστροφές από τη μία, αλλά και απώλειες ανθρώπινων ζωών από την άλλη. Το είδος των ζημιών, που έχουν προκληθεί στα πληγέντα κτίρια, είναι εκείνο που θα καθορίσει και τη πιθανότητα επιβίωσης των εγκλωβισμένων ατόμων κάτω από τα συντρίμια των κτιρίων. Για αυτό το λόγο, σε τέτοιου είδους καταστροφές, επιβάλλεται η χρήση των UAVs για μια άμεση και γρήγορη χαρτογράφηση της πληγείσας περιοχής. Με βάση τη χαρτογράφηση, οι ειδικές ομάδες διάσωσης μπορούν να βελτιστοποιήσουν το έργο τους αναζητώντας επιζώντες στα ερείπια ταχύτερα και με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Επίσης, η βοήθεια των UAVs (που φέρουν τους κατάλληλους αισθητήρες και τον απαιτούμενο εξοπλισμό) είναι καθοριστική και στη διατήρηση της ασφάλειας των σωστικών συνεργείων, τα οποία εργάζονται υπό αντίξοες και επικίνδυνες συνθήκες προκειμένου να απεγκλωβίσουν τους επιζώντες κάτω από τα συντρίμια [60], [61].

### **2.1.2.3 Πλημμύρες**

Οι πλημμύρες είναι μια καταστροφή, που συνήθως επέρχεται με πιο αργό ρυθμό. Επομένως, τα UAVs είναι δυνατόν να παρατηρήσουν την περιοχή, που έχει πλημμυρίσει και να καταγράψουν με λεπτομέρεια το μέγεθος της καταστροφής. Μπορούν, επίσης, να διακρίνουν τα κτίρια, που είναι σε επικινδυνότητα και θα πρέπει να εκκενωθούν [60].

### **2.1.2.4 Δασικές πυρκαγιές**

Η διαδικασία της κατάσβεσης των δασικών πυρκαγιών είναι μια κοστοβόρα διαδικασία. Η συντήρηση των πυροσβεστικών αεροπλάνων και των ελικόπτερων, αλλά και η εκπαίδευση του προσωπικού είναι πολύ σημαντικές διαδικασίες, με μεγάλο κόστος. Επιπλέον, το προσωπικό που ασχολείται με την πυρόσβεση εκτίθεται σε τεράστια επικινδυνότητα [26].

Τα UAVs είναι εξαιρετικά χρήσιμα, για την πρόβλεψη, την εκτίμηση και παρακολούθηση της εξέλιξης των δασικών και αστικών πυρκαγιών. Όσον αφορά την πρόληψη και την παρακολούθηση, σε αυτόν τον τομέα γίνεται χρήση μικρότερων UAVs, που μεταδίδουν βίντεο σε πραγματικό χρόνο προς το σταθμό βάσης και εκτείνονται σε ολόκληρες δασικές περιοχές ή καλλιέργειες αναζητώντας πιθανές εστίες, που όταν ευνοηθούν από τις κατάλληλες καιρικές συνθήκες θα εκδηλώσουν πυρκαγιά [33].

Σε συνθήκες πυρκαγιάς, το κατάλληλο UAV μπορεί και μεταφέρει σε ζωντανό χρόνο πολύτιμες εικόνες και δεδομένα στον κινητό σταθμό εδάφους, χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο ανθρώπινη ζωή. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται καλύτερος συντονισμός των εναέριων και επίγειων μέσων κατάσβεσης της φωτιάς, παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για την απόφαση εκκένωσης χωριών και οικισμών. Επίσης, η συνδρομή τους είναι καθοριστική στη διάσωση ανθρώπων, που έχουν παγιδευτεί στις φλόγες [26], [62], [65].

Αξίζει να αναφέρουμε, ότι χρησιμοποιούνται κατάλληλοι αλγόριθμοι για το σχεδιασμό (αλλά και τον επανασχεδιασμό εάν χρειαστεί) της διαδρομής κίνησης των UAVs. Επίσης, οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες δεν εμποδίζουν τη λειτουργία τους. Αυτό οφείλεται στους αισθητήρες τους, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι για να λειτουργούν σε κάθε είδους καιρικές συνθήκες, σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και σε νυχτερινές επιχειρήσεις. Οι υπέρυθρες κάμερες μπορούν να λειτουργούν χωρίς να παρεμποδίζονται από τον καπνό και έτσι στέλνουν αξιόπιστες και ακριβείς πληροφορίες για την εξέλιξη της πυρκαγιάς.

Ήδη στη χώρα μας, ειδικά μετά την καταστροφική πυρκαγιά στο Μάτι, άρχισαν να χρησιμοποιούνται UAVs από την Πυροσβεστική Υπηρεσία για παρακολούθηση μετώπων φωτιάς και υποβοήθηση του συντονισμού των επίγειων μονάδων. Έχουν, επίσης, ήδη παρουσιαστεί υλοποιήσεις με δυνατότητες κατάσβεσης πυρκαγιών σε ψηλά ή δύσβατα σημεία, κυρίως σε αστικό περιβάλλον [25].

#### **2.1.2.5 Έρευνα και Διάσωση**

Στον τομέα της έρευνας και της διάσωσης (Search And Rescue-SAR), τα UAVs εξοπλισμένα με ευρυγώνιες κάμερες για ευκολότερο εντοπισμό και με χρήση θερμικών καμερών, αποτελούν έναν πολύτιμο βοηθό για τις διασωστικές ομάδες, σε καταστάσεις όπου κάθε λεπτό, που περνά είναι μείζονος σημασίας.

Περιοχές δύσβατες, απόκρημνες και απροσπέλαστες μπορούν μέσα σε λίγα μόνο λεπτά, κατά τη διάρκεια της ημέρας αλλά και της νύχτας, να διερευνηθούν από τα UAVs για άτομα, που έχουν ανάγκη για βοήθεια, ανιχνεύοντας, ακόμη και σήματα από κινητά τηλέφωνα θυμάτων με σκοπό να εντοπίσουν πιθανούς επιζώντες [28], μειώνοντας δραστικά τον χρόνο απόκρισης των σωστικών συνεργείων και παρέχοντας τη δυνατότητα σε ορισμένες περιπτώσεις να παραδώσουν φάρμακα ή κουτί πρώτων βοηθειών. Οι επιχειρήσεις έρευνας και διάσωσης περιορίζονται από τη πιθανότητα απώλειας ανθρώπινης ζωής, εάν δεν εκτελεστούν με ταχύτητα. Προς τούτο, η χρήση σμήνους από UAVs θεωρείται επιβεβλημένη, αφού έχει χαμηλό

κόστος, ευκινησία και ικανότητα να καλύπτει μεγάλες γεωγραφικές περιοχές και να προσπελαύνει κατοικήσιμες περιοχές [26], [62].

#### **2.1.2.5.1 Θαλάσσιες διασώσεις**

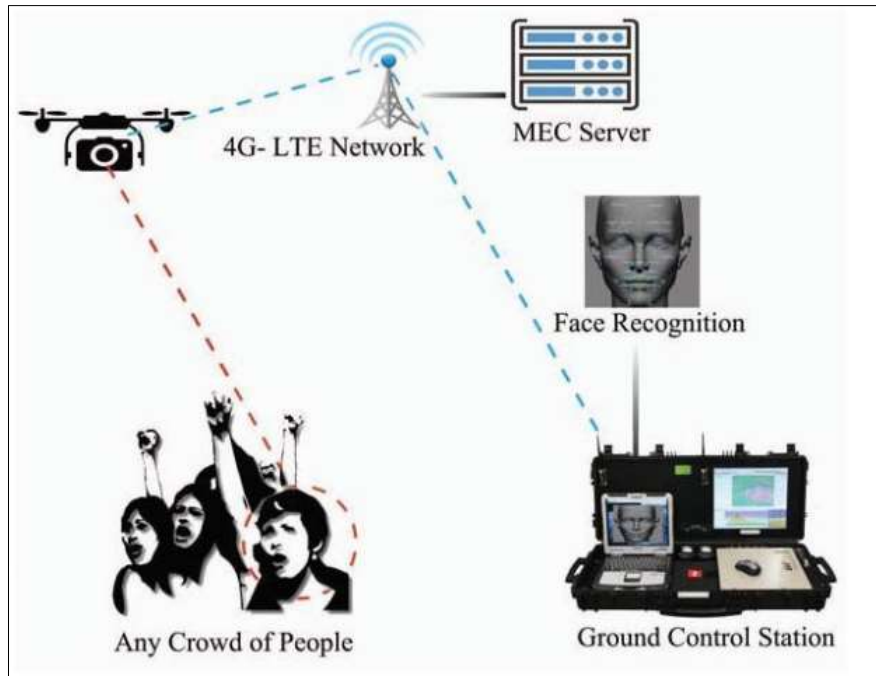
Τα UAVs μπορούν να τεθούν και στην υπηρεσία της θαλάσσιας επιτήρησης και διάσωσης, βοηθώντας ανθρώπους, που κινδυνεύουν ακόμη και στη θάλασσα. Στόχος είναι να εντοπίζουν τους κινδυνεύοντες και να καταφθάνουν δίπλα τους σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, προσφέροντάς τους τα απαραίτητα σύνεργα για τη διάσωσή τους [63], [64], μέχρι να καταφθάσουν τα σωστικά συνεργεία.

#### **2.1.2.5.2 Τα UAVs στην υπηρεσία της αστυνομίας**

Ήδη σε πολλές χώρες του κόσμου, όπως στον Καναδά, στις Η.Π.Α., στην Ινδία, στη Γερμανία, στο Ηνωμένο Βασίλειο, οι αστυνομικές αρχές χρησιμοποιούν τις υπηρεσίες των UAVs, τα οποία αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για την εξάσκηση και επιβολή του νόμου, αφού καθοδηγούνται από απόσταση χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο ο ανθρώπινος παράγοντας. Οι θερμικές κάμερες με τις οποίες είναι εξοπλισμένα, τα καθιστούν ικανότατα εργαλεία εντοπισμού ανθρώπων σε απόμακρες ή δυσπρόσιτες τοποθεσίες [65]. Στη Μεγάλη Βρετανία [66] το Φεβρουάριο του 2018, σύμφωνα με το BBC, άνθρωπος, που αναζητούνταν μετά από ατύχημα, εντοπίστηκε σε απομονωμένο δρόμο, με τη συμβολή ενός UAV, μέσα σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και του παρασχέθηκαν οι πρώτες βοήθειες.

Άλλες αποστολές των αστυνομικών αρχών, στις οποίες τα UAVs έχουν ενεργό ρόλο είναι η εναέρια επιτήρηση συνόρων, ο έλεγχος προσφυγικών ροών σε θαλάσσιο χώρο, η παρακολούθηση ύποπτου οχήματος, η παρακολούθηση και ο έλεγχος του πλήθους σε συναυλίες, παρελάσεις, αθλητικά γεγονότα, η επιτήρηση αστικών ή μη περιοχών για την εύρεση αγνοουμένων ή καταδίωξη εγκληματιών. Τα UAVs ίπτανται πάνω από το επιτηρούμενο πλήθος και εποπτεύουν, δίνοντας πληροφορίες στις αστυνομικές αρχές για την κατάστασή του. Όταν υπάρξει ύποπτη κινητικότητα ή αναταραχές ειδοποιούνται οι επίγειες αστυνομικές δυνάμεις για περαιτέρω έρευνα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας στην αναγνώριση προσώπου, είναι

δυνατή και η ταυτοποίηση υπόπτων ακόμα και αν βρίσκονται μέσα σε ένα πλήθος ανθρώπων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2.



**Εικόνα 2.2:** Σενάριο ελέγχου πλήθους με UAV [25]

Άλλη εφαρμογή των UAVs από τις αστυνομικές αρχές είναι και η συνδρομή τους στον εντοπισμό και έλεγχο ύποπτων αντικειμένων (για παράδειγμα αντικείμενα, που έχουν αναφερθεί ως βόμβες ή η προσέγγιση σε περιοχές με επικίνδυνες διαρροές), η παρακολούθηση και ο έλεγχος της κυκλοφορίας στους δρόμους, οι εγκληματολογικές έρευνες.

Είναι σαφές, ότι όταν τα UAVs χρησιμοποιούνται σε δημόσιους χώρους εγείρονται θέματα νομικά και κανονιστικά, σχετικά με την προστασία της ιδιωτικής ζωής, αλλά και την ορθολογιστική χρήση τους από τις αρχές, που θα πρέπει να ρυθμιστούν [65], [25], [33].

### 2.1.3 Πρόγνωση Καιρού

Τα UAVs, χρησιμοποιούνται για επιθεωρήσεις και επιτήρηση από αέρος, ως εκ τούτου είναι δυνατόν να ανταποκριθούν στην μετεωρολογική πρόβλεψη σοβαρών και επικίνδυνων αλλαγών στον καιρό, στην πρόγνωση έντονων σχηματισμών καταιγίδας αναμεταδίδοντας τις πιο ακριβείς πληροφορίες, με αποτέλεσμα να διασώζονται ανθρώπινες ζωές. Όταν τέτοιου είδους

προγνώσεις ανακοινώνονται έγκαιρα και έγκυρα, υπάρχει ο απαραίτητος χρόνος για να γίνουν οι απαραίτητες άμεσες δράσεις. Επιπλέον, τα UAVs, αφού είναι μη επανδρωμένα, έχουν το πλεονέκτημα, να μην θέτουν σε κίνδυνο τη ζωή κάποιου πιλότου [33], [67].

Στο μεταξύ, η σταθερή ανάπτυξη και βελτίωση των UAVs θα αυξήσει, όλο και περισσότερο, το πλήθος των καιρικών δεδομένων, αλλά και των αλλαγών στην ατμόσφαιρα, που μπορούν να συλλέξουν. Θα μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιούνται για να εκτιμήσουν σε πραγματικό χρόνο και σε μέρη, που δεν παρακολουθούνταν στο παρελθόν. Τα UAVs μπορούν να συμβάλουν στην πρόβλεψη του καιρού και σε περιοχές στις οποίες δεν μπορεί να φτάσει ο επίγειος εξοπλισμός [33], [67].

Τα UAVs εξοπλίζονται με διάφορους αισθητήρες, οι οποίοι ρίχνονται στον ουρανό με σκοπό καθώς πέφτουν να συλλέξουν δεδομένα, όπως θερμοκρασία, υγρασία, ταχύτητα ανέμου, πίεση και κατεύθυνση. Οι αισθητήρες ονομάζονται Dropsondes, είναι σχεδιασμένοι πάνω σε μικρά αλεξίπτωτα και συλλέγουν τα δεδομένα καθώς πέφτουν. Είναι εφικτό τα δεδομένα να δρομολογούνται προς το σταθμό εδάφους σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στους επιστήμονες όχι μόνο να προβλέψουν την κατεύθυνση της καταιγίδας αλλά και την ταχύτητα του ανέμου και τη θερμοκρασία [67].

#### **2.1.4 Ιατρική και υγεία**

Τα UAVs έχουν αποδειχθεί στο παρελθόν ότι είναι ένας καινοτόμος τρόπος μεταφοράς βασικών προϊόντων υγείας σε δυσπρόσιτες περιοχές. Για παράδειγμα, από τον Ιούλιο του 2019 έως τον Φεβρουάριο του 2020, το πρόγραμμα της USAID, Global Health Supply Chain Program-Procurement Supply Management (GHSC-PSM) χρησιμοποίησε ένα UAV για να διανείμει δείγματα για διάγνωση ιικού φορτίου ή φυματίωσης και τα αποτελέσματα, προς και από απομακρυσμένες περιοχές στο Malawi της Αφρικής. Μέχρι το τέλος του προγράμματος GHSC-PSM, το UAV είχε διανύσει 12.250 μίλια σε 428 πτήσεις, που μετέφεραν φάρμακα, ιατρικές προμήθειες, δείγματα και αποτελέσματα ελέγχων μικροβιολογικών εργαστηρίων [68].



Τα UAVs χρησιμοποιούνται σε πολλές χώρες. Αρκετά σχετικά έργα έχουν ξεκινήσει στην Αφρική, όπως προαναφέραμε, επειδή οι κανονισμοί είναι λιγότερο αυστηροί από ότι στις Ευρωπαϊκές χώρες και ως εκ τούτου είναι λιγότερο περίπλοκο και επιτυγχάνεται πιο γρήγορα η λήψη εξουσιοδότησης από τις τοπικές αρχές για τη διεξαγωγή δοκιμών ή την επίτευξη δικτύου.

Ένα άλλο παράδειγμα στο Malawi της Αφρικής. Η UNICEF (United Nations Children's Fund), η υπηρεσία των Ηνωμένων Εθνών, που εργάζεται για τη βελτίωση της ζωής των παιδιών σε όλο τον κόσμο, έχει αρχίσει να ελέγχει σύστημα μεταφοράς με UAVs, που εξετάζει δείγματα αίματος βρεφών για τον ιό της ανθρώπινης ανοσοανεπάρκειας (Human Immunodeficiency Virus-HIV), σε συνεργασία με τις τοπικές αρχές. Το έργο έχει ως σκοπό να ελαχιστοποιήσει το χρόνο μεταφοράς των δειγμάτων αίματος μεταξύ των τοποθεσιών όπου λαμβάνονται τα δείγματα και των εργαστηρίων όπου αναλύονται [69].

Στις μέρες μας, η παρουσία του COVID-19 έχει αναγκάσει την παγκόσμια κοινότητα στην υλοποίηση μέτρων, που επεκτείνουν τη χρήση των UAVs σε πολιτικές και εμπορικές εφαρμογές. Κατά την περίοδο του περιορισμού και εγκλεισμού, ως συνέπεια της πανδημίας, αυτή η γνώση έχει γίνει σύμμαχος στη μάχη ενάντια της πανδημίας [69].

Για παράδειγμα, η πανδημία του κορωνοϊού επέβαλε τη χρήση των UAVs και για διανομή φαγητού. Η Κινέζικη εταιρεία ηλεκτρονικού εμπορίου JD.com έχει αξιοποιήσει την ομάδα των UAVs, που κατέχει για τη διανομή φαγητού. Δέκα λεπτά πτήσης με τα UAVs ισοδυναμούν με μία ώρα μετακίνησης με τροχοφόρο μέσο για να παραδοθούν οι παραγγελίες στους πελάτες χρησιμοποιώντας το οδικό δίκτυο. Βέβαια, για την εκτέλεση των πτήσεων επιβάλλεται η λήψη εξουσιοδότησης και επιβεβαίωσης από τις τοπικές αρχές [69].

Τα UAVs απετέλεσαν μιας ζωτικής σημασίας τεχνολογία, αφού κατάφεραν εν μέσω πανδημίας να εποπτεύσουν δημόσιους χώρους, να μεταδώσουν μηνύματα από μεγάφωνα για να διασκορπίσουν ανθρώπους σε συγκεντρώσεις, να εντοπίσουν επικίνδυνες δραστηριότητες, να απολυμάνουν μεγάλους χώρους.

Η ιχνηλάτηση ασθενών είναι ένας άλλος τομέας, που τα UAVs μπορούν να συνεισφέρουν. UAVs με θερμικές κάμερες λαμβάνουν τη θερμοκρασία κάθε ατόμου βοηθώντας στη διαχείριση της πανδημίας.

### **2.1.5 Μεταφορά φορτίων**

Η μεταφορά και η διανομή αγαθών είναι ακόμη μια εφαρμογή των UAVs. Το 2014, τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα ανακοίνωσαν τα σχέδιά τους να παρέχουν υπηρεσίες διανομής επίσημων, δημόσιων εγγράφων συμπεριλαμβανομένων διαβατηρίων, δελτίων αστυνομικής ταυτότητας και αδειών στους αιτούντες, χρησιμοποιώντας UAVs. Επιπλέον, η Amazon Prime Air ολοκλήρωσε με επιτυχία την πρώτη διανομή δέματος στο Cambridge του Ηνωμένου Βασιλείου, το Δεκέμβριο του 2016. Εκτός από τους τομείς της υγείας και της διατροφής, όπου τα UAVs συμμετέχουν ενεργά για διανομές αγαθών, αξιοποιούνται και για ταχυδρομικές υπηρεσίες. Συνήθως, για τη μεταφορά του φορτίου αρκεί ένα UAV. Υπάρχουν, όμως, και περιπτώσεις όπου περισσότερα από ένα UAVs θα πρέπει να συνεργαστούν [26].

### **2.1.6 UAVs και Έξυπνες Πόλεις**

«Σύμφωνα με την Παγκόσμια Ένωση Τηλεπικοινωνιών (International Telecommunications Union - ITU), έξυπνη ορίζεται η πόλη, που κάνει εκτενή και έξυπνη χρήση των Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών – ΤΠΕ προκειμένου να γίνουν οι υποδομές της και τα κρίσιμα συστατικά της (διοίκηση, εκπαίδευση, υγεία, ασφάλεια, μεταφορά, ενέργεια, νερό, έλεγχος περιβάλλοντος και προστασία) ευφυέστερα, διασυνδεδεμένα και αποδοτικά για τη βελτίωση της καθημερινής ζωής των κατοίκων. Προσβλέπει στην ανάπτυξη των βασισμένων στη γνώση κοινοτήτων, στη συρρίκνωση της ψηφιακής διάρεσης σε μια πόλη και στην απλοποίηση της δημόσιας και ιδιωτικής παροχής υπηρεσιών σε όλες τις περιοχές των πόλεων [70]».

«Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση, ως έξυπνη ψηφιακή πόλη ορίζεται ένα μέρος, όπου τα παραδοσιακά δίκτυα και οι υπηρεσίες, μπορούν να γίνουν πιο αποτελεσματικά με τη χρήση των ψηφιακών τεχνολογιών και των τηλεπικοινωνιών, προς όφελος των κατοίκων και των επιχειρήσεων της. Στις έξυπνες ψηφιακές πόλεις, οι ψηφιακές τεχνολογίες μεταφράζονται σε

καλύτερες δημόσιες υπηρεσίες για τους πολίτες και καλύτερη χρήση των πόρων με τις ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον [70]».

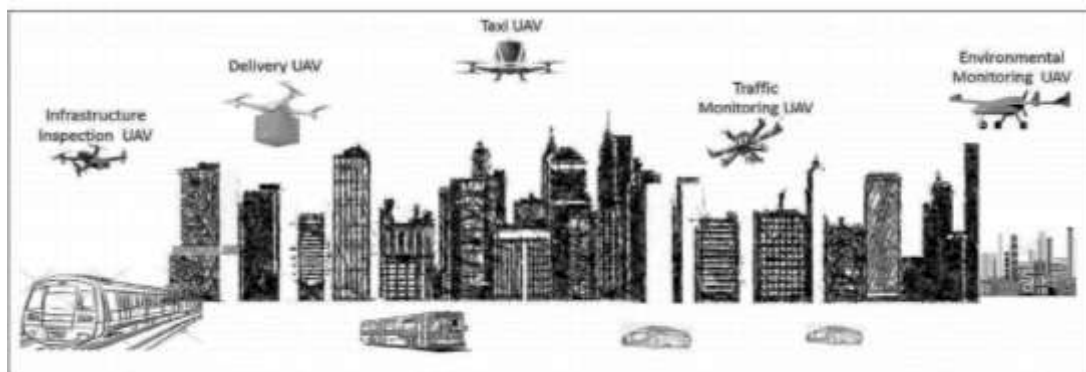
Με άλλα λόγια, έξυπνη είναι μια πόλη, που διαθέτει ανοικτά τα δεδομένα της για την κίνηση των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς, γεγονός που επιτρέπει σε οποιονδήποτε να αναπτύξει μια εφαρμογή ειδοποιήσεων στο κινητό για την ώρα άφιξής τους ή για τις υπηρεσίες του δήμου όπου βρίσκεται κάποιος. Έξυπνη είναι η πόλη, που παρέχει στους πολίτες τη δυνατότητα να αναφέρουν με άμεσο τρόπο καθημερινά προβλήματα – όπως, για παράδειγμα, μια διαρροή στο δρόμο - και να παρακολουθήσουν την εξέλιξη της επίλυσής τους. Έξυπνη είναι η πόλη στην οποία ζητήματα του δήμου μπορούν να συζητηθούν διαδικτυακά μέσω μιας ανοικτής δημόσιας διαβούλευσης. Έξυπνη είναι η πόλη, που βοηθά τον επιχειρηματία να προωθήσει τις υπηρεσίες του και να συμβάλει στην οικονομική ανάπτυξη του τόπου του.

Για να υλοποιηθούν τα παραπάνω, χρειάζεται να συνεργαστούν φορείς δημοσίου συμφέροντος με εμπειρία στην ανάπτυξη ανοικτών τεχνολογιών και εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος των ανοικτών δεδομένων και, κυρίως, των ανοικτών υπηρεσιών της πόλης για τους πολίτες της [72].

Μία έξυπνη πόλη θα πρέπει να επιτύχει σε έξι διακριτούς τομείς, οι οποίοι είναι οι εξής [70]: Έξυπνη οικονομία, έξυπνοι άνθρωποι, έξυπνη διακυβέρνηση, έξυπνη κινητικότητα, έξυπνο περιβάλλον και έξυπνη διαβίωση. Αναγκαία προϋπόθεση για την επιτυχία στους παραπάνω τομείς, είναι πρωταρχικά, η ύπαρξη πολιτικής και ατομικής βούλησης των ατόμων, που αποτελούν μέρος της πόλης και δεύτερον η δημιουργία του κατάλληλου τεχνολογικού επιπέδου, που θα συντελέσει ουσιαστικά στην υλοποίηση της έξυπνης πόλης [25].

Τα UAVs μπορούν να εμπλακούν σε μια μεγάλη ποικιλία εφαρμογών και λειτουργιών σε μια έξυπνη πόλη, παρέχοντας υπηρεσίες και ευκαιρίες, που ωφελούν μια έξυπνη πόλη. Κάποιες από αυτές τις εφαρμογές είναι ο έλεγχος της κυκλοφορίας, η παρακολούθηση περιβαλλοντικών στοιχείων, η επιτήρηση δημοσίων χώρων σε αστικό περιβάλλον, οι μεταφορές αντικειμένων, ακόμη και η συλλογή δεδομένων για την κατάσταση των κάδων απορριμμάτων.

Ενδεικτικά αυτές οι εφαρμογές παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.3. Και όλα αυτά επιτυγχάνονται με ένα καλά δομημένο δίκτυο υποδομών, με τεχνολογίες cloud και fog computing, IoT, ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, κ.α. [25], [71].



**Εικόνα 2.3:** Εφαρμογές UAVs σε έξυπνη πόλη [25]

#### **2.1.5.1 Διαχείριση κυκλοφορίας**

Η παρακολούθηση της κυκλοφορίας στους δρόμους είναι μία εφαρμογή στην οποία τα UAVs, μπορούν να ενεργοποιηθούν σε μια έξυπνη πόλη, αντικαθιστώντας εντατική ανθρώπινη εργασία, χωρίς να υπάρχουν εγκατεστημένες περίπλοκες υποδομές. Τροχιές/διαδρομές μετριοούνται και αναλύονται με τη βοήθεια των UAVs. Τυχόν συγκρούσεις ανιχνεύονται και αναφέρονται εύκολα. Επίσης, βιντεολήψεις σε πραγματικό χρόνο της κυκλοφορίας στο οδικό δίκτυο, αλλά και στο σιδηροδρομικό είναι δυνατόν να φανούν χρήσιμες για θέματα ασφάλειας, αλλά και για τη διαχείριση της κυκλοφορίας [28], [65], [71].

#### **2.1.5.2 Διαχείριση πλήθους**

Τα UAVs συμβάλλουν στην έξυπνη αστυνόμευση σε μια έξυπνη πόλη παρακολουθώντας, διακριτικά, τηρουμένων των κανονισμών, οποιοδήποτε πλήθος χρειαστεί κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος. Με τη συνεργασία των ασύρματων δικτύων, ο στόχος είναι μια έξυπνη πόλη συνεπικουρούμενη από τα UAVs να γίνει και μία ασφαλής πόλη [71].

#### **2.1.5.3 Έλεγχος και παρακολούθηση φυσικών καταστροφών**

Η αξιοποίηση των UAVs από τις αρχές σε μια έξυπνη πόλη σε καταστάσεις φυσικών καταστροφών (πλημμύρες, πυρκαγιές, σεισμοί) όπως

προαναφέραμε, μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα να ληφθούν προληπτικά μέτρα από τις αρχές με τη συνεχή επόπτευση και παρακολούθηση, καθώς και να αναπτυχθεί γρήγορα ομάδα ανταπόκρισης σε περίπτωση καταστροφής. Τα UAVs μπορούν να παρέχουν τα απαιτούμενα δεδομένα για την ανάλυση και εκτίμηση της εκάστοτε κατάστασης, αφού μπορούν να διεισδύσουν και σε περιοχές, όπου οι άνθρωποι δεν μπορούν να μεταβούν λόγω επικινδυνότητας [71].

#### **2.1.5.4 Μεταφορά φορτίων**

Η μεταφορά και η διανομή αγαθών από τα UAVs είναι μια εφαρμογή, που μπορεί να υλοποιηθεί σε μια έξυπνη πόλη. UAVs, που μεταφέρουν διαφόρων ειδών φορτία δραστηριοποιούνται, ήδη, σε πόλεις του κόσμου. Στην πραγματικότητα, στο όχι πολύ μακρινό μέλλον, τα UAVs, που μεταφέρουν φορτία θα γίνουν αποδεκτά τμήματα των δικτύων εφοδιασμού των έξυπνων πόλεων με εμφανή πλεονεκτήματα την αποφυγή κυκλοφοριακής συμφόρησης κατά την κίνησή τους, καθώς και της παραγωγής ρύπων. Βέβαια, για να λειτουργήσει η διαδικασία μεταφοράς, αποτελεσματικά και αποδοτικά θα πρέπει να ενσωματωθεί στο δίκτυο ολόκληρης της πόλης [73].

#### **2.1.5.5 Επιθεώρηση υποδομών**

Η οπτική επιθεώρηση από ένα ή περισσότερα UAVs δυσπρόσιτων εγκαταστάσεων και κατασκευών, όπως, δεξαμενές, ανεμογεννήτριες, καμινάδες, γέφυρες, πυλώνες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, κτίρια και οροφές είναι μία γρήγορη και με συνειδητό κόστος μέθοδος, που δύναται να εφαρμοστεί σε μια έξυπνη πόλη συνεισφέροντας στην εξάλειψη της επικινδυνότητας και την αποφυγή πρόκλησης ατυχημάτων, προς τα άτομα, που θα αναλάμβαναν αυτού του είδους τις επιχειρήσεις, χωρίς τη συνδρομή των UAVs [74].

#### **2.1.5.6 Μέτρηση ρύπων**

Τα UAVs μπορούν να εξοπλιστούν με αισθητήρες ατμοσφαιρικής ρύπανσης, με σκοπό να εκτελέσουν μετρήσεις. Τα UAVs πετούν αυτόνομα σε όλη την περιοχή στόχο για να συλλέξουν πληροφορίες για το επίπεδο της ρύπανσης

και επιστρέφουν στη βάση με τις ληφθείσες μετρήσεις. Με τη χρήση ειδικών χαρτών, οι ειδικοί χαρακτηρίζουν τα επίπεδα των ρύπων. Αυτή η ιδέα, θα μπορούσε να επεκταθεί στην περίπτωση της έξυπνης πόλης, ανιχνεύοντας με τη συνεργασία UAVs και ετερογενών αισθητήρων [28].

### **2.1.7 Τα UAVs προστατεύουν το περιβάλλον και τη φύση**

Τα UAVs αποτελούν ένα σύμμαχο στην αναδάσωση. Με τη βοήθειά τους, εξειδικευμένες εταιρείες δενδροφυτεύουν τεράστιες εκτάσεις γης. Τρία UAVs μπορούν να δενδροφυτέψουν μια περιοχή έξι φορές πιο γρήγορα από ότι ένα σύνθετο συνεργείο αποτελούμενο από ανθρώπους. Τα UAVs έχουν τη δυνατότητα να έχουν πρόσβαση σε δύσβατες περιοχές για τους ανθρώπους και έτσι έχουν πιο γρήγορο χρόνο απόκρισης.

Η διαδικασία είναι η εξής: πρώτα από όλα αποστέλλεται ένα UAV για τρισδιάστατη σάρωση της περιοχής. Ειδικό λογισμικό αναλύει τα δεδομένα της σάρωσης της περιοχής και επιλέγει τις πιο κατάλληλες τοποθεσίες για την τοποθέτηση των σπόρων. Δημιουργούνται διαδρομές πτήσης και ένα σύνολο από UAVs εξαπολύεται για τη διανομή αγγείων, που περιέχουν εκτός των σπόρων και λίπασμα καθώς και ουσίες που αποτρέπουν τα τρωκτικά [75], [76].

Η συνδρομή των UAVs μπορεί να φανεί αποτελεσματική και στον τομέα της προστασίας των άγριων ζώων. Με το παράνομο κυνήγι άγριων ζώων, που πολλές φορές δεν μπορεί να ελεγχθεί πλήρως, τεράστιοι πληθυσμοί ζώων αφανίζονται. Το Mara Elephant Project, που υλοποιείται στην Κένυα, βασίζεται στην ιδέα της προστασίας των ελεφάντων από παράνομους κυνηγούς με τη χρήση UAVs. Οι φύλακες, που είναι υπεύθυνοι για την προστασία των ελεφάντων σε περιοχές της Κένυα, χρησιμοποιούν UAVs με κάμερες για να παρακολουθούν παράνομους κυνηγούς οι οποίοι όταν εντοπιστούν, στρατός από UAVs σπεύδει να τρομάξει τους ελέφαντες και να τους διώξει μακριά για να γλιτώσουν από τα όπλα των κυνηγών [65], [76].

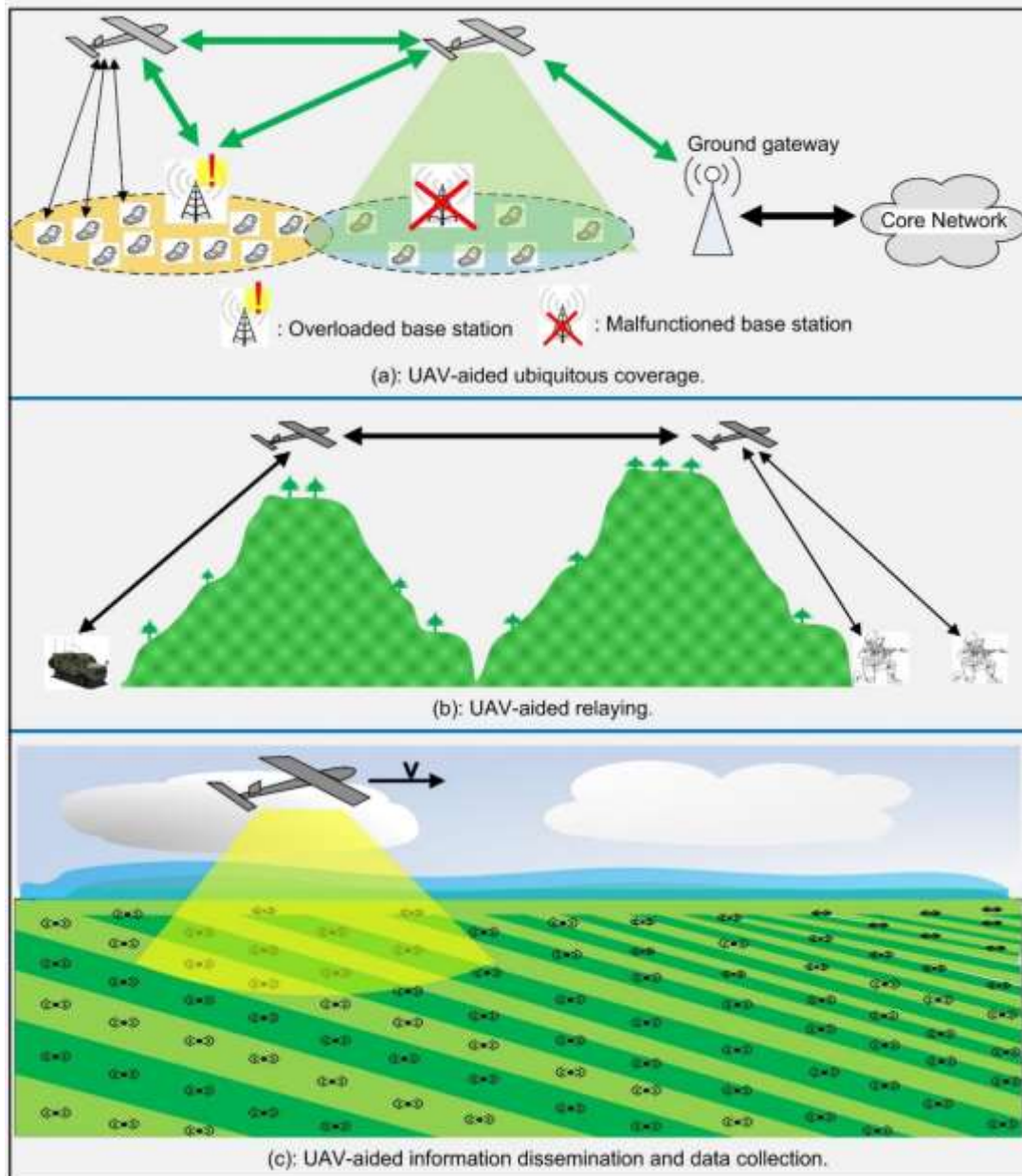
### **2.1.8 Κάλυψη δικτύου και τηλεπικοινωνιών**

Σε περιπτώσεις που είναι δύσκολη ή ασύμφορη η δημιουργία τηλεπικοινωνιακών υποδομών, π.χ. σε φυσικές καταστροφές ή πολεμικές

επιχειρήσεις, μπορεί να υποκατασταθεί εύκολα και γρήγορα από σμήνη μη επανδρωμένων ιπτάμενων οχημάτων, που ο ρόλος τους είναι η αναμεταβίβαση της πληροφορίας από το ένα άκρο στο άλλο και η σύνδεση διακοπτόμενων υποδικτύων, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.4.

Στην Εικόνα 2.4 περιγράφονται τρεις τυπικές περιπτώσεις ασύρματων επικοινωνιών υποβοηθούμενων από UAVs.

- (α) Κάλυψη με τη βοήθεια UAVs, όπου UAVs αναπτύσσονται για να βοηθήσουν την υπάρχουσα επικοινωνιακή υποδομή. Δύο παραδείγματα είναι η ταχεία επιδιόρθωση και ανάκτηση των υπηρεσιών μετά από μερική ή ολική καταστροφή της υποδομής λόγω φυσικών καταστροφών ή εκφόρτωσης (offloading) του σταθμού βάσης σε εξαιρετικά πολυπληθείς συγκεντρώσεις, για παράδειγμα σε ένα στάδιο κατά τη διάρκεια αθλητικού γεγονότος.
- (β) Αναμετάδοση υποβοηθούμενη από UAVs, όπου UAVs αναπτύσσονται για να παρέχουν ασύρματη συνδεσιμότητα μεταξύ δύο ή περισσότερων χρηστών ή ομάδων χρηστών, που δεν διαθέτουν αξιόπιστες απευθείας συνδέσεις επικοινωνίας, για παράδειγμα μεταξύ της πρώτης γραμμής και του κέντρου εντολών για αποκρίσεις έκτακτης ανάγκης.
- (γ) Διάδοση πληροφοριών και συλλογή δεδομένων με τη βοήθεια UAVs, όπου UAVs αποστέλλονται για τη διάδοση (ή τη συλλογή) πληροφοριών προς (από) ένα μεγάλο αριθμό κατανεμημένων ασύρματων συσκευών, όπως για παράδειγμα ασύρματους αισθητήρες σε εφαρμογές γεωργίας ακριβείας.



**Εικόνα 2.4:** Τρεις τυπικές περιπτώσεις ασύρματων επικοινωνιών υποβοηθούμενων από UAVs [78]

Υπάρχει, βέβαια, μεγάλο πεδίο έρευνας ειδικά στα πρωτόκολλα επικοινωνίας, που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν, αφού το περιβάλλον υψηλής κινητικότητας των UAVs, με τους κόμβους να είναι αραιά συνδεδεμένοι, έχει ως αποτέλεσμα υψηλά δυναμικές τοπολογίες δικτύου. Μία κύρια πρόκληση πηγάζει από τους περιορισμούς των UAVs στο μέγεθος, το βάρος και την ισχύ (size, weight, and power - SWAP), που θα μπορούσαν να περιορίσουν τις δυνατότητες επικοινωνίας, υπολογισμού και αντοχής τους. Απαιτούνται



μηχανισμοί ανάπτυξης και λειτουργίας για έξυπνη χρήση και αναπλήρωση της ενέργειας των UAVs [25], [77], [78].

### **2.1.9 Στρατιωτικές Εφαρμογές**

Λαμβάνοντας υπόψιν την πολυπλοκότητα και την επικινδυνότητα του σύγχρονου πεδίου μάχης, η χρήση των UAVs σε στρατιωτικές επιχειρήσεις είναι υποχρεωτική.

Η χρήση των UAVs στις στρατιωτικές επιχειρήσεις αφορά, αρχικά, την πληροφόρηση, επιτήρηση, απόκτηση στόχων και αναγνώριση στο πεδίο της μάχης. Τα UAVs έχουν μειώσει σημαντικά την επικινδυνότητα, που προκύπτει από τη συλλογή στοιχείων με άλλους τρόπους στο χώρο της μάχης.

Μία άλλη χρήση των UAVs, που είναι και πολύ διαδεδομένη, είναι να μεταφέρουν οπλισμό για να επιτίθενται σε στόχους. Τα μαχητικά UAVs είναι ικανά να εξουδετερώνουν στόχους βαθιά στο πεδίο της μάχης με ακρίβεια και με ελάχιστες παράπλευρες απώλειες. Έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε μάχες στο Αφγανιστάν, το Πακιστάν, την Υεμένη και σε άλλα πεδία μάχης.

Τέλος, στα στρατιωτικά UAVs θα συναντήσουμε και UAVs πολλαπλών σκοπών, που φέρουν πάνω τους κατάλληλους αισθητήρες για επιτήρηση και αναγνώριση αλλά και μεταφέρουν ταυτόχρονα πυρομαχικά ή άλλου είδους οπλισμό [79].

### **2.1.10 Εναέρια φωτογράφιση**

Τα UAVs χρησιμοποιούνται, ακόμη, και για τη λήψη βίντεο, σε δύσκολες σκηνές, που διαφορετικά θα απαιτούσαν τη χρήση ακριβών ελικοπτερών αλλά και γερανών για να διεκπεραιωθούν. Οι γρήγορες σκηνές δράσης μαγνητοσκοπούνται από UAVs, διευκολύνοντας έτσι τις διαδικασίες. Τα UAVs χρησιμοποιούνται, επίσης, στη λήψη φωτογραφιών ακινήτων αλλά και σε αθλητικά γεγονότα. Επιπλέον, οι δημοσιογράφοι εξετάζουν τη χρήση UAVs για τη συλλογή βίντεο και πληροφοριών σε ζωντανές μεταδόσεις [54].

### **2.1.11 Ψυχαγωγία**

UAVs σε σμήνη θα δούμε να συνεργάζονται και για ψυχαγωγικούς σκοπούς, π.χ. στην Εικόνα 2.5, UAVs διαμορφώνουν τρισδιάστατες κινούμενες χριστουγεννιάτικες παραστάσεις στον ουρανό.

Στις 29/3/2021, η εταιρεία Genesis Motors για να γιορτάσει την επίσημη είσοδό της στην αγορά της Κίνας, χρησιμοποίησε 3.281 κινούμενα, φωτισμένα UAVs για να δημιουργήσει το έμβλημα της εταιρείας στον ουρανό της Σανγκάι, κερδίζοντας παγκόσμιο ρεκόρ στο βιβλίο Guinness στην κατηγορία “Τα περισσότερα UAVs στον αέρα ταυτόχρονα” [81].



**Εικόνα 2.5:** Τρισδιάστατες κινούμενες παραστάσεις με UAVs [80]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 Δίκτυα UAVs – FANETs

Η χρήση των UAVs, έχει γίνει πολύ δημοφιλής στις μέρες μας και έχει υλοποιηθεί με επιτυχία στην ακαδημαϊκή έρευνα, σε πολιτικές, αλλά και στρατιωτικές εφαρμογές. Τα UAVs λειτουργούν με διαφορετικούς βαθμούς αυτονομίας, είτε με έλεγχο απομακρυσμένα από χειριστή, που βρίσκεται σε ένα επίγειο σταθμό, είτε διαμέσω ενός πλήρως αυτόνομου ενσωματωμένου υπολογιστή στο UAV. Για δεκαετίες, συστήματα, που περιλάμβαναν ένα μόνο UAV, που επικοινωνούσε απευθείας με υποδομή επίγειου σταθμού ελέγχου, χρησιμοποιούνταν για να ολοκληρώσουν αποστολές. Για να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα με τον ελεγκτή στο έδαφος, το UAV θα έπρεπε να είναι εξοπλισμένο με περίπλοκα συστήματα υλικού. Παρόλα αυτά, μια ενδεχόμενη αποτυχία του ενός και μοναδικού UAV, σήμαινε και τον τερματισμό της αποστολής [26].

Λόγω των εξελίξεων στα ενσωματωμένα συστήματα και τις τεχνολογίες ασύρματων επικοινωνιών, μαζί και με την τάση για ολοκλήρωση, είναι τώρα δυνατό να χρησιμοποιηθούν πολλαπλάσια μικρά συστήματα UAVs σε χαμηλό κόστος. Ένα σύστημα πολλαπλών UAVs έχει περισσότερα πλεονεκτήματα από ότι ένα σύστημα, που αποτελείται από ένα μόνο UAV, όσον αφορά την αξιοπιστία και τη δυνατότητα επιβίωσης, δηλαδή, εάν ένα UAV αποτύχει σε μια αποστολή, η λειτουργία μπορεί να συνεχιστεί με τα εναπομείναντα UAVs. Επιπλέον, τα συστήματα πολλαπλών UAVs μπορούν να επιτύχουν αποστολές πιο γρήγορα και αποτελεσματικά μέσω της συνεργασίας μεταξύ των UAVs. Όμως, ο σχεδιασμός μιας επιδέξιας αρχιτεκτονικής επικοινωνίας για συστήματα πολλαπλών UAVs είναι ένα δύσκολο έργο [26].

Στη βιβλιογραφία προσδιορίζονται δύο βασικές προσεγγίσεις για την επικοινωνία για συστήματα πολλαπλών UAVs: η κατ' απαίτηση (ad hoc) δικτύωση και η δικτύωση βάσει υποδομής [26].

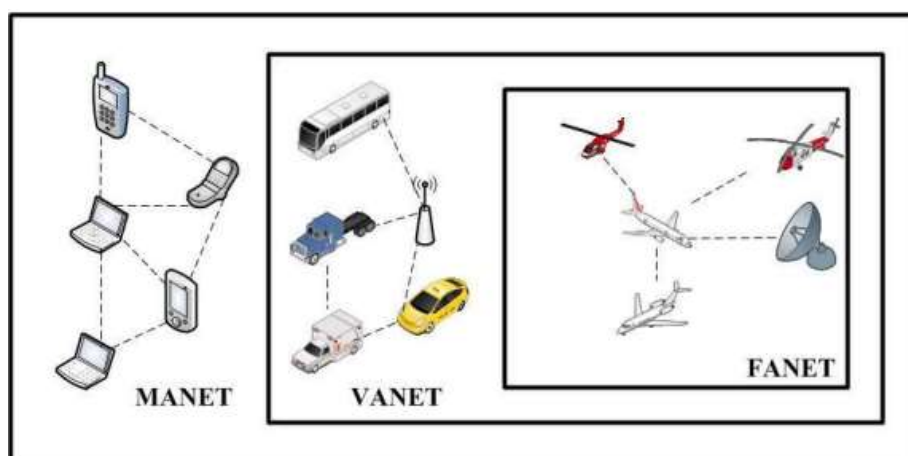
#### 3.1.1 Δικτύωση βάσει υποδομής

Στη δεύτερη προσέγγιση, κάθε UAV συνδέεται με έναν επίγειο σταθμό ή με δορυφόρο έτσι ώστε η επικοινωνία μεταξύ των UAVs να επιτυγχάνεται μέσω ενός από αυτά ενεργώντας ως αναμεταδότης. Όμως, σε αυτή την

προσέγγιση, κάθε UAV απαιτεί υψηλή ισχύ μετάδοσης και μια κατευθυνόμενη κεραία για να διατηρεί τη συνδεσιμότητα με την υποδομή, κάτι το οποίο ενδέχεται να μην είναι εφικτό σε μικρά UAVs λόγω του μεγέθους τους και των περιορισμών του φορτίου. Επιπρόσθετα, κάποιες άλλες προκλήσεις που σχετίζονται με αυτό το μοντέλο δικτύου είναι : θέματα αξιοπιστίας λόγω της κινητικότητας των UAVs και τις συνθήκες δυναμικού περιβάλλοντος, υψηλή καθυστέρηση λόγω της έλλειψης άμεσων επικοινωνιών μεταξύ των UAVs και ο περιορισμός στο εύρος μετάδοσης μεταξύ των UAVs και της υποδομής [26].

### 3.1.2 Δικτύωση κατά απαίτηση (ad hoc)

Για την αποφυγή του περιορισμού του εύρους και για την αντιμετώπιση των άλλων προκλήσεων της αρχιτεκτονικής επικοινωνιών με βάση την υποδομή, εισάγεται η ομαδοποίηση των UAVs με ad hoc τρόπο, δημιουργώντας ένα νέο είδος δικτύωσης, που λέγεται Flying Ad hoc NETWORK. Σε ένα FANET, όλα τα UAVs εγκαθιδρύουν ένα ad hoc δίκτυο και μόνο ένα υποσύνολο των UAVs συνδέεται στην υποδομή, τα άλλα χρησιμοποιούν ενδιάμεσα UAVs για να επικοινωνούν με τον ελεγκτή εδάφους με ένα multi-hop τρόπο. Ένα FANET θεωρείται ένα υποσύνολο ενός ad hoc δικτύου οχημάτων (Vehicular Ad Hoc NETWORK - VANET) (Εικόνα 3.1), το οποίο με τη σειρά του είναι υποσύνολο ενός ad hoc δικτύου κινητής τηλεφωνίας (Mobile Ad hoc NETWORK - MANET). Και τα τρία δίκτυα θεωρούνται δίκτυα ad-hoc, δηλαδή μοναδικά δίκτυα, που εξυπηρετούν μια συγκεκριμένη χρήση ή ανάγκη ή σχεδιασμό [26], [82], [2].



Εικόνα 3.1: MANET, VANET και FANET [82]

Ένα MANET είναι ένα είδος αδόμητου δικτύου, που αποτελείται από αυτόνομες ασύρματες συσκευές χωρίς κορμό/backbone ή υποδομή αλλά με χαρακτηριστικά αυτό-διαμόρφωσης. Ένα MANET εξυπηρετεί πλήθος εφαρμογών, όπως στρατιωτικές επικοινωνίες και επείγουσες επιχειρησιακές συναντήσεις. Το κύριο πλεονέκτημά του είναι η μεταφερτότητα και η κινητικότητα. Οι ευρείες εφαρμογές των MANETs ενεργοποίησαν υποκατηγορίες των τεχνολογιών δικτύωσης ad hoc, όπως τα VANETs και τα FANETs.

Γενικά, αυτά τα δίκτυα έχουν υψηλότερη κινητικότητα και ραγδαίες αλλαγές στην τοπολογία από ότι τα τυπικά MANETs, διότι οι κόμβοι είναι οχήματα και UAVs, αντίστοιχα. Ένα VANET είναι ένα δίκτυο, που υποστηρίζει όχημα-προς-όχημα και όχημα-προς προ-εγκατεστημένη υποδομή. Οι κύριοι σκοποί των VANETs είναι να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα της κυκλοφορίας και την κυκλοφοριακή συμφόρηση, να έχουν πρόσβαση σε πληροφορίες και ειδήσεις για την αποφυγή ατυχημάτων.

Ένα FANET είναι μια ιδιαίτερη κατηγορία ενός MANET με υψηλή ευελιξία. Στα FANETs, οι κόμβοι είναι UAVs. Παρόλο που τα FANETs προέρχονται από τα παραδοσιακά αδόμητα δίκτυα, μπορούν, επίσης, να αναγνωριστούν με σαφήνεια από τα υπάρχοντα αδόμητα δίκτυα με βάση τη χρησιμότητά τους, τις εφαρμογές, την επικοινωνία [27]. Ακολουθούν κάποια κύρια χαρακτηριστικά των FANETs.

### **3.2 Χαρακτηριστικά των FANETs**

Παρόλο που τα FANETs έχουν κοινά χαρακτηριστικά με τα MANETs, όπως η δυνατότητα αυτό-οργάνωσης και η επικοινωνία και συνεργασία μεταξύ των κόμβων χωρίς κεντρική υποδομή, περιλαμβάνουν, όμως, και τα δικά τους χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των FANETs συνοψίζονται στη συνέχεια [26]:

- ✓ Τα χαρακτηριστικά, που αφορούν την κινητικότητα των κόμβων σε ένα FANET, είναι διαφορετικά από εκείνα σε ένα MANET ή VANET. Τα UAVs τυπικά έχουν μια ταχύτητα των 30-460 km/h, η οποία είναι

σχετικά υψηλότερη, συγκρινόμενη με τους κόμβους ενός MANET ή VANET, από την άποψη τόσο του βαθμού κινητικότητας, όσο και της ταχύτητας. Επιπλέον, τα UAVs κινούνται σε τρισδιάστατο χώρο, ενώ οι κόμβοι σε ένα MANET ή VANET κινούνται σε δισδιάστατο χώρο. Λόγω των ραγδαίων αλλαγών στις θέσεις των UAVs και στις διακυμάνσεις στην απόσταση μεταξύ των UAVs, οι συνδέσεις ενδέχεται να σχηματιστούν και να καταστραφούν και αλλαγές στην τοπολογία μπορεί να είναι πιο συχνές. Επιπρόσθετα, αποτυχία ενός UAV (λόγω απώλειας ισχύος, δυσλειτουργίας, ...) επηρεάζει την τοπολογία του δικτύου και μπορεί να προκαλέσει απώλεια της σύνδεσης μεταξύ των UAVs, ενώ μεταδίδεται σημαντική πληροφορία. Έτσι, η δυναμικότητα των UAVs θα αναγκάσει το δίκτυο να οργανώνεται και να αναδιοργανώνεται συχνά. Αυτό δημιουργεί μοναδικές απαιτήσεις δρομολόγησης και επικοινωνίας για τα FANETs.

- ✓ Ο αριθμός των κόμβων στα FANETs είναι σχετικά μικρότερος από ότι στα MANETs ή VANETs, λόγω της μεγάλης απόστασης, που διαχωρίζουν τα UAVs, που μπορεί να εκτείνεται σε πολλά χιλιόμετρα, με αποτέλεσμα την απαίτηση για μεγαλύτερο εύρος μετάδοσης. Συνεπώς, επηρεάζει τους ραδιο-συνδέσμους, τη δομή της κεραίας και τη συμπεριφορά του φυσικού επιπέδου.
- ✓ Οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου στα FANETs και η αποφυγή συγκρούσεων μεταξύ των UAVs, απαιτούν ένα πακέτο να παραδοθεί εντός συγκεκριμένου χρονικού ορίου καθυστέρησης.
- ✓ Τα υπάρχοντα σχήματα κινητικότητας για τα VANETs ή MANETs δεν είναι κατάλληλα για τα FANETs. Τα UAVs στα FANETs κινούνται σε τρεις διαστάσεις και η κίνηση των UAVs είναι συνήθως προκαθορισμένη, ωστόσο μπορεί να αλλάξει λόγω νέων ενημερώσεων της αποστολής ή περιβαλλοντικών συνθηκών. Από την άλλη μεριά, στα FANETs με πλήρως αυτόνομα UAVs, η διαδρομή των UAVs δεν είναι προκαθορισμένη. Ως εκ τούτου, οι αλλαγές στο σχέδιο της πτήσης, οι

γρήγορες και απότομες κινήσεις των UAVs, καθώς, επίσης οι ποικίλοι σχηματισμοί των UAVs, μπορούν να επηρεάσουν το μοντέλο κινητικότητας των FANETs.

- ✓ Στα MANETs και VANETs, η γραμμή της όρασης (Line of Sight -LoS) δεν είναι εύκολα διαθέσιμη, λόγω του ότι οι κόμβοι του δικτύου κινούνται σχετικά κοντά στο έδαφος και επομένως τα εμπόδια είναι πιθανό κοντά στους κόμβους. Η LoS είναι περισσότερο πιθανό να υπάρχει σε περιβάλλοντα FANETs.
- ✓ Συγκρινόμενα με τους κόμβους στα MANETs, τα UAVs στα FANETs τυπικά θεωρούνται ότι έχουν επαρκή ενέργεια και υπολογιστική ισχύ. Αυτό ισχύει διότι, η ενέργεια που απαιτείται για να πετάξει ένα UAV είναι σημαντικά περισσότερη από αυτήν που χρειάζεται για υπολογισμό δεδομένων. Όμως, παραμένει ένα σοβαρό πρόβλημα για τα μίνι και μικρά UAVs, που έχουν περιορισμένη χωρητικότητα ωφέλιμου φορτίου.
- ✓ Λόγω του υψηλού βαθμού δυναμικής κινητικότητας των UAVs, στην πλειοψηφία των εφαρμογών για FANETs, είναι δύσκολο να αποφασιστεί η ακριβής τοποθεσία των UAVs. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα που αφορούν την τοποθεσία των UAVs, χρειάζεται να ενημερώνονται σε σύντομα χρονικά διαστήματα.

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των FANETs, όπως η υψηλή κινητικότητα, οι διακεκομμένες συνδέσεις, οι συχνές αλλαγές στην τοπολογία, οι περιορισμένοι πόροι, η χαμηλή πυκνότητα κόμβων και η συχνή κατάτμηση δικτύου, επιβάλλουν δύσκολες προκλήσεις για τη σχεδίαση μιας αξιόπιστης λύσης αρχιτεκτονικής επικοινωνίας, ιδίως δρομολόγησης. Επιπρόσθετα, διαφορετικές εφαρμογές των FANETs έχουν διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service-QoS). Για παράδειγμα, εφαρμογές επιτήρησης ή έρευνας και διάσωσης (SAR) απαιτούν κίνηση σε πραγματικό χρόνο, ενώ εφαρμογές όπως συλλογή πληροφοριών και χαρτογράφηση

μπορούν να είναι ανεκτικές στην καθυστέρηση. Οι απαιτήσεις εύρους ζώνης για διαφορετικούς τύπους εφαρμογών είναι διαφορετικές. Έτσι, διαφοροποιώντας τις απαιτήσεις QoS και την ευελιξία των εφαρμογών, προκύπτει και αύξηση της πολυπλοκότητας της δρομολόγησης στα FANETs [26].

Τα τελευταία χρόνια, έχει εισαχθεί ένας αριθμός σχημάτων δρομολόγησης, που λαμβάνουν υπόψιν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των FANETs. Αυτά είναι είτε νέα πρωτόκολλα ή τροποποιήσεις των υπάρχοντων πρωτοκόλλων δρομολόγησης για MANETs.

### **3.3 Αρχιτεκτονικές επικοινωνίας και εφαρμογής FANETs**

Η αρχιτεκτονική επικοινωνίας σε ένα FANET καθορίζει τον τρόπο ροής πληροφοριών μεταξύ των UAVs ή μεταξύ των UAVs και του επίγειου σταθμού ελέγχου. Λαμβάνοντας υπόψιν τον αριθμό των UAVs και την ετερογένειά τους, οι αρχιτεκτονικές επικοινωνίας των FANETs ταξινομούνται ως εξής [26]:

- ✓ Ενός επιπέδου και μιας ομάδας (single-layer and single-group),
- ✓ Ενός επιπέδου και πολλών ομάδων (single-layer and multi-group)
- ✓ Πολλών επιπέδων και πολλών ομάδων (multi-layer and multi-group)

Επιπλέον, βάσει του βαθμού συντονισμού και συνεργασίας μεταξύ των UAVs, που απαιτείται για την εκτέλεση εργασιών, η αρχιτεκτονική εφαρμογής σε ένα FANET κατηγοριοποιείται σε σφιχτά συνδεδεμένους και χαλαρά συνδεδεμένους κόμβους. Οι λεπτομερείς περιγραφές παρουσιάζονται στη συνέχεια.

#### **3.3.1 Αρχιτεκτονική επικοινωνίας**

Η παραδοσιακή αρχιτεκτονική επικοινωνίας πολλαπλών UAVs είναι συγκεντρωτική και εξαρτώμενη σε υψηλό βαθμό από την υποδομή (π.χ. επίγειος σταθμός ελέγχου, δορυφόρος) [26]. Εφαρμόζεται, κυρίως, όπου η επικοινωνία ανάμεσα στα UAVs διευκολύνεται από την υποδομή και δεν υπάρχουν απευθείας συνδέσεις μεταξύ των UAVs. Το προφανές πρόβλημα με αυτή την προσέγγιση είναι ότι η υποδομή γίνεται το μοναδικό σημείο



αποτυχίας του δικτύου και ως εκ τούτου η αρχιτεκτονική επικοινωνίας δεν είναι ανεκτική στα σφάλματα. Επιπλέον, οι απαιτήσεις για κάθε UAV για να δημιουργήσουν σύνδεση με την υποδομή κάνει την αρχιτεκτονική επικοινωνίας μη επεκτάσιμη. Οι απαιτήσεις εύρους κλιμακώνονται ανάλογα με τον αριθμό των UAVs στο δίκτυο και εισάγουν πρόσθετη καθυστέρηση για τη μετάδοση δεδομένων μεταξύ των UAVs, λόγω έλλειψης άμεσης επικοινωνίας UAV προς UAV.

Τα FANETs αντιμετωπίζουν αυτά τα προβλήματα χρησιμοποιώντας μια αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική, που επιτρέπει εκτός από τις επικοινωνίες UAV προς υποδομή, απευθείας επικοινωνία UAV προς UAV μέσω ασύρματων ad hoc δικτύων. Έτσι, μόνο ένας μικρός αριθμός από UAVs απαιτούνται για να επικοινωνήσουν απευθείας με την υποδομή, ενώ τα υπόλοιπα ενεργούν ως αναμεταδότες για την ολοκλήρωση της μετάδοσης δεδομένων μέσω multi-hop επικοινωνιών. Αυτό κάνει ένα FANET, που είναι υποσύνολο ενός MANET, όπου οι κόμβοι αντιπροσωπεύονται από UAVs.

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά και τις απαιτήσεις της εφαρμογής, διάφορα είδη τεχνολογιών ασύρματων επικοινωνιών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνίες UAV προς UAV και UAV προς υποδομή, στα FANETs. Οι παράγοντες, που πρέπει να ληφθούν υπόψη για να χρησιμοποιηθούν οι υπάρχουσες ασύρματες τεχνολογίες περιλαμβάνουν υποστήριξη της κινητικότητας, καθυστέρηση, μέγιστο ρυθμό δεδομένων, μέγιστο εύρος μετάδοσης και μέγιστο αριθμό UAVs που υποστηρίζονται.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των ασύρματων τεχνολογιών και τις απαιτήσεις της εφαρμογής, τεχνολογικά πρότυπα IEEE 802.11n/b/g/a, WAVE, κ.λπ., μπορούν να εξεταστούν για UAV προς UAV επικοινωνίες. Επιπρόσθετα, για εφαρμογές με λιγότερες ανάγκες σε εύρος ζώνης, για παράδειγμα, τηλεπισκόπηση, διαχείριση πυρκαγιάς, παρακολούθηση και έλεγχος κ.λπ. τα πρότυπα IEEE 802.15.4 και IEEE 802.14.4 μπορούν να χρησιμοποιηθούν για UAV προς UAV επικοινωνίες. Τα πρότυπα IEEE 802.15.4 και IEEE 802.14.4 επιτρέπουν μια υλοποίηση λιγότερη περίπλοκη και με μικρότερη ισχύ με data rate.

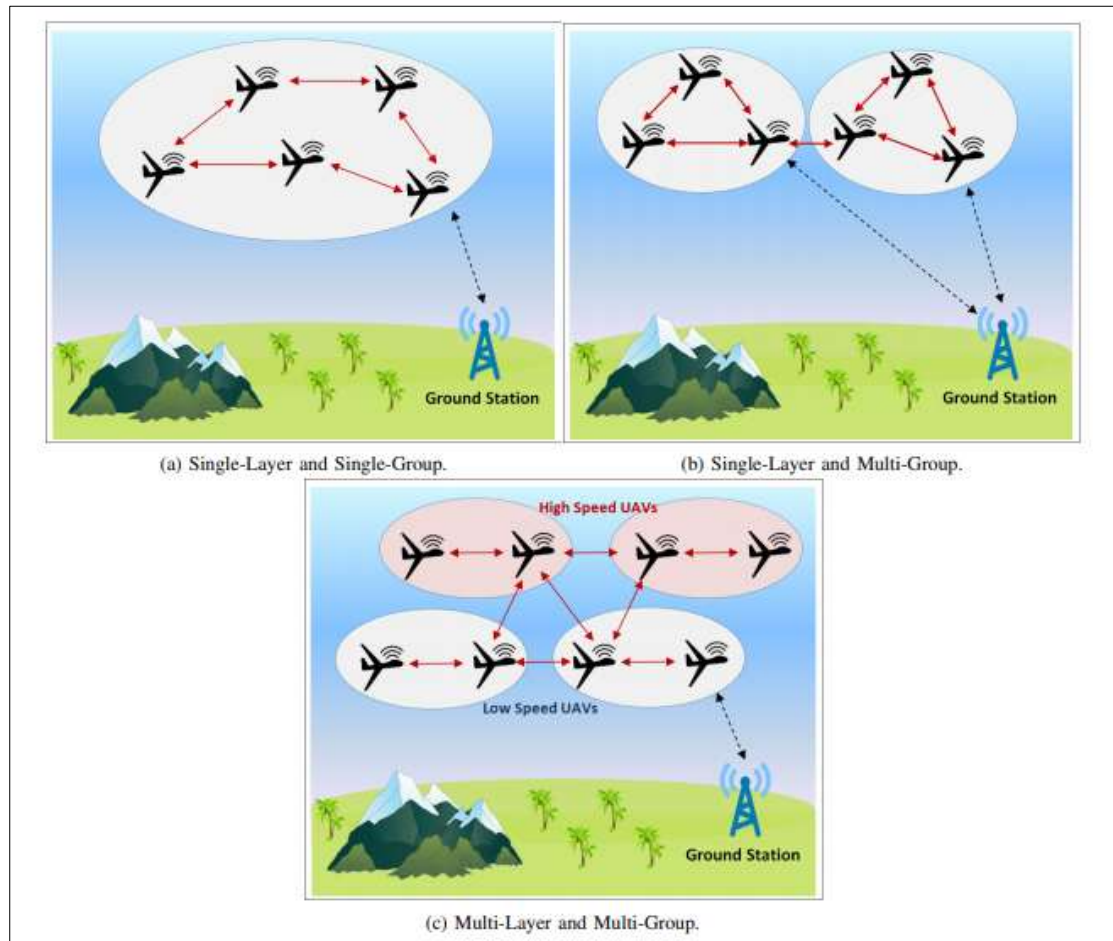
Σε ένα FANET, πρόσθετα με τις UAV προς UAV επικοινωνίες για αποφυγή εμποδίων και συντονισμό μέσα από συνεργασία, υπάρχει, επίσης, η ανάγκη

για ένα ή περισσότερα UAVs (εξαρτάται από την αρχιτεκτονική επικοινωνίας) να ανταλλάσσει δεδομένα με τον επίγειο σταθμό ελέγχου ή τη δικτυακή υποδομή. Λαμβάνοντας υπόψιν το είδος της εφαρμογής και την απόσταση, διάφορα πρωτόκολλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Για παράδειγμα, τα : LTE advanced, LTE, CDMA, TDMA, GPRS, GSM, κ.λπ. , μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επικοινωνία με κυψελοειδή υποδομή και τα : IEEE802.16 (WiMAX), OFDMA, OFDM και IEEE 802.11 (WiFi) μπορούν να εξεταστούν για επικοινωνία με επίγεια WLAN υποδομή.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την αρχιτεκτονική επικοινωνίας των δικτύων πολλαπλών UAVs περιλαμβάνουν τον αριθμό των κόμβων και την ετερογένεια του είδους των κόμβων. Ως εκ τούτων, η αρχιτεκτονική επικοινωνίας των FANETs ταξινομείται ως εξής:

- 1) Ενόσ επιπέδου και μιας ομάδας (single-layer and single-group)
- 2) Ενόσ επιπέδου και πολλών ομάδων (single-layer and multi-group)
- 3) Πολλών επιπέδων και πολλών ομάδων (multi-layer and multi-group)

Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται η αρχιτεκτονική επικοινωνίας για κάθε κατηγορία.



Εικόνα 3.2: Αρχιτεκτονική επικοινωνίας [26]

### 3.3.1.1 Ενός επιπέδου και μιας ομάδας (single-layer and single-group)

Αυτή η αρχιτεκτονική επικοινωνίας είναι η πιο κατάλληλη για δίκτυα πολλαπλών UAVs, που αποτελούνται από σχετικά μικρό αριθμό ομοιογενών UAVs. Χαρακτηρίζεται από μία επίπεδη τοπολογία δικτύου με ένα UAV πύλη (gateway UAV) να ενεργεί ως αναμεταδότης επικοινωνίας ανάμεσα στα UAVs και την υποδομή (Εικόνα 3.2 a). Το UAV πύλη μεταφέρει ασύρματες συσκευές επικοινωνίας ικανές να λειτουργούν και με χαμηλή ισχύ, σε μικρή εμβέλεια για επικοινωνία με το UAV και με υψηλή ισχύ, σε μεγάλη εμβέλεια για επικοινωνία με το σταθμό βάσης. Επίσης, η απόσταση μεταξύ των UAVs είναι σχετικά μικρή, η συσκευή πομποδέκτη στο UAV δεν είναι ακριβή και είναι ελαφριά, κάτι το οποίο το καθιστά πιο κατάλληλο για δίκτυα που αποτελούνται από UAVs μικρού μεγέθους. Για να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα του δικτύου, το σχήμα κινητικότητας όπως η ταχύτητα και οι οδηγίες, πρέπει να είναι παρόμοια για όλα τα συνδεδεμένα UAVs σε ένα FANET. Αυτή η αρχιτεκτονική

είναι ειδικά κατάλληλη για τη δικτύωση μιας ομάδας ομοιογενών UAVs, για εφαρμογές όπως αποστολές συνεχούς επιτήρησης [26], [27], [83].

### **3.3.1.2 Ενός επιπέδου και πολλών ομάδων (single-layer and multi-group)**

Σε ομοιογενή δίκτυα πολλαπλών UAVs, που αποτελούνται από έναν υπερβολικά μεγάλο αριθμό κόμβων μπορεί να είναι αναποτελεσματικό να διαμορφωθούν όλοι οι κόμβοι σε μία ομάδα, λόγω των πολύπλοκων σχημάτων κυκλοφορίας και των επακόλουθων γενικών ελέγχων δικτύου. Σε αυτή την περίπτωση, μια πιο κατάλληλη αρχιτεκτονική επικοινωνίας διευθετεί τα UAVs σε πολλαπλές ομάδες, έτσι ώστε κάθε ομάδα να περιλαμβάνει και έναν κόμβο πύλη (gateway), που διευκολύνει την επικοινωνία με την υποδομή (Εικόνα 3.2 b). Μία αρχιτεκτονική ad hoc δικτύου ενός επιπέδου και πολλών ομάδων είναι βασικά ολοκλήρωση ενός ad-hoc δικτύου και ενός κεντρικού/συγκεντρωτικού δικτύου (centralized network). Σε ένα τέτοιο δίκτυο πολλαπλά UAVs συνδέονται με ένα αδόμητο (ad hoc) τρόπο εντός μιας ομάδας, και οι ομάδες ενώνονται περαιτέρω διαμέσω των UAVs κορμού (backbone) με τον επίγειο σταθμό με ένα συγκεντρωτικό τρόπο. Η επικοινωνία μεταξύ των UAVs, που ανήκουν σε μία ομάδα, επιτυγχάνεται χωρίς να μεσολαβεί ο επίγειος σταθμός, αλλά η επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών ομάδων επιτελείται με τη βοήθεια του επίγειου σταθμού. Αυτή η αρχιτεκτονική δικτύου UAVs είναι κατάλληλη για περιπτώσεις, όπου η αποστολή περιλαμβάνει μεγάλο αριθμό από UAVs, με διαφορετικά χαρακτηριστικά πτήσης και επικοινωνίας, αλλά δεν είναι ανθεκτική [26], [27], [83].

### **3.3.1.3 Πολλών επιπέδων και πολλών ομάδων (multi-layer and multi-group)**

Ένα δίκτυο πολλαπλών UAVs μπορεί να αποτελείται από ετερογενείς κόμβους, που διαθέτουν διαφορετικές δυνατότητες όπως ταχύτητα, μέγεθος, υψόμετρο πτήσης και αντοχή. Σε αυτή την περίπτωση, μια ιεραρχική αρχιτεκτονική, που αποτελείται από πολλαπλές ομάδες είναι προτιμότερη.

Σε αυτή την αρχιτεκτονική επικοινωνίας πολλαπλές ομάδες, αποτελούμενες από ετερογενή UAVs σχηματίζουν ένα ad-hoc δίκτυο μέσα σε μια μεμονωμένη ομάδα. Το χαμηλότερο επίπεδο χρησιμοποιείται για επικοινωνία μεταξύ των UAVs και το ανώτερο επίπεδο χρησιμοποιείται για επικοινωνία μεταξύ των UAVs κορμού όλων των διασυνδεδεμένων ομάδων και του επίγειου σταθμού. Το UAV κορμού κάθε ομάδας συνδέεται το ένα με το άλλο και μόνο ένα UAV κορμού συνδέεται περαιτέρω με τον επίγειο σταθμό. Η επικοινωνία ή η ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των πολλαπλών ομάδων δεν χρειάζεται να σχετίζεται με τον επίγειο σταθμό ή να δρομολογείται μέσω αυτού. Ο επίγειος σταθμός επεξεργάζεται μόνο την πληροφορία, που προορίζεται σε αυτόν, με αποτέλεσμα σημαντική μείωση του φόρτου επικοινωνίας και του υπολογισμού στον επίγειο σταθμό. Επιπρόσθετα, αυτή η αρχιτεκτονική επικοινωνίας είναι ανθεκτική γιατί δεν έχει σημεία αποτυχίας, αφού τα UAVs συνδέονται μεταξύ τους μέσω πολλαπλών συνδέσμων [27], [83].

Ένα παράδειγμα αυτής της αρχιτεκτονικής επικοινωνίας είναι ένα δίκτυο που αποτελείται από κόμβους με διαφορετικές ταχύτητες και μπορεί να τοποθετηθεί σε διαφορετικά επίπεδα (π.χ. επίπεδο με υψηλή και επίπεδο με χαμηλή ταχύτητα), κάθε ένα από τα οποία θα περιλαμβάνει μία ή περισσότερες ομάδες κόμβων (Εικόνα 3.2 c). Για παράδειγμα, σε μια εφαρμογή αναγνώρισης, τα UAVs στο υψηλότερο επίπεδο (π.χ. UAVs σταθερών πτερύγων), τα οποία πετούν σε υψηλό υψόμετρο, με μεγάλη ταχύτητα, σαρώνουν μια συγκεκριμένη περιοχή και προωθούν την πληροφορία στα UAVs χαμηλότερου επιπέδου (π.χ. UAVs με περιστρεφόμενα πτερύγια), τα οποία έχουν καλύτερη ικανότητα να αιωρούνται και να κάνουν ελιγμούς, για να λάβουν λεπτομερείς εικόνες της περιοχής ή του στόχου [26].

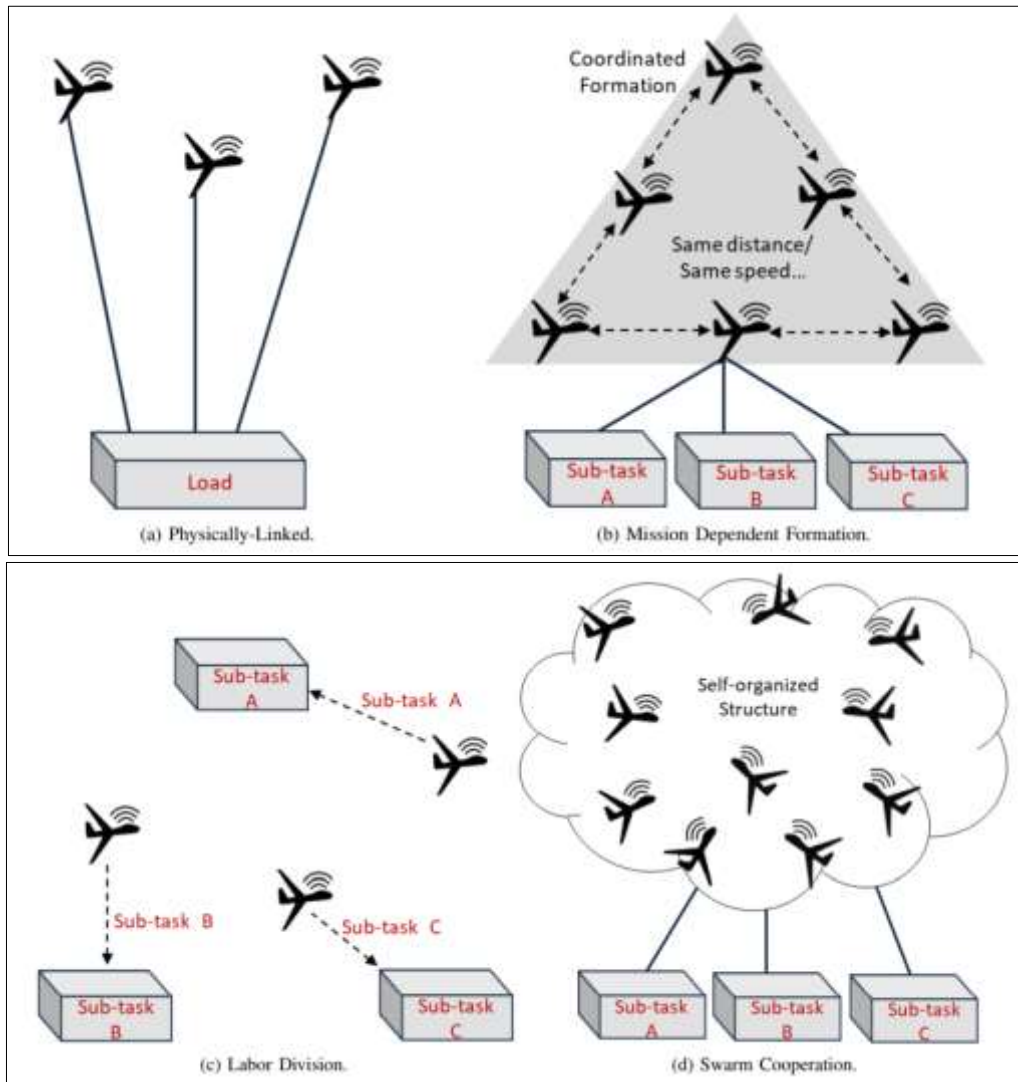
Εν κατακλείδι, μια αποκεντρωμένη αρχιτεκτονική επικοινωνίας είναι η πιο κατάλληλη για τη σύνδεση μιας ομάδας από UAVs, ενώ ένα πολλαπλών επιπέδων ad hoc δίκτυο από UAVs είναι πιο κατάλληλο για τα FANETs.

### 3.3.2 Αρχιτεκτονική εφαρμογής

Τα FANETs επιτρέπουν επικοινωνία και δικτύωση ανάμεσα σε πολλαπλούς αυτόνομους κόμβους από UAVs για την εκτέλεση αποστολών, που σε διαφορετική περίπτωση θα ήταν δύσκολο ή αδύνατο να εκτελεστούν από έναν μόνο κόμβο. Υπάρχουν δύο σημαντικά συστατικά που επιτρέπουν αυτές τις δυνατότητες, που ονομάζονται συντονισμός και συνεργασία [26].

Ο συντονισμός βασίζεται στο συγχρονισμό μεταξύ των κόμβων (χρονικός συντονισμός), ο οποίος είναι σημαντικός για ποικίλες εφαρμογές όπως για παράδειγμα, παρακολούθησης. Σε τέτοιου είδους εφαρμογές, πρέπει να συγχρονιστεί διαφορετική ευαισθητοποίηση για τα αντικείμενα ανάμεσα στους κόμβους και οι κόμβοι πρέπει να συνυπάρχουν διαμοιραζόμενοι με ασφάλεια το χώρο μεταξύ τους (χωρικός συντονισμός) για να εγγυηθούν ότι κάθε κόμβος θα είναι ικανός να επιτελέσει το έργο του με συνέπεια και ασφάλεια σε σχέση με τα σχέδια των άλλων κόμβων καθώς, επίσης και με τα στατικά ή δυναμικά εμπόδια. Ο όρος συνεργασία εισάγει τη συνεργατική συμπεριφορά πολλαπλών κόμβων προς την επίτευξη ενός κοινού στόχου.

Από αυτήν την άποψη, οι αρχιτεκτονικές εφαρμογής των FANETs μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα με το βαθμό του συντονισμού και της συνεργασίας μεταξύ των κόμβων, που απαιτείται για την εκπλήρωση εργασιών. Αυτή η κατηγοριοποίηση περιλαμβάνει εφαρμογές με σφιχτά συνδεδεμένους κόμβους (*tightly coupled nodes*) και με χαλαρά συνδεδεμένους κόμβους (*loosely coupled nodes*), όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3: Αρχιτεκτονική εφαρμογής [26]

### 3.3.2.1 Σφιχτά συνδεδεμένοι κόμβοι

Στις εφαρμογές των FANETs, που απαιτούν σφιχτά συνδεδεμένους κόμβους, η εκτέλεση των εργασιών απαιτεί υψηλό βαθμό συντονισμού και συνεργασίας μεταξύ των UAVs. Αυτό μπορεί περαιτέρω να υποδιαιρεθεί σε αρχιτεκτονικές :

- ✓ φυσικά-συνδεδεμένες (physically-linked) και
- ✓ βασισμένες σε σχηματισμό (formation-based)

#### 3.3.2.1.1 Αρχιτεκτονικές φυσικά-συνδεδεμένες (physically-linked)

Στις αρχιτεκτονικές με φυσικά-συνδεδεμένους κόμβους (Εικόνα 3.3a), η κίνηση κάθε κόμβου UAV περιορίζεται φυσικά από την κίνηση των άλλων κόμβων UAVs. Μια εφαρμογή, για παράδειγμα, είναι η ανύψωση και μεταφορά αντικειμένων από πολλαπλά UAVs. Σε αυτήν την αρχιτεκτονική,

εκτός από το συντονισμό σε όρους ανταλλαγής πληροφοριών, όπως εντολές συντονισμού και διαδρομές σημείων/τροχιές, όλες οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ κόμβων απαιτούν συνεργασία φυσικών ζεύξεων στην ανύψωση και μεταφορά ενός αντικειμένου [26].

#### **3.3.2.1.2 Αρχιτεκτονικές βασισμένες σε σχηματισμό (formation-based)**

Αντίθετα, η κίνηση των UAVs στην αρχιτεκτονική, που βασίζεται στο σχηματισμό δεν περιορίζεται φυσικά. Όμως, πρέπει να τηρεί αυστηρές παραμέτρους αποστολής και συντονισμού, όπως αποστάσεις και σχέδιο πτήσης (Εικόνα 3.3b). Συνήθεις τέτοιου είδους εφαρμογές περιλαμβάνουν, ενεργά επαναδιαμορφώσιμα συστήματα ανίχνευσης, εξερεύνηση και χαρτογράφηση, καθώς και αναζήτηση και επιτήρηση-έρευνα. Στην αρχιτεκτονική, που βασίζεται στο σχηματισμό, απαιτείται ένας επιδέξιος αλγόριθμος ελέγχου σχηματισμού, που λαμβάνει υπόψιν τους περιορισμούς ενέργειας και ισχύος επεξεργασίας των UAVs, για να διατηρήσει το σχηματισμό πτήσης κατά τη διεξαγωγή αποστολών [26].

#### **3.3.2.2 Χαλαρά συνδεδεμένοι κόμβοι**

Οι αρχιτεκτονικές εφαρμογών των FANETs, που αφορούν χαλαρά συνδεδεμένους κόμβους, απαιτούν σε σχετικά μικρότερο βαθμό, συντονισμό και συνεργασία μεταξύ των κόμβων για εκτέλεση εργασιών. Υποδιαιρούνται περαιτέρω σε αρχιτεκτονικές :

- ✓ κατανομής εργασίας (labor division) και
- ✓ συνεργασίας σμήνους (swarm cooperation)

##### **3.3.2.2.1 Υποκατηγορία κατανομής εργασίας (labor division)**

Στην υποκατηγορία κατανομής εργασίας (Εικόνα 3.3c), κάθε κόμβος εκτελεί μια δευτερεύουσα εργασία, που απαιτείται για να επιτευχθεί ένας γενικός στόχος του συστήματος, ωστόσο μπορεί να εκτελεστεί ανεξάρτητα από άλλες δευτερεύουσες εργασίες. Η συνεργασία μεταξύ των κόμβων ορίζεται ρητά και οι κόμβοι, που αλληλεπιδρούν μπορούν να αγνοούν ο ένας τον άλλον, όμως επιτυγχάνουν έναν κοινό γενικό στόχο συστήματος. Εφαρμογές παραδείγματα



σε αυτήν την υποκατηγορία, περιλαμβάνουν διεργασίες όπως αυτόνομη ανίχνευση και παρακολούθηση δασικών πυρκαγιών.

Οι κύριες προκλήσεις, που χρειάζεται να επιλυθούν σε αυτήν την αρχιτεκτονική είναι το πρόβλημα κατανομής εργασιών για μεγιστοποίηση της αποτελεσματικότητας της συνεργασίας καθώς και η εγγύηση κατάλληλου συντονισμού μεταξύ των UAVs για επιτυχή ολοκλήρωση της αποστολής.

#### **3.3.2.2.2 Υποκατηγορία συνεργασίας σμήνους (swarm cooperation)**

Εναλλακτικά, η αρχιτεκτονική συνεργασίας σμήνους τυπικά περιλαμβάνει έναν εξαιρετικά μεγάλο αριθμό ομοιογενών (συνήθως micro-UAVs) κόμβων, που εκτελούν διεργασίες με πολλές επαναλήψεις της ίδιας δραστηριότητας πάνω από μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή. Η συνεργασία μεταξύ των κόμβων δεν είναι σαφής, ωστόσο προκύπτει από τις απλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ κοντινών κόμβων (Εικόνα 3.3d). Ένα παράδειγμα εφαρμογής, που χρησιμοποιεί την αρχιτεκτονική είναι η αναζήτηση για στόχους, που έχουν διαφύγει.

### **3.4 Μοντέλα κινητικότητας**

Η αξιολόγηση της απόδοσης των αδόμητων ασύρματων δικτύων εκτελείται είτε χρησιμοποιώντας πραγματικά πειράματα ή προσομοιώσεις που βασίζονται σε λογισμικό. Τα πραγματικά πειράματα επιτρέπουν την ανάλυση και αξιολόγηση των πρωτοκόλλων και των εφαρμογών τους σε πραγματικά περιβάλλοντα. Όμως, λόγω του υψηλού κόστους και της πολυπλοκότητας για τη δημιουργία δικτύων μεγάλης κλίμακας με ποικίλες τοπολογίες και τις δυσκολίες που παρουσιάζονται κατά την επανάληψη του πειράματος, η αξιολόγηση, που βασίζεται στην προσομοίωση είναι μια πιο βιώσιμη επιλογή από ότι τα πραγματικά πειράματα, λόγω της ευελιξίας της και του χαμηλότερου κόστους.

Οι αξιολογήσεις, που βασίζονται στην προσομοίωση των αδόμητων ασύρματων δικτύων απαιτούν τη χρήση των σχημάτων κινητικότητας, που αποτελούν τα σχέδια κίνησης των κόμβων και καθορίζουν πως η επιτάχυνση, η ταχύτητα, η θέση και η κατεύθυνση αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Επομένως, μια κρίσιμη απαίτηση για την αξιολόγηση της απόδοσης σε ένα

FANET είναι μια καλά σχεδιασμένη αναπαράσταση των κινήσεων των UAVs για τη δημιουργία ενός ρεαλιστικού περιβάλλοντος προσομοίωσης [26].

Αρκετές μελέτες έχουν υπογραμμίσει την επίδραση των μοντέλων κινητικότητας στην απόδοση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης στα FANETs και σε άλλα αδόμητα ασύρματα δίκτυα. Μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση της δρομολόγησης από την άποψη της καθυστέρησης, της απόδοσης και του ρυθμού παράδοσης πακέτων. Επομένως, κατανοώντας τα χαρακτηριστικά και επιλέγοντας το κατάλληλο μοντέλο κινητικότητας είναι κρίσιμο για τη λήψη πολύτιμων συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Διάφορα μοντέλα κινητικότητας έχουν προταθεί για τη δημιουργία ενός πιο ρεαλιστικού σχήματος κινητικότητας για προσομοιώσεις για FANETs και MANETs. Στη συνέχεια περιγράφονται τα υπάρχοντα μοντέλα κινητικότητας, που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για FANETs [26].

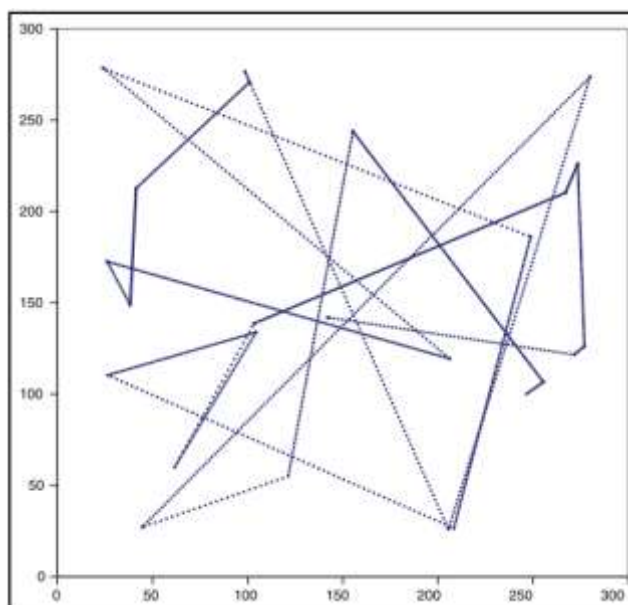
Μπορούμε να διαιρέσουμε τα υπάρχοντα μοντέλα κινητικότητας σε πέντε κατηγορίες [28]:

- ✓ **Pure Randomized μοντέλα κινητικότητας:** Η κινητικότητα των UAVs είναι τυχαία από την άποψη της κατεύθυνσης, της ταχύτητας και του χρόνου κίνησης.
- ✓ **Time-dependent μοντέλα κινητικότητας:** Η κινητικότητα των εξαρτάται από την προηγούμενη ταχύτητα και κατεύθυνση.
- ✓ **Path-planned μοντέλα κινητικότητας:** Κάθε UAV ακολουθεί μια προσχεδιασμένη διαδρομή, χωρίς να ακολουθεί τυχαίες κατευθύνσεις.
- ✓ **Group μοντέλα κινητικότητας:** Η κίνηση των UAVs περιορίζεται από ένα ή περισσότερα σημεία αναφοράς. Τα UAVs κινούνται τυχαία μέσα σε καθορισμένη περιοχή, που έχει κέντρο το σημείο αναφοράς.
- ✓ **Topology-control-based μοντέλα κινητικότητας:** Τα UAVs πετούν πάνω από μια περιοχή, που γνωρίζει την τοπολογία τους, συντονίζοντας τη μεταξύ τους θέση. Αυτό χρειάζεται, για παράδειγμα, όταν έχουμε περιορισμούς στη συνδεσιμότητα του δικτύου.

### 3.4.1. Pure Randomized μοντέλα κινητικότητας

#### 3.4.1.1 Random Waypoint (RWP)

Στο μοντέλο κινητικότητας RWP, κάθε κόμβος ξεκινά κάνοντας παύση για καθορισμένο αριθμό δευτερολέπτων, που λέγεται περίοδος παύσης. Όταν η περίοδος παύσης παρέλθει, ο κόμβος επιλέγει μια τυχαία τελική θέση μέσα στην περιοχή της προσομοίωσης και κινείται προς την τελική θέση με μια τυχαία επιλεγμένη ταχύτητα. Με την άφιξη στην τελική θέση, ξανασταματά και περιμένει για μια στιγμή πριν ξεκινήσει την πορεία του προς μια καινούρια επιλεγμένη τελική θέση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να παρέλθει ο χρόνος της προσομοίωσης (Εικόνα 3.4).



**Εικόνα 3.4:** Σχήμα ενός κινούμενου κόμβου, που χρησιμοποιεί το μοντέλο κινητικότητας Random Waypoint [28]

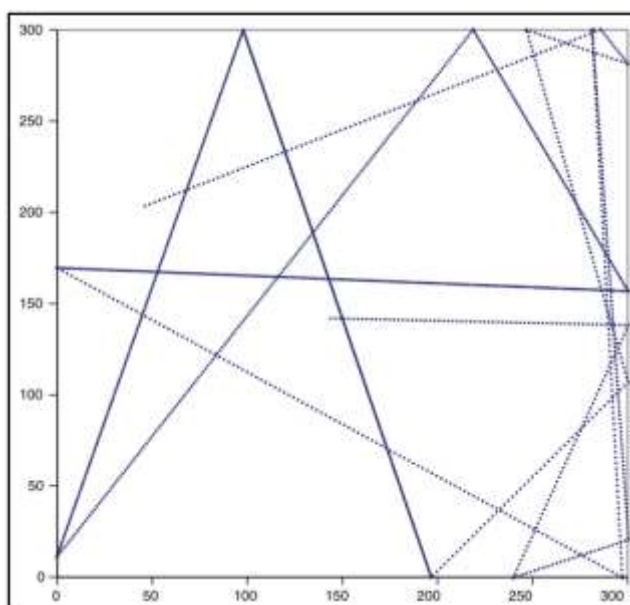
Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι κόμβοι τείνουν να συγκεντρωθούν στο κεντρικό μέρος της περιοχής, που ορίζεται για την προσομοίωση. Επιπρόσθετα, το RWP έχει περιορισμούς στην προσομοίωση δικτύων UAVs εξαιτίας των απότομων στροφών και των ξαφνικών τυχαίων αλλαγών στην κατεύθυνση και την ταχύτητα, που δεν είναι αντιπροσωπευτικές των χαρακτηριστικών κίνησης των UAVs [26], [28].

#### 3.4.1.2 Random Direction (RD)

Το RD μοντέλο κινητικότητας δημιουργήθηκε για να αντιμετωπίσει το θέμα της συγκέντρωσης των κόμβων στο κεντρικό τμήμα της περιοχής προσομοίωσης στο RWP μοντέλο κινητικότητας, λόγω της υψηλής πιθανότητας της κίνησης

προς ένα νέο προορισμό κοντά στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης. Με το RD, κάθε κινούμενος κόμβος επιλέγει ένα σημείο προορισμού στην άκρη της περιοχής προσομοίωσης. Όταν φθάσει στην άκρη, σταματά για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα και μετά επιλέγει ξανά ένα άλλο τυχαίο σημείο προορισμού στην άκρη (Εικόνα 3.5) [28].

Παρόλο, που το RD μοντέλο κινητικότητας επιλύει το πρόβλημα του RWP, όπου οι κόμβοι συγκεντρώνονται στο κέντρο της περιοχής προσομοίωσης, οι απότομες στάσεις και εκκινήσεις και οι απότομες στροφές παραμένουν περιορισμοί του για την προσομοίωση ενός δικτύου από UAVs [26].



**Εικόνα 3.5:** Σχήμα ενός κινούμενου κόμβου, που χρησιμοποιεί το μοντέλο κινητικότητας Random Direction [28]

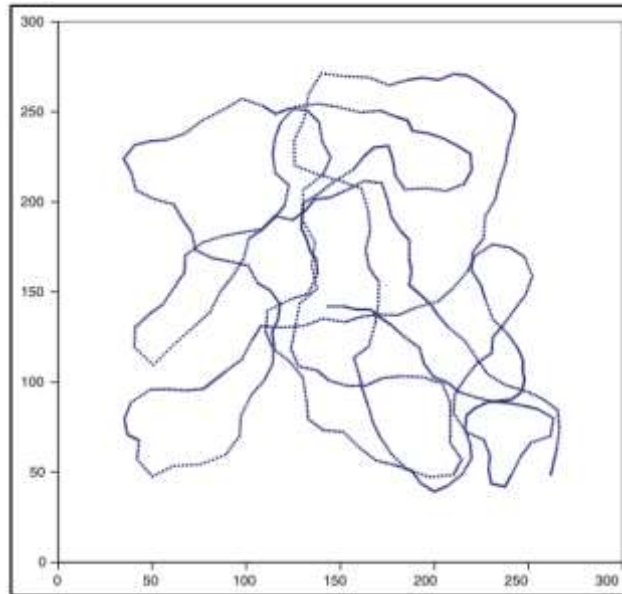
### 3.4.2 Time Dependent μοντέλα κινητικότητας

Αυτή η κατηγορία προσπαθεί να αποφύγει τις απότομες αλλαγές στην ταχύτητα και την κατεύθυνση. Η ομαλή αλλαγή της κίνησης μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας διάφορες μαθηματικές εξισώσεις [28].

#### 3.4.2.1 Gauss-Markov (GM)

Το GM σχήμα κινητικότητας είναι ένα μοντέλο βασισμένο στη μνήμη, το οποίο εισήχθη ώστε να προσαρμόζεται σε διάφορους βαθμούς τυχειότητας, χρησιμοποιώντας μία μοναδική παράμετρο ελέγχου, που χρησιμοποιείται για

τον καθορισμό της έκτασης της τυχειότητας. Στην αρχή, σε κάθε κόμβο εκχωρείται μια αρχική ταχύτητα και κατεύθυνση. Σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, η κατεύθυνση και η ταχύτητα των κόμβων ενημερώνονται βασιζόμενοι στις προηγούμενες τιμές της κατεύθυνσης και της ταχύτητας και η επόμενη θέση υπολογίζεται σύμφωνα με την τρέχουσα κατεύθυνση κίνησης, την ταχύτητα και την πληροφορία θέσης (Εικόνα 3.6) [26]. Έχει χρησιμοποιηθεί για προσομοίωση πρωτοκόλλου για σμήνος από UAVs για FANETs [84].



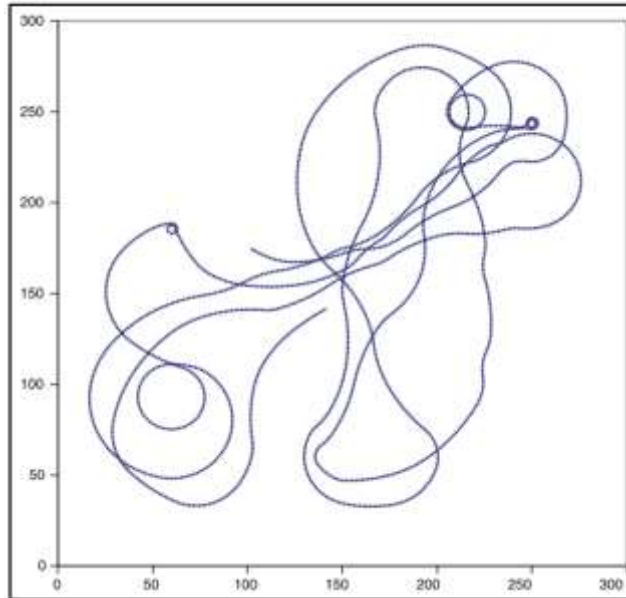
**Εικόνα 3.6:** Σχήμα ενός κινούμενου κόμβου, που χρησιμοποιεί το μοντέλο κινητικότητας Gauss-Markov [28]

#### 3.4.2.2 Smooth-Turn (ST)

Το ST μοντέλο κινητικότητας επιτρέπει στους κινούμενους κόμβους να κινούνται σε ευέλικτες τροχιές, συσχετίζοντας την επιτάχυνση του κινούμενου κόμβου με χρονικές και χωρικές συντεταγμένες. Κάθε UAV διαλέγει ένα σημείο στο χώρο και στη συνέχεια κάνει κύκλους γύρω από αυτό, μέχρι να επιλέξει ένα άλλο σημείο καμπής. Το επιλεγμένο σημείο πρέπει να είναι κάθετο προς την κατεύθυνση του UAV, για να εξασφαλιστεί μια ομαλή τροχιά/πορεία. Το σχήμα που διαμορφώνεται με αυτό το μοντέλο κινητικότητας φαίνεται στην Εικόνα 3.7.

Αυτό το σχήμα κινητικότητας είναι σχεδιασμένο ώστε να είναι κατάλληλο για εφαρμογές περιπολίας και παρακολούθησης. Τα κύρια χαρακτηριστικά του

είναι ότι μιμείται τις ομαλές στροφές των UAVs και καταγράφει τη χωρική και χρονική συσχέτιση της επιτάχυνσης. Όμως, δεν περιλαμβάνεται σε αυτό, κάποιος μηχανισμός αποφυγής συγκρούσεων [28], [26].



**Εικόνα 3.7:** Σχήμα ενός κινούμενου κόμβου, που χρησιμοποιεί το μοντέλο κινητικότητας Smooth-Turn [28]

### 3.4.3 Path-planned μοντέλα κινητικότητας

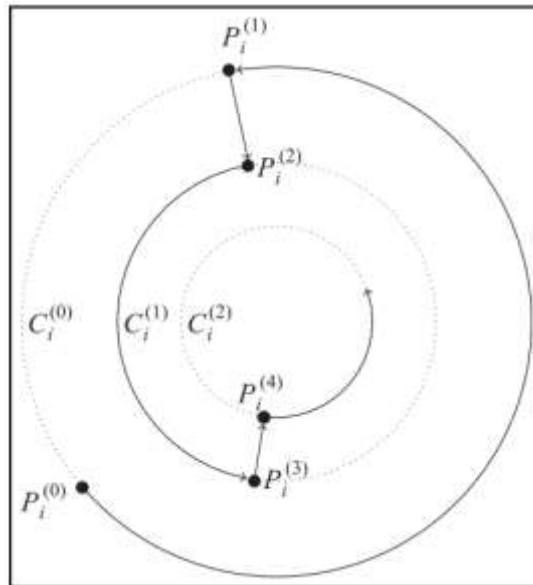
Αυτά τα μοντέλα κινητικότητας αναπτύσσουν μια συγκεκριμένη προκαθορισμένη διαδρομή προκειμένου να αναγκάσουν τα UAVs να τα ακολουθήσουν. Ειδικότερα, κάθε UAV ακολουθεί ένα συγκεκριμένο σχήμα μέχρις ότου φθάσει στο τέλος. Σε αυτό το σημείο, το UAV αλλάζει τυχαία το σχήμα ή επαναλαμβάνει το ίδιο [28].

#### 3.4.3.1 Semi-random Circular Movement (SRCM)

Το σχήμα κινητικότητας SRCM σχεδιάστηκε για σενάρια κυκλικής κίνησης των UAVs. Κάθε UAV ξεκινά από μία θέση εκκίνησης σε ένα προκαθορισμένο κύκλο και κινείται κατά μήκος του κύκλου με μια τυχαία επιλεγμένη ταχύτητα στο εύρος  $[V_{min}, V_{max}]$  προς το αρχικό σημείο προορισμού. Με την άφιξη στο σημείο προορισμού, σταματά για ένα καθορισμένο χρόνο αναμονής και κατόπιν αρχίζει την κίνησή του προς το επόμενο σημείο προορισμού κατά μήκος της ίδιας διαδρομής στον κύκλο. Συνεχίζει με τον ίδιο τρόπο σε τυχόν θέσεις προορισμού στη διαδρομή. Όταν ολοκληρώνει ένα πλήρη γύρο του

κύκλου, επιλέγει τυχαία έναν άλλο κύκλο και ακτίνα γύρω από το ίδιο κέντρο με την επόμενη διαδρομή κίνησης και επαναλαμβάνει την προηγούμενη διαδικασία.

Το SRCM μπορεί να είναι εφαρμόσιμο για την προσομοίωση UAVs, που αιωρούνται πάνω από μια προκαθορισμένη γεωγραφική περιοχή συλλέγοντας πληροφορία. Για παράδειγμα, σε αποστολές αναζήτησης και διάσωσης, όπου η πιθανή θέση της οντότητας στόχου επιλέγεται ως το καθορισμένο κεντρικό σημείο και τα UAVs ελίσσονται γύρω από το κεντρικό σημείο για τον εντοπισμό της ακριβούς θέσης του στόχου [26]. Στην Εικόνα 3.8 φαίνεται ένα παράδειγμα της συμπεριφοράς του SRCM.



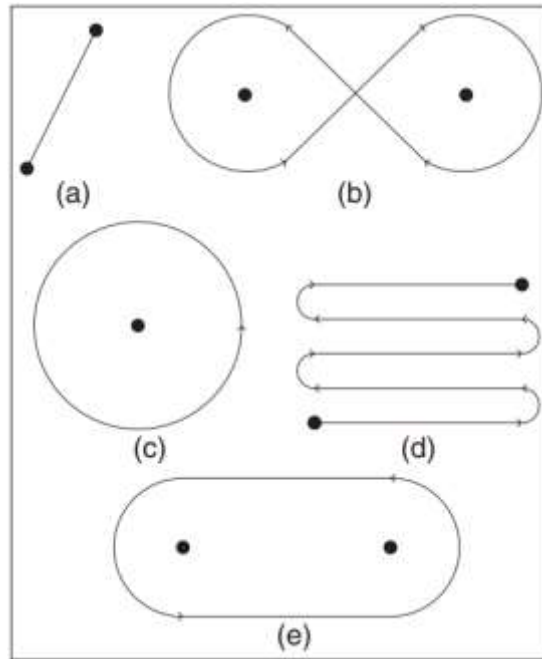
**Εικόνα 3.8:** Ένα παράδειγμα σχήματος διαδρομής, που εκτελείται από έναν κόμβο με το μοντέλο κινητικότητας SRCM [28]

Το δυνατό σημείο του SRCM, σε σχέση με τα άλλα μοντέλα κινητικότητας, είναι η μείωση των πιθανών συγκρούσεων μεταξύ των UAVs λόγω της κυκλικής φύσης της κίνησης. Όμως, η αλλαγή της ακτίνας στροφής οδηγεί σε μια ορθογώνια ξαφνική αλλαγή της κατεύθυνσης, που σαφώς δεν είναι ρεαλιστική από την οπτική γωνία των UAVs [28].

#### 3.4.3.2 Paparazzi (PPRZM)

Το PPRZM μοντέλο κινητικότητας μιμείται τη συμπεριφορά των Paparazzi UAVs σε ένα σύστημα αυτόματου πιλότου Paparazzi. Είναι βασισμένο σε μια

μηχανή κατάστασης (state machine), που περιλαμβάνει πέντε καταστάσεις με σχήματα κίνησης: Stay-At, Eight, Oval, Scan και Way-Point. Στην αρχή, κάθε UAV επιλέγει ένα είδος κίνησης, τη θέση εκκίνησης και την ταχύτητα. Έπειτα, επιλέγει και καθορίζει ένα τυχαίο υψόμετρο, που παραμένει σταθερό για ολόκληρη την προσομοίωση [26],[28]. Η Εικόνα 3.9 δείχνει τα διαφορετικά σχήματα κίνησης του PPRZM.



**Εικόνα 3.9:** Όλα τα σχήματα διαδρομών που προσδιορίζονται από το μοντέλο κινητικότητας PPRZM

(a) Way-Point, (b) Eight, (c) Stay-At, (d) Scan, and (e) Oval [28]

Το PPRZM προσπαθεί να αντιμετωπίσει τα προβλήματα των μοντέλων κινητικότητας Pure Randomized παρέχοντας ένα σύνολο καλά ορισμένων σχημάτων, που προσομοιώνουν κάποιες πραγματικές κινήσεις των UAVs. Από την άλλη μεριά, η μηχανή κατάστασης, μέσω της οποίας επιλέγεται το σχήμα κίνησης για κάθε UAV είναι πολύ απλή για ένα συγκεκριμένο σχέδιο αποστολής. Αρχικά, οι θέσεις των UAVs επιλέγονται τυχαία και στερούνται συγκεκριμένης οργάνωσης μεταξύ των κινήσεων των σχημάτων τους. Επιπλέον, όταν ένα UAV ολοκληρώνει το πρώτο σχήμα και εισάγεται στο δεύτερο, ανάλογα με τη γωνία περιστροφής των σχημάτων, το UAV θα μπορούσε να πάρει μια απότομη καμπύλη, καταστρέφοντας το ομαλό χαρακτηριστικό του μοντέλου [28].

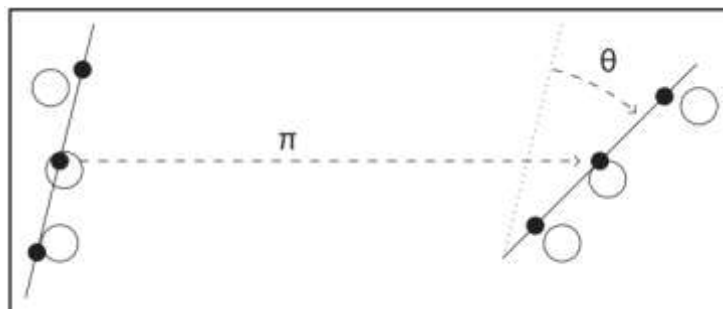


### 3.4.4 Group μοντέλα κινητικότητας

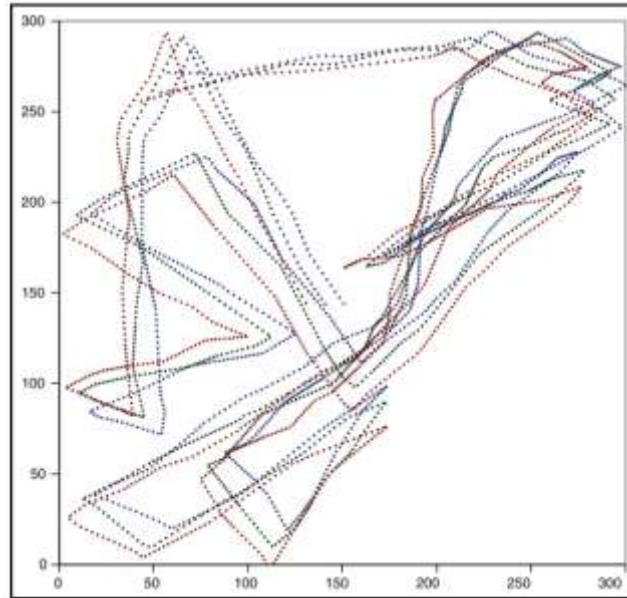
Τα Group μοντέλα κινητικότητας προσομοιώνουν τη συμπεριφορά εκείνων των κινούμενων κόμβων, που ο ένας είναι ολοκληρωτικά εξαρτώμενος από τον άλλον. Όμως, στα FANETs, υπάρχουν πολλές περιπτώσεις, όπου είναι απαραίτητο τα UAVs να κινούνται μαζί ακολουθώντας ένα κοινό σημείο. Για παράδειγμα, μια ομάδα από UAVs μπορεί να ακολουθήσει μια κοινή γραμμή, που κινείται μαζί με το χρόνο, προκειμένου να περιπολούν μια συγκεκριμένη μεγάλη περιοχή. Τυπικά, ο σχηματισμός σε ομάδα σχεδιάζεται για να επιτευχθεί ένας κοινός στόχος. Στη συνέχεια, περιγράφονται τρία μοντέλα κινητικότητας, που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία [28].

#### 3.4.4.1 Column (CLMN)

Κάθε κινούμενος κόμβος κινείται γύρω από ένα σημείο αναφοράς, που είναι τοποθετημένο σε μια δοθείσα γραμμή, που κινείται προς τα εμπρός. Ειδικότερα, κάθε κινούμενος κόμβος περιστρέφεται τυχαία γύρω από το σημείο αναφοράς διαμέσω μιας οντότητας μοντέλου κινητικότητας. Στην Εικόνα 3.10 φαίνεται ένα παράδειγμα του CLMN, όπου τρεις κινούμενοι κόμβοι τυχαία περιστρέφονται γύρω από το δικό τους σημείο αναφοράς, που βρίσκεται σε μια γραμμή που κινείται και στρέφεται. Σε κάθε χρονικό διάστημα, η νέα θέση κάθε σημείου αναφοράς υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν τη θέση του παλιού σημείου αναφοράς. Στην Εικόνα 3.11, φαίνεται ένα παράδειγμα τριών κόμβων, που κινούνται σύμφωνα με το CLMN.



**Εικόνα 3.10:** Παράδειγμα κίνησης ενός βήματος με CLMN, στο οποίο ένα σύνολο τριών σημείων αναφοράς καθορίζονται σε μια γραμμή, που κινείται για  $\pi$  και στρέφεται για  $\theta$  [28]



**Εικόνα 3.11:** Σχήμα τριών κινούμενων κόμβων, που χρησιμοποιούν το μοντέλο κινητικότητας CLMN [28]

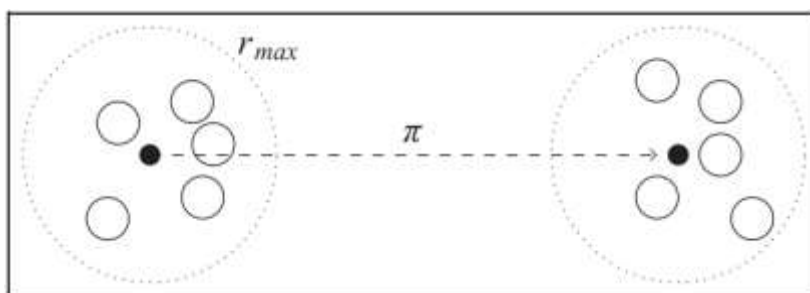
Τα Group μοντέλα κινητικότητας μπορούν να αναπαραστήσουν πολλά πραγματικά σενάρια, που αφορούν UAVs. Ο χωρικός περιορισμός, που προσδιορίζεται από αυτά τα μοντέλα επιτρέπουν μια εγγυημένη σύνδεση μεταξύ των UAVs μέσα σε κάθε ομάδα. Ειδικότερα, το CLMN μπορεί να εμποδίσει συγκρούσεις μεταξύ των UAVs, αφού κάθε UAV περιστρέφεται γύρω από ένα καθορισμένο σημείο και αυτά τα σημεία τοποθετούνται το ένα μακριά από το άλλο. Παρόλα αυτά, ομαλές στροφές και αλλαγές ταχύτητας δεν παρουσιάζονται σε αυτό το μοντέλο κινητικότητας [28].

#### **3.4.4.2 Nomadic Community (NC)**

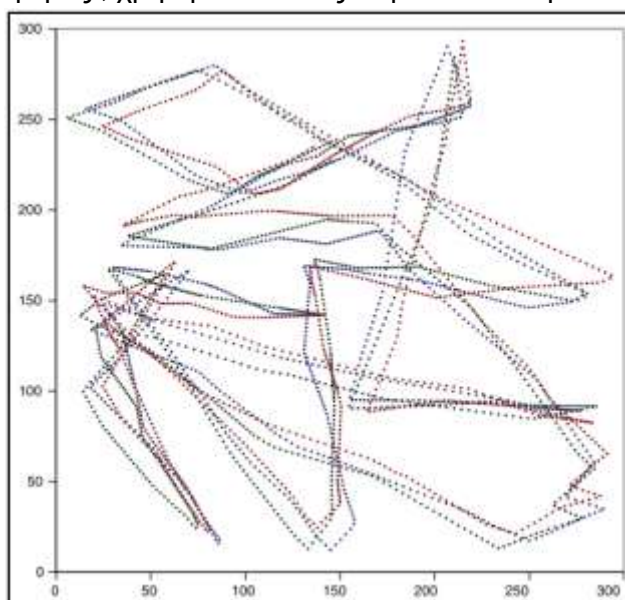
Κάθε κινούμενος κόμβος κινείται τυχαία γύρω από ένα δεδομένο σημείο αναφοράς, χωρίς κάποιο περιορισμό. Στην Εικόνα 3.12 δίνεται ένα παράδειγμα πέντε κινούμενων κόμβων, που κινούνται γύρω από ένα σημείο αναφοράς. Οι κινούμενοι κόμβοι μπορούν να κινηθούν εντός μιας μέγιστης απόστασης  $r_{max}$  από το σημείο αναφοράς. Σε κάθε χρονικό διάστημα, το σημείο αναφοράς κινείται επίσης για συγκεκριμένη απόσταση  $r$  χρησιμοποιώντας ένα τυχαίο μοντέλο κινητικότητας. Διαφορετικά από το CLMN, οι κόμβοι στην ομάδα διαμοιράζονται τον ίδιο χώρο, που

προσδιορίζεται από το μοναδικό σημείο αναφοράς, αντί για ένα μεμονωμένο σημείο αναφοράς σε μία στήλη.

Στην Εικόνα 3.13 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα τριών κόμβων, που κινούνται σύμφωνα με το NC. Το NC έχει κόμβους, που διαμοιράζονται κοινούς χώρους, προκαλώντας συγκρούσεις μεταξύ των UAVs. Τροποποιημένες εκδόσεις του μοντέλου κινητικότητας, περιλαμβάνουν πρόσθετους περιορισμούς, που σκοπό έχουν να διαχωρίσουν αρχικά τους χώρους πτήσης ή να ελέγξουν την απόσταση μεταξύ ζευγών από UAVs, για να αποφευχθούν συγκρούσεις. Επιπλέον, λόγω της αλλαγής κατεύθυνσης και ταχύτητας των κινούμενων κόμβων και των σημείων αναφοράς οι απότομες κινήσεις είναι αναπόφευκτες [28].



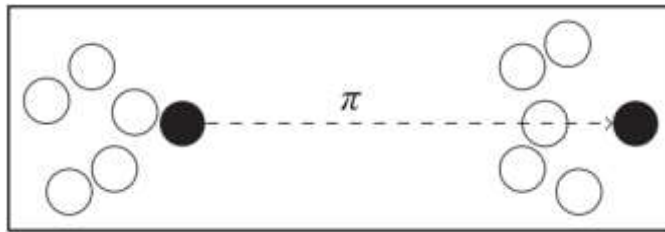
**Εικόνα 3.12:** Παράδειγμα πέντε κινούμενων κόμβων γύρω από ένα κινούμενο σημείο αναφοράς, χρησιμοποιώντας το μοντέλο κινητικότητας NC [28]



**Εικόνα 3.13:** Σχήμα τριών κινούμενων κόμβων, που χρησιμοποιούν το μοντέλο κινητικότητας NC [28]

### 3.4.4.3 Pursue (PRS)

Το PRS μοντέλο κινητικότητας είναι παρόμοιο με το NC. Οι κινούμενοι κόμβοι επιχειρούν να ακολουθήσουν ένα συγκεκριμένο στόχο, που κινείται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Οι κινούμενοι κόμβοι χρησιμοποιούν μία απλή, τυχαία, σχετική κίνηση καθώς επιδιώκουν τον στόχο. Ένα παράδειγμα εφαρμογής είναι αστυνομικοί, που επιχειρούν να ακολουθήσουν και να συλλάβουν εγκληματίες που έχουν διαφύγει. Η Εικόνα 3.14 δείχνει ένα παράδειγμα της PRS κίνησης, όπου πέντε κόμβοι (με άσπρο χρώμα) αντιπροσωπεύουν τους κόμβους, που ακολουθούν τον επιδιωκόμενο κόμβο (με μαύρο χρώμα) [28].



**Εικόνα 3.14:** Παράδειγμα κίνησης ενός-βήματος με το PRS, όπου πέντε κινούμενοι κόμβοι ακολουθούν τον κινούμενο μαύρο επιδιωκόμενο στόχο [28]

### 3.4.5 Topology-control-based μοντέλα κινητικότητας

Ένας έλεγχος πραγματικού χρόνου της κίνησης των UAVs απαιτείται, όταν ορισμένοι περιορισμοί του δικτύου ή της αποστολής πρέπει να ικανοποιούνται συνεχώς. Ένας περιορισμός είναι να διατηρείται ένα πλήρες συνδεδεμένο δίκτυο από τα UAVs όλες τις στιγμές, έτσι ώστε ένα δεδομένο UAV να μπορεί να μιλάει με ένα άλλο. Σε αυτή την περίπτωση, ένας συνεχής έλεγχος της κίνησης των UAVs σύμφωνα με το επίπεδο συνδεσιμότητας του δικτύου είναι υποχρεωτικός. Τα μοντέλα κινητικότητας ελέγχου της τοπολογίας είναι η νέα γενιά μοντέλων κινητικότητας για τα FANETs, δεδομένου ότι επιτρέπουν τον έλεγχο τοπολογίας δικτύου μέσω λογικής μετάδοσης δεδομένων στο ίδιο το δίκτυο. Με αυτό τον τρόπο, η τυχαίοποιημένη φύση της κινητικότητας αφαιρείται, και αντικαθίσταται από μία λύση ελέγχου, που είναι πιο ανθεκτική και έχει επίγνωση της κίνησης των UAVs σύμφωνα με τους στόχους της αποστολής ή τους περιορισμούς του δικτύου [28].

#### **3.4.5.1 Distributed Pheromone Repel (DPR)**

Το DPR μοντέλο κινητικότητας χρησιμοποιεί ένα χάρτη φερομόνης για να κατευθύνει την κίνηση των UAVs σε ένα σενάριο εφαρμογής αναγνώρισης. Κάθε κινούμενος κόμβος διατηρεί το δικό του χάρτη φερομόνης. Ο χάρτης φερομόνης είναι ένα πλέγμα με καθορισμένο μέγεθος τμήματος/κελιού, όπου κάθε τμήμα/κελί αποτελείται από μία χρονική σήμανση, που δείχνει την τελευταία φορά που το τμήμα/κελί καλύφθηκε/σαρώθηκε. Στο DPR, η κινητικότητα ενός UAV βασίζεται στην κίνηση των άλλων UAVs κατά τέτοιο τρόπο, ώστε ο χάρτης φερομόνης, που περιέχει τις περιοχές που καλύφθηκαν/σαρώθηκαν από ένα UAV να μεταδίδεται τακτικά μεταξύ των κινούμενων κόμβων, για κοινή χρήση των πληροφοριών με τα άλλα UAVs στο δίκτυο. Κατά συνέπεια, ένα UAV αποφασίζει να πάει ευθεία, ή να στρίψει αριστερά ή δεξιά με βάση τον δικό του χάρτη φερομόνης. Για να αυξηθεί η κάλυψη σάρωσης, τα UAVs ευνοούν την κίνηση σε μία περιοχή με χαμηλή μυρωδιά φερομόνης (low pheromone smell). Παρόλο που ο μηχανισμός DPR επιτυγχάνει κάλυψη σάρωσης, παρουσιάζει φτωχά αποτελέσματα όσον αφορά τη συνδεσιμότητα του δικτύου, λόγω του ότι τα UAVs απωθούνται το ένα από το άλλο [26], [28].

Το DPR είναι ικανό να αναπαράγει μια ρεαλιστική κίνηση λόγω των ομαλών στροφών και του αντικειμενικού χάρτη φερομόνης. Το πρόβλημα είναι ότι δεν λαμβάνεται υπόψιν η συνδεσιμότητα του δικτύου. Μια εξέλιξη αυτού του μοντέλου κινητικότητας μπορεί να είναι η ενίσχυση του χάρτη με την πυκνότητα σύνδεσης με τα άλλα UAVs, για την αντιστάθμιση του χάρτη φερομόνης στόχου για την αποστολή [28].

#### **3.4.5.2 Self Deployable Point Coverage (SDPC)**

Το SDPC μοντέλο κινητικότητας αναπτύσσει ένα σύνολο από UAVs σε μια περιοχή που έχουν γίνει καταστροφές, με σκοπό να δημιουργήσει μια υποδομή επικοινωνίας, την οποία τα θύματα της καταστροφής μπορούν να χρησιμοποιούν. Ο σκοπός κάθε UAV είναι να καλύψει το μέγιστο αριθμό ανθρώπων στο έδαφος διατηρώντας μια σύνδεση με τα άλλα UAVs.

Το SDPC είναι ένας καλός συμβιβασμός μεταξύ της κάλυψης στόχου και της συνδεσιμότητας, δεδομένου ότι τα UAVs προσπαθούν να φθάσουν τους

στόχους – θύματα, λαμβάνοντας, επίσης, υπόψιν τη μεταξύ τους συνδεσιμότητα. Ωστόσο, η προσομοίωση του προτεινόμενου μοντέλου πραγματοποιείται χωρίς ρεαλιστική κίνηση (ομαλή επιτάχυνση και στροφές) των UAVs. Αν και μία ρητή διαδικασία ανίχνευσης σύγκρουσης δεν είναι ενσωματωμένη σε αυτό το μοντέλο, η λειτουργία του εμποδίζει τα UAVs να πλησιάζουν το ένα το άλλο, αφού τείνουν να κινούνται έτσι ώστε να καλύπτουν τη μέγιστη δυνατή περιοχή. Από την άλλη μεριά, ένας έλεγχος σύγκρουσης κτιρίου/εμποδίου θα μπορούσε να είναι απαραίτητος [28].

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **4.1 Πρωτόκολλα δρομολόγησης για FANETs**

Παρόλο που τα FANETs μοιράζονται κοινά χαρακτηριστικά με τα MANETs και VANETs, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, που εισάγονται για τέτοιου είδους αδόμητα δίκτυα δεν είναι ουσιαστικά κατάλληλα για FANETs λόγω των ποικίλων απαιτήσεων διακοπών της σύνδεσης και δυναμικότητας. Στα FANETs, τα UAVs μπορούν να εγκαταλείψουν το σύστημα ή να εισέλθουν σε αυτό συχνά, λόγω περιορισμών ισχύος ή αποτυχίας. Επειδή η κινητικότητα των UAVs μπορεί να διευκολύνει την κάλυψη μιας περιοχής γρήγορα, η πυκνότητα των κόμβων στα FANETs είναι σχετικά μικρότερη, από ότι στα MANETs και στα VANETs. Ωστόσο, αυτό προκαλεί πρόκληση συχνής κατάτμησης του δικτύου. Επιπλέον, τα FANETs, που έχουν δημιουργηθεί για διάφορες εφαρμογές, ενδέχεται να αποτελούνται από UAVs υψηλής κινητικότητας, έτσι ώστε οι επαναλαμβανόμενες αλλαγές τοπολογίας και οι προσωρινές αστοχίες συνδέσμων να αποτελούν κανόνα.

Λόγω αυτών των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι δρομολόγησης, δεν μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις των FANETs. Στη συνέχεια περιγράφονται οι βασικές απαιτήσεις σχεδιασμού πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs και η προτεινόμενη κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs με βάση τη βιβλιογραφία [26].

### **4.2 Απαιτήσεις σχεδιασμού για πρωτόκολλα δρομολόγησης για FANETs**

Για το σχεδιασμό των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs, είναι απαραίτητο να εξεταστούν οι τομείς εφαρμογής και η σχετική κίνηση δεδομένων, καθώς, επίσης και οι απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS). Για παράδειγμα, η ανίχνευση κίνησης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σε εφαρμογές κυκλοφορίας, η παρακολούθηση τηλεμετρικών δεδομένων περιβάλλοντος χαρακτηρίζονται από απαιτήσεις χαμηλής καθυστέρησης, χαμηλού εύρους ζώνης και μεσαίου jitter (Ο διεθνής οργανισμός τηλεπικοινωνιών (ITU) περιγράφει το jitter ως «τις στιγμιαίες αποκλίσεις καθοριστικών τμημάτων ενός ψηφιακού σήματος σε σχέση με τις ιδανικές θέσεις τους στον χρόνο»).

Από την άλλη μεριά, η αποθήκευση και προώθηση δεδομένων κίνησης σε εφαρμογές όπως περιβαλλοντική και στρατιωτική επιτήρηση, χαρακτηρίζονται από υψηλή καθυστέρηση, υψηλές απαιτήσεις εύρους ζώνης και ανοχή στο jitter. Επιπρόσθετα, κίνηση δεδομένων εντολών και ελέγχου μεταξύ των UAVs, αλλά και από τον επίγειο σταθμό ελέγχου προς τα UAVs έχουν χαμηλές απαιτήσεις καθυστέρησης, εύρους ζώνης και jitter. Επίσης, περιορισμοί ισχύος, εξισορρόπηση φορτίου, διαχείριση ασταθών συνδέσμων, συνεχείς απομακρύνσεις και προσθήκες UAVs καθώς και χαρακτηριστικά κινητικότητας και εντοπισμού των UAVs, θα πρέπει να εξεταστούν για να βελτιώσουν την αξιοπιστία της επικοινωνίας των UAVs προς το σταθμό εδάφους, όπως και μεταξύ των UAVs. Επομένως, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης σχεδιασμένο για FANET θα πρέπει να προσαρμόζεται σε διακοπτόμενες συνδέσεις, συχνές αλλαγές στην τοπολογία, κατάτμηση του δικτύου και κινητικότητα των UAVs.

Ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης σχεδιασμένο για FANETs, εκτός από την εύρεση μιας αξιόπιστης και αποτελεσματικής διαδρομής μεταξύ των UAVs, θα πρέπει να εξετάζει και τις απαιτήσεις ασφάλειας καθώς μεταδίδει κρίσιμα μηνύματα, όπως κίνηση πρωτοκόλλου δρομολόγησης, ανίχνευσης, εντολών και ελέγχου. Όλα αυτά απαιτούν ασφαλή επικοινωνία, ειδικά σε εχθρικά περιβάλλοντα.

Εφαρμογές των FANETs, όπως εμπορικές, δημόσιας και εθνικής ασφάλειας απαιτούν ασφαλή πρωτόκολλα επικοινωνίας, που μπορούν να διαβεβαιώσουν αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των UAVs και του επίγειου σταθμού ελέγχου. Παρόλο, που τα FANETs κληρονομούν πολλές προκλήσεις ασφάλειας από τα MANETs και VANETs, οι μοναδικοί περιορισμοί σχεδιασμού τους σε σχέση με τα MANETs και VANETs, όπως υψηλότερος βαθμός κινητικότητας, μικρότερη πυκνότητα κόμβων, επικοινωνία γραμμής της όρασης (line-of-sight LOS) και συχνές αλλαγές τοπολογίας, καθιστούν το σχεδιασμό ασφαλών πρωτοκόλλων επικοινωνίας πιο προκλητικό.

Για παράδειγμα, η υψηλή κινητικότητα και η χαμηλή πυκνότητα κόμβων στα FANETs δυσχεραίνει τη διάκριση μεταξύ αποτυχίας σύνδεσης λόγω διακοπτόμενης συνδεσιμότητας, που προκαλείται από συχνές αλλαγές



τοπολογίας και αποτυχίας λόγω κακόβουλης δραστηριότητας από βυζαντινούς κόμβους (ένας κόμβος που συμπεριφέρεται εσφαλμένα σε ένα δίκτυο).

Επιπρόσθετα, η χρησιμότητα των FANETs, όσον αφορά το κόστος και την ευκολία ανάπτυξης μικρών κόμβων, με περιορισμούς σε πόρους, καθιστούν μάλλον δύσκολη την ενσωμάτωση σε αυτά περίπλοκων μηχανισμών ασφάλειας, όπως η κρυπτογράφηση. Εκτός από αυτό, οι αυστηρές απαιτήσεις καθυστέρησης για επικοινωνία πραγματικού χρόνου μεταξύ των κόμβων σε ένα FANET και του επίγειου σταθμού ελέγχου, παρουσιάζουν πρόσθετους περιορισμούς λόγω των επιπλέον επιβαρύνσεων (overheads) και καθυστερήσεων, που επιβάλλονται από σύγχρονους κρυπτογραφικούς μηχανισμούς.

Επίσης, το χαρακτηριστικό του FANET γραμμή της όρασης (LOS) το καθιστά πιο ευάλωτο σε υποκλοπές και άλλες επιθέσεις man-in-the-middle (MITM). Οπότε, κατά το σχεδιασμό ενός ασφαλούς πρωτοκόλλου δρομολόγησης FANET, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν τα εξής : η αυτονομία κίνησης, ο περιορισμός ενέργειας, ο βαθμός κινητικότητας, η υπολογιστική ικανότητα και ο περιορισμός καθυστέρησης των UAVs [26].

Διαφορετικά με τους κόμβους στα MANETs και VANETs, η κίνηση των UAVs στα FANETs γίνεται σε τρισδιάστατο χώρο, κάτι το οποίο οδηγεί σε διακύμανση της ποιότητας σύνδεσης μεταξύ των UAVs και θέτει μια σημαντική πρόκληση στο σχεδιασμό πρωτοκόλλου επικοινωνίας για FANETs και επομένως πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων για FANETs.

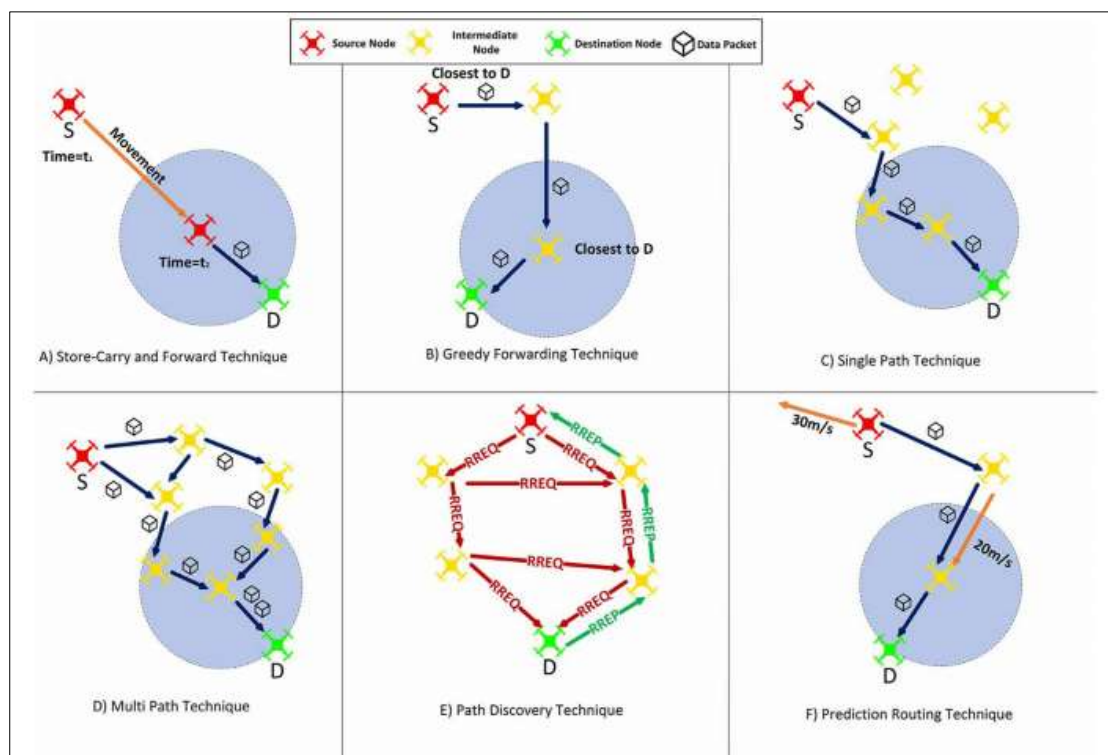
Κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs, είναι απαραίτητο να λαμβάνεται υπόψιν πληροφορία από διαφορετικά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων. Για παράδειγμα, οι συνθήκες του καναλιού, χωρητικότητα και παράγοντες παρεμβολής μπορούν να συναχθούν από το φυσικό επίπεδο, απόδοση και χρονική καθυστέρηση από το επίπεδο σύνδεσης δεδομένων, ευρωστία (robustness), ανοχή στα σφάλματα από το επίπεδο δικτύου και αξιοπιστία και απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) από το επίπεδο εφαρμογής. Επιπλέον, η αποδοτική χρήση των πόρων του συστήματος, η διατήρηση ενέργειας, η ελευθερία βρόχου, η ικανότητα αυτό-

διαμόρφωσης και θέματα επεκτασιμότητας είναι κάποια άλλα θέματα, που πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τον σχεδιασμό πρωτοκόλλου δρομολόγησης για FANETs.

Από άποψη απόδοσης, ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης για FANETs, πρέπει να περιλαμβάνει την ελάχιστη επιβάρυνση δρομολόγησης, υψηλή αξιοπιστία, χαμηλή πιθανότητα απώλειας πακέτων δεδομένων, λογική καθυστέρηση και θα πρέπει να διατηρεί την απόδοσή του σε διάφορους σχηματισμούς, προσαρμόζοντας ανάλογα το σχήμα δρομολόγησης [26].

#### 4.2.1 Τεχνικές δρομολόγησης κατά το σχεδιασμό πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs

Ο σχεδιασμός πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs δεν είναι ένα ασήμαντο έργο κυρίως λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των FANETs, που είναι οι τρισδιάστατες κινήσεις μαζί με την υψηλά δυναμική τοπολογία. Κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης ακολουθεί ένα ή συνδυασμό περισσότερων τεχνικών δρομολόγησης, που περιγράφονται στη συνέχεια και φαίνονται στην Εικόνα 4.1 [90]:



Εικόνα 4.1: Τεχνικές δρομολόγησης FANETs [90]

- **Store-carry and forward:** Σε ένα δίκτυο κατακερματισμένο σε υψηλό βαθμό, μπορεί να είναι αδύνατο για έναν κόμβο να βρει έναν κόμβο αναμετάδοσης εντός του εύρους μετάδοσής του. Σε αυτήν την περίπτωση, ο τρέχων κόμβος θα μεταφέρει το πακέτο μέχρις ότου βρει έναν άλλο κατάλληλο κόμβο αναμετάδοσης ή τον ίδιο τον προορισμό με σκοπό να προωθήσει το πακέτο. Αυτή η τεχνική εισάγει υψηλή καθυστέρηση λόγω των φυσικών κινήσεων του κόμβου.
- **Greedy-based:** Αυτή η τεχνική επιλέγει το μονοπάτι προς τον προορισμό, βάσει του μικρότερου αριθμού αλμάτων (hops). Η λογική πίσω από την άπληστη (greedy) προώθηση είναι να επιλεγεί ως κόμβος αναμετάδοσης, ο κόμβος που γεωγραφικά βρίσκεται πιο κοντά στον προορισμό. Η τεχνική χρησιμοποιείται κυρίως στα FANETs με υψηλή πυκνότητα κόμβων.
- **Single-path:** Υπάρχει μόνο ένα μονοπάτι μεταξύ δύο κόμβων που επικοινωνούν. Αυτή η τεχνική απλοποιεί τη διαχείριση του πίνακα δρομολόγησης σε κάθε κόμβο στο δίκτυο.
- **Multipath:** Υπάρχουν πολλά μονοπάτια μεταξύ δύο επικοινωνούντων κόμβων. Αυτή η τεχνική αυξάνει την πολυπλοκότητα της διαχείρισης των πινάκων δρομολόγησης, αλλά όταν συμβαίνει ένα λάθος, ένα εναλλακτικό μονοπάτι μπορεί να εντοπιστεί, προκειμένου να μειωθούν οι απώλειες πακέτων.
- **Path discovery:** Κάθε φορά που ο κόμβος πηγή/αποστολέας δεν έχει μία εγγραφή προς τον προορισμό στους πίνακες δρομολόγησής του, εκκινεί μια διαδικασία εύρεσης μονοπατιού. Η διαδικασία εύρεσης βασίζεται στη διάδοση πακέτων Route Request (RREQ) είτε μεταδίδοντάς τα στους γείτονές του, είτε χρησιμοποιώντας την τεχνική πλημμύρας (flood technique), έτσι ώστε κάθε κόμβος που λαμβάνει το πακέτο RREQ, το αντιγράφει και το προωθεί στους γείτονές του. Όταν ο προορισμός λάβει τα πακέτα RREQ θα απαντήσει μεταδίδοντας ένα πακέτο Route Reply (RREP) πίσω στην πηγή. Στη συνέχεια αυτό το μονοπάτι θα χρησιμοποιηθεί για τη μετάδοση των πακέτων δεδομένων.
- **Prediction based:** Λαμβάνει υπόψιν τη μελλοντική θέση ενός κόμβου μέσα στο δίκτυο, βάσει της γεωγραφικής του τοποθεσίας, κατεύθυνσης και ταχύτητας. Αυτές οι τρεις παράμετροι μπορούν να παρέχουν την απαραίτητη

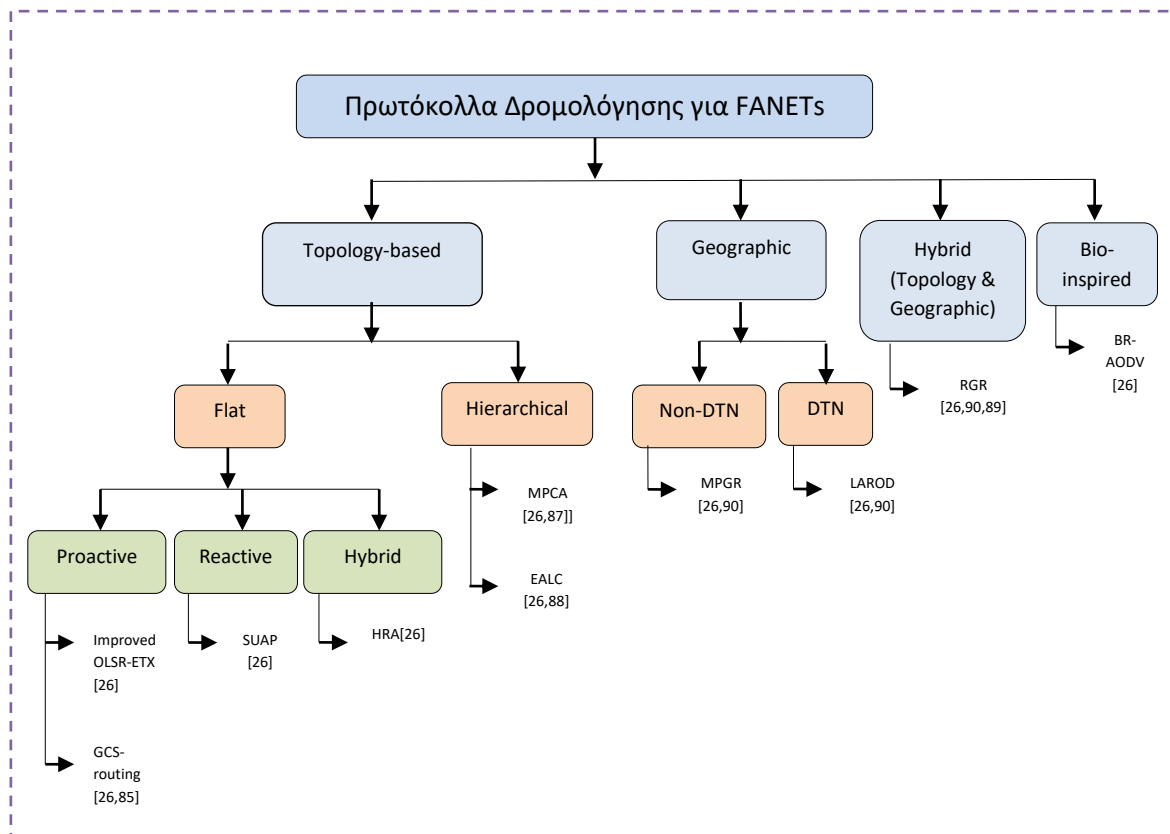
πληροφορία για να προβλεφθεί με ακρίβεια η τοποθεσία του επόμενου κόμβου αναμετάδοσης, που μπορεί να μειώσει το ρυθμό παράδοσης πακέτων καθώς, επίσης, την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο.

#### **4.3 Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs**

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης κατηγοριοποιούνται αρχικά σε τέσσερις κατηγορίες:

- ✓ Βασισμένα στην τοπολογία (Topology-based)
- ✓ Γεωγραφικά (Geographic)
- ✓ Υβριδικά (Hybrid-συνδυασμός των topology-based και geographic)
- ✓ Bio-inspired

Στην βασισμένη στην τοπολογία δρομολόγηση, η πληροφορία δρομολόγησης από τον αποστολέα στον προορισμό πρέπει να ληφθεί σύμφωνα με τις τοπολογικές πληροφορίες των κόμβων του δικτύου πριν αρχίσει η μετάδοση δεδομένων. Τα γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης προωθούν τα πακέτα δεδομένων χρησιμοποιώντας τη γεωγραφική θέση των UAVs. Τα υβριδικά σχήματα δρομολόγησης συνενώνουν τους μηχανισμούς δρομολόγησης των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Η bio-inspired δρομολόγηση είναι εμπνευσμένη από τα φυσικά φαινόμενα των αποικιών μυρμηγκιών, των μελισσών και των κοπαδιών πουλιών. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης σε κάθε κατηγορία οργανώνονται περαιτέρω με βάση τις συγκεκριμένες τεχνικές που χρησιμοποιούνται και τους στόχους για την αντιμετώπιση των προκλήσεων και των απαιτήσεων του σχεδιασμού πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs (Εικόνα 4.2) [26].



**Εικόνα 4.2:** Κατηγοριοποίηση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs

### 4.3.1 Βασισμένα στην τοπολογία (Topology-based)

Τα βασισμένα στην τοπολογία πρωτόκολλα δρομολόγησης χρησιμοποιούν τις IP διευθύνσεις για να προσδιορίσουν με μοναδικό τρόπο κάθε κόμβο και την πληροφορία τοπολογίας των κόμβων στο δίκτυο για την αποστολή/προώθηση των πακέτων δεδομένων. Πριν αρχίσει η μετάδοση δεδομένων, απαιτείται η κατάλληλη διαδρομή δρομολόγησης από την πηγή στον προορισμό.

Τα βασισμένα στην τοπολογία σχήματα δρομολόγησης κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε επίπεδα (flat) και ιεραρχικά (hierarchical cluster-based) με βάση τις ευθύνες των κόμβων στο δίκτυο [26].

#### 4.3.1.1 Επίπεδα (Flat)

Ένα επίπεδο (flat) σχήμα δρομολόγησης χρησιμοποιεί μια επίπεδη προσέγγιση διευθυνσιοδότησης, με τέτοιο τρόπο ώστε κάθε UAV, που παίρνει μέρος στη δρομολόγηση να έχει από έναν ίδιο ρόλο. Επιπλέον, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο η πληροφορία δρομολόγησης λαμβάνεται και

διατηρείται από τα UAVs στο δίκτυο, τα σχήματα επίπεδης δρομολόγησης κατηγοριοποιούνται σε proactive, reactive, και hybrid [26].

#### **4.3.1.1.1 Proactive**

Αυτή η κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης καλείται, επίσης, πρωτόκολλα καθοδηγούμενα από πίνακες (table-driven). Σε αυτό το είδος σχήματος δρομολόγησης, κάθε UAV διατηρεί τις πιο πρόσφατες πληροφορίες διαδρομής στα UAVs στο δίκτυο, ανεξάρτητα από το αν έχουν πακέτα δεδομένων για αποστολή ή όχι, η πληροφορία διαδρομής διατηρείται στον πίνακα δρομολόγησης των UAVs και ενημερώνεται και διαμοιράζεται, περιοδικά, μεταξύ των UAVs στο δίκτυο. Οι πίνακες δρομολόγησης περιέχουν μονοπάτια δρομολόγησης μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων [90]. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται δύο πρωτόκολλα δρομολόγησης αυτής της κατηγορίας [26].

##### **4.3.1.1.1.1 Improved OLSR-ETX**

Το βελτιωμένο OLSR-ETX είναι μια επαύξηση του αυθεντικού πρωτοκόλλου OLSR για FANETs με υψηλή δυναμική, που χρησιμοποιείται σε ναυτικές αποστολές, όπως θαλάσσια περιπολία και θαλάσσια αναζήτηση και διάσωση (FANETs ωκεανού). Στα FANETs με UAVs με υψηλή κίνηση, συχνές αλλαγές στην τοπολογία δικτύου και πολύ μικρός χρόνος σύνδεσης της γραμμής μεταξύ των UAVs θα είναι ένας κανόνας, με αποτέλεσμα υψηλή καθυστέρηση μετάδοσης, λόγω συχνής επανεκλογής νέων MPR (Multi Point Relay) UAVs και νέων διαδρομών δρομολόγησης. Επιπρόσθετα, σε μικρά UAVs, που τροφοδοτούνται από μικρές μπαταρίες, όταν επιλεγεί ένα UAV με λιγότερη εναπομείνασα ενέργεια, η ενέργειά του θα εξαντληθεί γρήγορα, κάτι το οποίο θα προκαλέσει την απώλεια των πακέτων ελέγχου τοπολογίας. Έτσι, επιλέγοντας MPR UAVs, λαμβάνοντας υπόψιν μόνο το βαθμό συνδεσιμότητας των UAVs στο παραδοσιακό OLSR, μπορεί να μην είναι αρκετό για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις. Αναλόγως, στο βελτιωμένο OLSR-ETX, ο χρόνος λήξης της σύνδεσης και η εναπομείνασα ενέργεια των UAVs, λαμβάνονται υπόψιν στη διαδικασία επιλογής MPR UAVs [26].

Η μετρική ETX σταθμίζεται βάσει του χρόνου λήξης της σύνδεσης, που επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη σχετική ταχύτητα και απόσταση μεταξύ

των UAVs. Τα UAVs με εναπομείνασα ενέργεια κάτω από κάποια καθορισμένη τιμή κατωφλίου δεν μπορούν να επιλεγούν ως MPR UAVs. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι το βελτιωμένο OLSR-ETX ξεπέρασε το OLSR με τη μετρική ETX μόνο σε σχέση με την επιβάρυνση δρομολόγησης, την καθυστέρηση από άκρο σε άκρο και τον ρυθμό παράδοσης πακέτου. Όμως, στα FANETs ωκεανού, σύνθετα στοιχεία του περιβάλλοντος, όπως ο αέρας, η ροή της βροχής κλπ, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν για την πρόγνωση και εγκατάσταση του μοντέλου καναλιού. Επιπλέον, στο βελτιωμένο OLSR-ETX, όλα τα UAVs στο δίκτυο θεωρούνται ότι έχουν το ίδιο ύψος και η πληροφορία ύψους των UAVs αγνοείται, κάτι το οποίο δεν είναι πραγματικό στην περίπτωση, που τα UAVs κινούνται σε τρισδιάστατο χώρο. Το πρωτόκολλο μπορεί να βελτιωθεί λαμβάνοντας υπόψιν τα δύο παραπάνω θέματα [26].

#### **4.3.1.1.1.2 Ground Control System Routing (GCS-routing)**

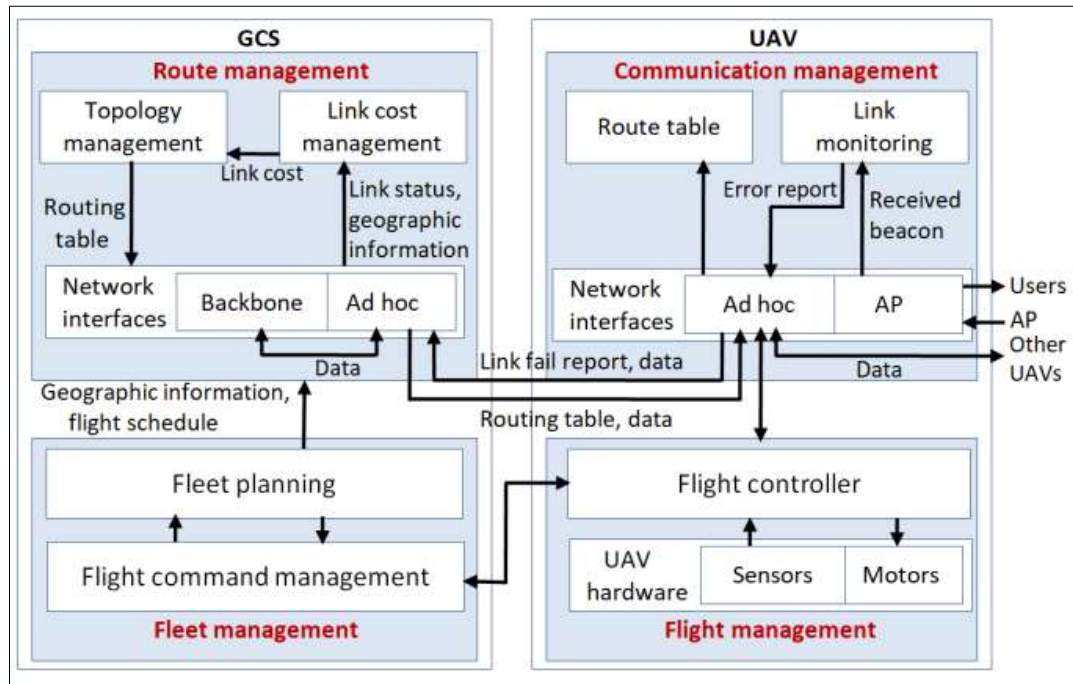
Στα FANETs, επιπρόσθετα με την απαίτηση ισχυρής συνδεσιμότητας μεταξύ των UAVs και του επίγειου σταθμού ελέγχου (GCS), δεδομένου ότι η απώλεια σύνδεσης συνεπάγεται την απώλεια ελέγχου για τα UAVs, οι εφαρμογές που απαιτούν ισχυρό συντονισμό και συνεργασία πολλαπλών UAVs για την εκτέλεση εργασιών (π.χ. ανύψωση και μεταφορά αντικειμένων από πολλαπλά, ενεργό επαναδιαμορφώσιμο σύστημα ανίχνευσης, κ.λ.π. στις αντίστοιχες αρχιτεκτονικές εφαρμογών τους) απαιτούν ισχυρή συνδεσιμότητα μεταξύ των UAVs, έτσι ώστε να μπορούν να διαμοιράζονται τις διεργασίες μεταξύ τους και να επικοινωνούν μεταξύ τους ή με τον GCS. Έτσι, ένα αποτελεσματικό και ανθεκτικό σχήμα δρομολόγησης απαιτείται για να δημιουργηθεί μια αξιόπιστη επικοινωνία για τα UAVs. Όμως, λόγω του υψηλού βαθμού κινητικότητας των UAVs σε ένα τρισδιάστατο χώρο στα FANETs με την υψηλή δυναμική, που έχει ως αποτέλεσμα συχνές αλλαγές τοπολογίας και αποτυχίες σύνδεσης, τα υπάρχοντα σχήματα δρομολόγησης για MANETs, ίσως να μην είναι αρκετά για τις απαιτήσεις. Για αυτό το λόγο, προτάθηκε από τους Woonghee Lee et al στο [85] ένα συγκεντρωτικό πρωτόκολλο δρομολόγησης για FANETs διαχειριζόμενο από τον επίγειο σταθμό ελέγχου. Ο πίνακας δρομολόγησης κάθε UAV κατασκευάζεται και

διανέμεται από τον GCS χρησιμοποιώντας τις γεωγραφικές πληροφορίες κάθε UAV καθώς και τα σχέδια με τις κινήσεις του. Η δρομολόγηση GCS βασίζεται στις ακόλουθες υποθέσεις :

- ✓ Ο επίγειος σταθμός ελέγχου είναι πάντα ενήμερος για τα σχέδια κινητικότητας κάθε UAV, τη γεωγραφική τοποθεσία του και την κατάσταση για τη διαχείριση του πίνακα δρομολόγησής του.
- ✓ Τόσο η ad-hoc όσο και οι access point (AP) διασυνδέσεις δικτύου των UAVs χρησιμοποιούν διαφορετικά κανάλια συχνοτήτων για να αποφύγουν την επίδραση της παρεμβολής των σημάτων μηνυμάτων, που εκπέμπονται ευρέως από τα άλλα UAVs.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική για τη GCS δρομολόγηση, έχει δύο κύρια συστατικά, τον επίγειο σταθμό ελέγχου και τα UAVs. Καθένα από τα οποία είναι εξοπλισμένο με παροχές δικτύου και επικοινωνούν μεταξύ τους είτε απευθείας, είτε με πολλαπλά άλματα/βήματα (multi-hop). Η ενότητα διαχείρισης του στόλου των UAVs στον GCS, σχεδιάζει και δημιουργεί οδηγίες πτήσης και τις αποστέλλει στην ενότητα ελέγχου πτήσης των UAVs, που μεταδίδει την εντολή στο υλικό του UAV και στέλνει τα συλλεχθέντα δεδομένα στον GCS [26], [85].





**Εικόνα 4.3:** Παράδειγμα Αρχιτεκτονική δρομολόγησης GCS [26,85]

Στη συνέχεια, η ενότητα διαχείρισης του στόλου των UAVs ενημερώνει την ενότητα διαχείρισης διαδρομών του GCS με την τρέχουσα θέση του UAV και τα σχέδια κινήσεων. Η ενότητα διαχείρισης διαδρομών εκτιμά το κόστος της σύνδεσης χρησιμοποιώντας τη γεωγραφική πληροφορία των UAVs (εκτιμώμενη διάρκεια για διανομή μηνυμάτων χρησιμοποιώντας τη σύνδεση στη καθορισμένη απόσταση), δημιουργεί τους πίνακες δρομολόγησης και στη συνέχεια τους διανέμει σε κάθε αντίστοιχο UAV διαμέσω της ad hoc διασύνδεσης [26], [85].

Κατά τη διαδικασία εύρεσης διαδρομής, ο GCS δημιουργεί ένα δέντρο, έχοντας τον εαυτό του ως ρίζα και παράγει ένα συγκεντρωτικό μήνυμα διαδρομής αποτελούμενο από πίνακες δρομολόγησης για τα UAVs στο υποδέντρο, έχοντας ως UAV ρίζα, το UAV παιδί του σε απόσταση ενός άλματος. Μετά, εκδίδει το συγκεντρωτικό μήνυμα διαδρομής στους κόμβους παιδιά του. Με την παραλαβή της πληροφορίας διαδρομής, η ενότητα διαχείρισης επικοινωνίας του UAV, τροποποιεί τον πίνακα δρομολόγησης του αναλόγως και διανέμει το μήνυμα διαδρομής κατά τον ίδιο τρόπο ως GCS για το υποδέντρο του. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου το UAV φύλλο λάβει το μήνυμα διαδρομής [26], [85].

Οποτεδήποτε αλλάζει η τοπολογία του δικτύου λόγω της κίνησης των UAVs, ο GCS ενημερώνει τον πίνακα δρομολόγησης των UAVs. Η ενότητα επικοινωνίας των UAVs ελέγχει συνεχώς την κατάσταση της σύνδεσης, που υπάρχει με τους γείτονες βασιζόμενη στον αριθμό των μηνυμάτων σημάτων (beacon) που λαμβάνει από τα APs των γειτόνων. Εάν ένα UAV εντοπίσει μια αποτυχημένη σύνδεση λόγω εμποδίων μεταξύ των UAVs, την αναφέρει στον GCS εκπέμποντας ευρέως ένα πακέτο αποτυχίας σύνδεσης. Όταν ο GCS λάβει την αναφορά αποτυχίας, αυτόματα τροποποιεί το κόστος της αποτυχημένης σύνδεσης και εκδίδει τον ενημερωμένο πίνακα δρομολόγησης μόνο στα UAVs, που απαιτούν ενημέρωση.

Όντας ένα συγκεντρωτικό σχήμα δρομολόγησης, η GCS δρομολόγηση μπορεί να ανταποκριθεί άμεσα και να υιοθετήσει μια νέα τοπολογία μέσα σε μια μικρή χρονική περίοδο με τη διαχείριση των πινάκων δρομολόγησης κεντρικά. Ωστόσο, το μοναδικό σημείο αποτυχίας του επίγειου σταθμού ελέγχου, καθώς και προβλήματα επεκτασιμότητας είναι τα κύρια μειονεκτήματα του πρωτοκόλλου δρομολόγησης GCS. Επιπλέον, η επιβάρυνση ελέγχου λόγω αποτυχίας σύνδεσης ευρείας μετάδοσης για την ενημέρωση του GCS μπορεί να αυξηθεί ανησυχητικά, όταν η κατάσταση της σύνδεσης βρίσκεται σε υψηλή αστάθεια στα FANETs με την υψηλή δυναμική, που εμποδίζει την επεκτασιμότητα του δικτύου [26], [85].

Έτσι, το σχήμα δρομολόγησης GCS, ως ένα συγκεντρωτικό σχήμα δρομολόγησης για τον GCS, μπορεί να βελτιωθεί λαμβάνοντας υπόψιν τεχνολογίες δικτύωσης ορισμένης από το λογισμικό (software-defined networking SDN), όπου ο ελεγκτής μπορεί να φιλοξενηθεί στον επίγειο σταθμό ελέγχου. Αναλόγως, η λειτουργία δρομολόγησης μπορεί να υλοποιηθεί στον ελεγκτή SDN, ο οποίος έχει την ευθύνη επιλογής διαδρομών και αποστολής ενημερώσεων διαδρομών σε όλα τα άλλα UAVs στο δίκτυο. Επίσης, ο ελεγκτής SDN συλλέγει συνεχώς την πληροφορία συνδεσιμότητας από όλα τα UAVs και μαθαίνει την τοπολογία του δικτύου. Η δρομολόγηση GCS μπορεί, επίσης, να χρησιμοποιηθεί σε σενάρια εφαρμογών επέκτασης κάλυψης δικτύου, που αποτελούνται από UAVs με αρχιτεκτονική επικοινωνίας ενός επιπέδου και μιας ομάδας [26], [85].

Στα proactive σχήματα δρομολόγησης, κάθε UAV διατηρεί έναν πίνακα δρομολόγησης, που ανανεώνεται περιοδικά για να υποδείξει την πιο πρόσφατη πληροφορία δρομολόγησης στα άλλα UAVs στο δίκτυο. Κάθε φορά, που ένα UAV χρειάζεται να στείλει πακέτα δεδομένων, μπορεί να αποκτήσει τη διαδρομή δρομολόγησης από τον πίνακα δρομολόγησής του και να μεταδώσει τα πακέτα αμέσως [26].

Για την αντιμετώπιση των προκλήσεων των διακοπτόμενων συνδέσεων και των συχνών αλλαγών στην τοπολογία, που προκύπτουν από την υψηλή κινητικότητα των UAVs και τη διακύμανση της απόστασης μεταξύ των UAVs, που επικρατούν στα περισσότερα σενάρια εφαρμογών και οδηγούν σε υψηλή απώλεια πακέτων και καθυστέρηση, έχουν υλοποιηθεί προσεγγίσεις ευριστικές και προβλέψεων (prediction). Η πρόβλεψη της κινητικότητας βοηθάει στην εύρεση της πιο σταθερής σύνδεσης στο μονοπάτι δρομολόγησης και ως εκ τούτου βελτιώνει το ρυθμό διανομής πακέτων και την καθυστέρηση. Επιπρόσθετα, η ενέργεια και η κατάσταση του φορτίου των UAVs στο δίκτυο λαμβάνονται υπόψιν σε κάποια πρωτόκολλα δρομολόγησης για να μεγιστοποιήσουν τη διάρκεια ζωής του δικτύου, να καθιερώσουν αξιόπιστη επικοινωνία και να αποφύγουν πρόσθετες καθυστερήσεις με την μη επιλογή των υπερφορτωμένων UAVs στο μονοπάτι δρομολόγησης, που είναι σημαντικές απαιτήσεις για εφαρμογές πραγματικού χρόνου και για μεταδόσεις ελέγχου και εντολών για αποδοτικό και αποτελεσματικό έλεγχο και συντονισμό των UAVs. Ωστόσο, η περιοδική ενημέρωση του πίνακα δρομολόγησης, ανεξάρτητα από τα πακέτα δεδομένων για αποστολή και τις αλλαγές στην τοπολογία, απαιτεί ένα μεγάλο αριθμό πακέτων ελέγχου να ανταλλάσσονται μεταξύ των UAVs στο δίκτυο, ειδικά στα πυκνά FANETs, με υψηλή δυναμική, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα σημαντική επιβάρυνση δρομολόγησης και αναποτελεσματικότητα της σπάνιας χρήσης πόρων όπως εύρος ζώνης και ενέργεια των UAVs. Η χρήση της μνήμης και η πολυπλοκότητα αυτής της κατηγορίας πρωτοκόλλων δρομολόγησης θα αυξάνεται, καθώς αυξάνεται ο αριθμός των UAVs στο δίκτυο και ο βαθμός κινητικότητάς τους, κάτι το οποίο οδηγεί σε πρόβλημα επεκτασιμότητας και εξαντλεί γρήγορα τη μπαταρία μικρών UAVs. Τα proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα για εφαρμογές

πραγματικού χρόνου σε αρχιτεκτονικές φυσικά συνδεδεμένες και συντονισμένου σχηματισμού, αποτελούμενες από μικρό αριθμό UAVs με χαμηλό βαθμό κινητικότητας. Λόγω του περιορισμού της επεκτασιμότητας, θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα για αρχιτεκτονικές επικοινωνίας ενός επιπέδου και μιας ομάδας [26].

#### **4.3.1.1.2 Reactive**

Δεν υπάρχει προκαθορισμένη διαδρομή δρομολόγησης μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων, που έχει καταχωρηθεί σε πίνακες δρομολόγησης. Οι κόμβοι χρησιμοποιούν μια διαδικασία εύρεσης διαδρομής κατά απαίτηση, όταν θέλουν να δημιουργήσουν μια σύνδεση [90]. Αυτή η κατηγορία σχημάτων δρομολόγησης, γνωστή, επίσης, ως πρωτόκολλα κατά απαίτηση, είναι εκείνα όπου ένα UAV πυροδοτεί μια διαδικασία εύρεσης διαδρομής, μόνο εάν έχει να στείλει πακέτα δεδομένων και δεν έχει διαδρομή δρομολόγησης προς το UAV προορισμού στο δίκτυο. Έχει δημιουργηθεί για να προσπεράσει τους περιορισμούς των σχημάτων της proactive δρομολόγησης σχετικά με εύρος ζώνης και κατανάλωση ισχύος, ελαττώνοντας την επιβάρυνση της διαχείρισης διαδρομής. Ο μηχανισμός εύρεσης διαδρομής χρησιμοποιεί μια τεχνική flooding, όπου μια πηγή UAV μεταδίδει ευρέως ένα μήνυμα αίτησης διαδρομής (route request-RREQ) σε όλα τα γειτονικά UAVs. Μετά, τα γειτονικά UAVs, που λαμβάνουν το πακέτο RREQ επαναμεταδίδουν ευρέως το RREQ στα δικά τους γειτονικά UAVs, μέχρις ότου παραληφθεί από το καθορισμένο UAV προορισμού ή από ένα άλλο ενδιάμεσο UAV, που είναι στη διαδρομή για τον προορισμό. Στη συνέχεια, το καθένα από αυτά απαντά στέλνοντας ένα πακέτο απόκρισης διαδρομής (route reply-RREP) στο UAV πηγή. Από τη στιγμή, που το UAV πηγή λαμβάνει το πακέτο απόκρισης, η διαδικασία επικοινωνίας αρχίζει.

Σε αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, μόνο η πληροφορία δρομολόγησης των ενεργών διαδρομών διατηρείται. Επομένως, ο μηχανισμός συντήρησης διαδρομών χρησιμοποιείται για να διατηρήσει έγκυρες διαδρομές και να διαγράψει άκυρες διαδρομές. Στην περίπτωση ενημέρωσης της τοπολογίας, αφαιρεί τις αποτυχημένες διαδρομές και ξαναξεκινάει τη διαδικασία εύρεσης. Η απουσία περιοδικής ενημέρωσης του πίνακα δρομολόγησης, κάνει τα

πρωτόκολλα της reactive δρομολόγησης αποδοτικά όσον αφορούν το εύρος ζώνης, συγκρινόμενα με τα proactive πρωτόκολλα δρομολόγησης. Στη συνέχεια περιγράφεται, ενδεικτικά, ένα πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας [26].

#### **4.3.1.1.2.1 Secure UAV Ad hoc routing Protocol (SUAP)**

Εκτός από την εύρεση ενός αξιόπιστου και αποτελεσματικού μονοπατιού μεταξύ των UAVs στο δίκτυο εντός μιας λογικής χρονικής περιόδου, το πρωτόκολλο δρομολόγησης για ένα FANET απαιτείται να είναι ασφαλές καθώς μεταδίδει μηνύματα ανίχνευσης, εντολών, ελέγχου και κίνησης πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Για αυτό το λόγο, προτάθηκε το πρωτόκολλο SUAP για FANETs, το οποίο ενσωματώνει γεωγραφικά δεσμά (leashes), αλυσίδες κατακερματισμού και κρυπτογραφία δημοσίου κλειδιού στο πρωτόκολλο δρομολόγησης AODV. Το SUAP υλοποιεί ψηφιακές υπογραφές για σταθερά χαρακτηριστικά, όπως αριθμός σειράς του δέκτη και του αποστολέα και IP διεύθυνση του δέκτη καθώς επίσης και αλυσίδες κατακερματισμού για μεταβλητές ιδιότητες, για παράδειγμα αριθμός αλμάτων/βημάτων. Το UAV αποστολέας που δημιουργεί ένα πακέτο δρομολόγησης, το υπογράφει χρησιμοποιώντας το δικό του ιδιωτικό κλειδί και επαληθεύεται από το UAV, που λαμβάνει το πακέτο χρησιμοποιώντας το δημόσιο κλειδί του UAV αποστολέα. Επειδή ο αριθμός των βημάτων/αλμάτων πρέπει να αυξάνεται σε κάθε ενδιάμεσο UAV, δεν μπορεί να υπογραφεί από το UAV αποστολέα. Έτσι, μια προσέγγιση που χρησιμοποιεί αλυσίδες κατακερματισμού εφαρμόζεται.

Ως εκ τούτου, το προτεινόμενο πρωτόκολλο εκτίθεται σε επιθέσεις σκουληκότρυπας (Η επίθεση σκουληκότρυπας (wormhole) είναι μια επίθεση επιπέδου δικτύου, που ξεκίνησε από κακόβουλους κόμβους δημιουργώντας μία σήραγγα (tunnel) διαμέσω της οποίας τα πακέτα αναπαράγονται σε κακόβουλους κόμβους, διαταράσσοντας το κανάλι επικοινωνίας και καταστρέφοντας τη διαδικασία δρομολόγησης. Η σήραγγα σκουληκότρυπας δημιουργείται από δύο οποιοσδήποτε κακόβουλους κόμβους, οι οποίοι συνεργάζονται για να δημιουργήσουν την ψευδαίσθηση ότι είναι ένα άλμα μακριά ο ένας από τον άλλον, προκαλώντας τη δρομολόγηση των πακέτων μέσω αυτών σαν να ήταν γειτονικοί κόμβοι. Μόλις καθιερωθεί η σήραγγα με επιτυχία, μπορούν να παραβιάσουν τα πακέτα, να τα

πετάξουν ή να τα προωθήσουν επιλεκτικά [86]), που καταγράφουν ένα πακέτο σε μία θέση και προωθείται μέσω ενός ιδιωτικού δικτύου υψηλής ταχύτητας στην άλλη θέση. Συνεπώς, η συσχέτιση του αριθμού αλμάτων με την διανυθείσα απόσταση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας γεωγραφικά δεσμά. Για να εφαρμοστεί αυτό, κάθε UAV πρέπει να διατηρεί την τοπική συνδεσιμότητά του με τους απευθείας γείτονες. Κατά τη διάρκεια αποστολής πακέτων, κάθε UAV ενσωματώνει την πληροφορία τοποθεσίας του. Η μορφοποίηση του μηνύματος “hello” τροποποιείται για να κρατήσει την πληροφορία τοποθεσίας των κόμβων. Για να αποφευχθεί κακόβουλη αλλοίωση, τα πεδία του μηνύματος καθώς, επίσης, η πληροφορία τοποθεσίας υπογράφονται. Ωστόσο, σαν αποτέλεσμα του χαρακτηριστικού της ευρείας μετάδοσης στα ασύρματα δίκτυα, εισβολείς μπορούν να πάρουν τα πακέτα που έχουν μεταδοθεί ευρέως. Για να επιλυθεί το ζήτημα, το SUAP εφαρμόζει ένα σύνολο από τεχνικές επαλήθευσης, που ελέγχουν τη συσχέτιση της απόστασης, που έχει διανύσει το πακέτο με τον αριθμό αλμάτων/βημάτων.

Με αυτόν τον τρόπο, προκειμένου να αναγνωριστεί η σύνδεση τύπου σκουληκότρυπας, η τιμή του αριθμού αλμάτων, που έχει υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τη διανυθείσα απόσταση, συγκρίνεται με την τιμή του αριθμού αλμάτων, που υπάρχει στο πακέτο. Εάν οι δύο αυτές τιμές είναι διαφορετικές, η σύνδεση θεωρείται ως σύνδεση σκουληκότρυπας και το πακέτο απορρίπτεται αμέσως. Διαφορετικά, ξεκινά η διαδικασία επαλήθευσης υπογραφής, αφού η σύνδεση θεωρείται ελεύθερη από εισβολή σκουληκότρυπας.

Παρόλο, που το SUAP απέδειξε την αποτελεσματικότητά του για την προστασία πακέτων, που ανταλλάσσονται μεταξύ κόμβων από εισβολές σκουληκότρυπας χρησιμοποιώντας τις παραπάνω τεχνικές, δεν παρέχει έναν ανθεκτικό μηχανισμό για ανάκτηση από τις συχνές αποσυνδέσεις μεταξύ των UAVs λόγω της υψηλής κινητικότητάς τους.

Σύμφωνα με το αποτέλεσμα πραγματικού πειράματος, που έγινε χρησιμοποιώντας τρεις κόμβους, η καθυστέρηση για την αποκατάσταση μιας νέας διαδρομής όταν συμβεί μια αποτυχία διαδρομής δεν είναι αμελητέα, ειδικά για εφαρμογές πραγματικού χρόνου συμπεριλαμβανομένων λήψη βίντεο και αεροφωτογράφιση σε σενάρια εφαρμογών απομακρυσμένης

παρακολούθησης και περιβαλλοντικών μετρήσεων. Η απόδοση του πρωτοκόλλου θα πρέπει να εκτιμηθεί με κόμβους υψηλής πυκνότητας. Το SUAP είναι κατάλληλο για εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις ασφάλειας όπως στρατιωτικές, για παράδειγμα αυτοματοποιημένη επιτήρηση [26].

Γενικότερα, τα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης αποφεύγουν την ανάγκη περιοδικής ανταλλαγής μηνυμάτων ελέγχου και η πληροφορία δρομολόγησης λαμβάνεται και διατηρείται μόνο όταν ένα UAV έχει ένα πακέτο δεδομένων για αποστολή και έτσι η επιβάρυνση ελέγχου ελαττώνεται. Τα υπάρχοντα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης για MANETs έχουν βελτιωθεί χρησιμοποιώντας πρόγνωση της κινητικότητας και ευριστικές προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση των προκλήσεων και απαιτήσεων του σχεδιασμού δρομολόγησης για FANETs. Μία αποτελεσματική τεχνική πρόβλεψης κινητικότητας είναι απαραίτητη, ειδικά στα FANETs με την υψηλή δυναμική για την επιλογή της πιο σταθερής σύνδεσης και την καθιέρωση αξιόπιστης επικοινωνίας μεταξύ των UAVs. Ένα ασφαλές και ανθεκτικό σχήμα δρομολόγησης είναι, επίσης, σημαντικό για εφαρμογές σε εχθρικά περιβάλλοντα για τη μετάδοση κρίσιμων μηνυμάτων όπως ανίχνευσης, ελέγχου και εντολών.

Ωστόσο, υψηλή καθυστέρηση λόγω της διαδικασίας εξεύρεσης διαδρομής είναι το κύριο μειονέκτημα αυτών των πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Επιπρόσθετα, η μετάδοση των πακέτων RREQ και RERR κατά τις φάσεις εύρεσης διαδρομής και διατήρησης αντίστοιχα, έχει ως αποτέλεσμα υψηλή συμφόρηση, ενέργεια και κατανάλωση εύρους ζώνης. Επομένως, δεδομένης της περιορισμένης ενέργειας των UAVs και του περιορισμού στο εύρος ζώνης, ένα σχήμα δρομολόγησης αποτελεσματικό σε ενέργεια και εύρος ζώνης απαιτείται. Τα reactive σχήματα δρομολόγησης θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα για εφαρμογές, που περιλαμβάνουν ένα μικρό έως μεσαίο αριθμό από UAVs και μπορούν να ανεχθούν την καθυστέρηση επικοινωνίας, που προκύπτει από τη δημιουργία νέας διαδρομής σε χαλαρά συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές εφαρμογής και ενός επιπέδου και μιας ομάδας αρχιτεκτονικές επικοινωνίας, αντίστοιχα [26].

#### **4.3.1.1.3 Hybrid**

Τα υβριδικά σχήματα δρομολόγησης συνενώνουν τα χαρακτηριστικά των τεχνικών δρομολόγησης proactive και reactive με διάφορους τρόπους. Δημιουργήθηκαν για να υπερπηδήσουν την υψηλή καθυστέρηση των reactive σχημάτων, που προκαλείται από την εξεύρεση της διαδρομής και του προβλήματος επιβάρυνσης δρομολόγησης των proactive σχημάτων δρομολόγησης. Το δίκτυο χωρίζεται σε ζώνες, όπου εντός κάθε ζώνης εφαρμόζεται proactive ή reactive δρομολόγηση, ενώ για την επικοινωνία μεταξύ των ζωνών εφαρμόζεται proactive ή reactive δρομολόγηση, επίσης [90]. Στη συνέχεια περιγράφεται ένα πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας.

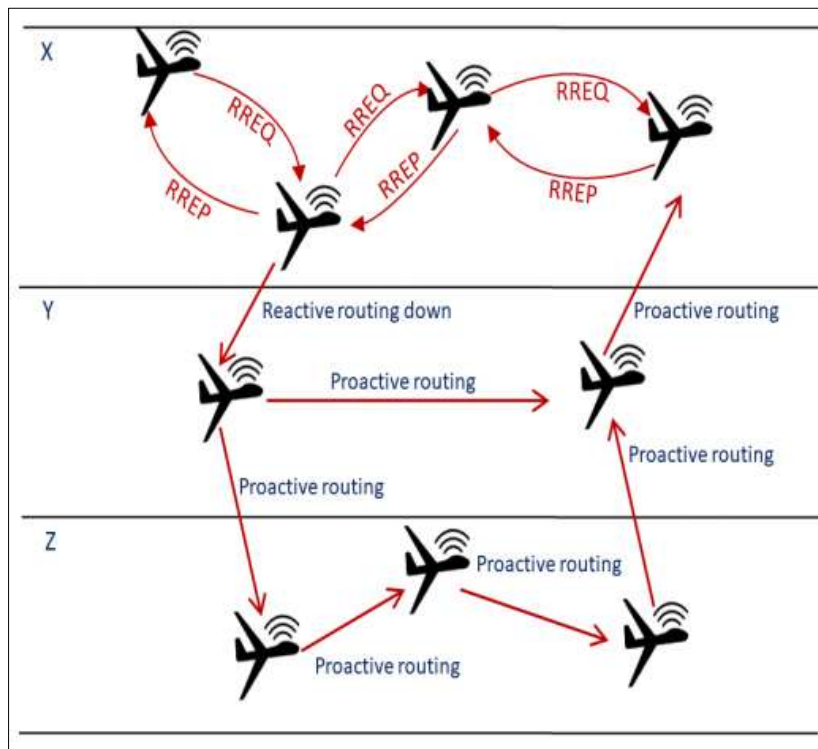
##### **4.3.1.1.3.1 A hybrid routing algorithm (HRA)**

Το HRA είναι ένα υβριδικό σχήμα δρομολόγησης, που συνενώνει τα χαρακτηριστικά των reactive και proactive αλγορίθμων δρομολόγησης και έχει προταθεί για ένα συγκεκριμένο σενάριο εφαρμογής για FANET, που εκτελεί αποστολές αναγνώρισης. Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται το στοχευμένο σενάριο εφαρμογής, όπου UAVs λειτουργούν σε διαφορετικά μονοπάτια, υψόμετρα και με διαφορετικές ταχύτητες. Πιο αναλυτικά, τα UAVs στην κλάση X, που έχουν υψηλή ταχύτητα και υψόμετρο, σαρώνουν μια συγκεκριμένη περιοχή και προωθούν την πληροφορία στα UAVs της χαμηλότερης κλάσης. Τα UAVs της κλάσης Y περιπολούν ορισμένες περιοχές σε ένα μεσαίο υψόμετρο και με μεσαία ταχύτητα, λαμβάνουν την εργασία παρατήρησης από τα UAVs της ανώτερης κλάσης για μια λεπτομερή εικόνα της περιοχής, αφού τα UAVs της ανώτερης κλάσης μόνο σαρώνουν μια περιοχή για μια μικρή διάρκεια και με μικρή λεπτομέρεια λόγω της υψηλής ταχύτητάς τους. Αυτά τα UAVs περνούν την πληροφορία στα UAVs της χαμηλότερης κλάσης για παράδοση στο σταθμό εδάφους.

Αντίστροφα, τα UAVs σε χαμηλό ή μεσαίο υψόμετρο μπορούν να αιτηθούν σε ένα UAV σε υψηλό υψόμετρο να αποκτήσει μια ευρεία εικόνα μιας συγκεκριμένης περιοχής. Τα UAVs της κλάσης Z αιωρούνται σε χαμηλό υψόμετρο και με χαμηλή ταχύτητα, έχουν την ευθύνη της παράδοσης των πακέτων στον σταθμό ελέγχου εδάφους, ενεργώντας ως UAVs αναμεταδότες [26].



Το προτεινόμενο σχήμα δρομολόγησης χρησιμοποιεί και reactive και proactive πρωτόκολλα λαμβάνοντας υπόψιν την κλάση κάθε UAV της Εικόνας 4.4. Λόγω του ότι τα UAVs στην κλάση X κινούνται με υψηλή ταχύτητα, ένα reactive πρωτόκολλο δρομολόγησης με ελάχιστη απόσταση προτιμάται για επικοινωνία μεταξύ των UAVs αυτής της κλάσης και της χαμηλότερης κλάσης.



**Εικόνα 4.4:** Παραδειγματική συμπεριφορά του Αλγορίθμου Hybrid Routing [26]

Ο λόγος που επιλέγεται η reactive δρομολόγηση για αυτή την κλάση των UAVs, δικαιολογείται από το περιβάλλον υψηλής ταχύτητας. Αφού η proactive δρομολόγηση θα μπορούσε να περιλαμβάνει ένα σημαντικό αριθμό εσφαλμένων διαδρομών στον πίνακα δρομολόγησης, που οδηγεί σε μεγάλη απώλεια πακέτων. Τα UAVs της κλάσης Y και της κλάσης Z χρησιμοποιούν proactive πρωτόκολλα των UAVs της ανώτερης κλάσης. Η πληροφορία συντονισμού των UAVs χρησιμοποιείται για να προσδιοριστούν οι κλάσεις στις οποίες ανήκουν. Μελέτες προσομοίωσης εκτελέστηκαν για αξιολόγηση της απόδοσης του εισαγόμενου αλγορίθμου σε όρους ρυθμού διανομής πακέτων, επιβάρυνσης δρομολόγησης και καθυστέρησης λαμβάνοντας υπόψιν διαφορετικό αριθμό από UAVs, την κινητικότητα των UAVs και την πυκνότητά τους. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η καθυστέρηση αυξάνονταν

καθώς αυξάνονταν και το μέγεθος του δικτύου, κάτι το οποίο μπορεί να είναι και ζήτημα επεκτασιμότητας του δικτύου. Επιπλέον, όλες οι μετρικές απόδοσης που λήφθηκαν υπόψιν έδειξαν ευαισθησία σε σενάρια υψηλής κινητικότητας. Το HRA μπορεί να βελτιωθεί ενσωματώνοντας πρόβλεψη κινητικότητας και τεχνικές εκτίμησης ακριβούς τοποθεσίας για αξιόπιστη μετάδοση πακέτων και μειωμένη καθυστέρηση. Είναι κατάλληλο για επικοινωνία μεταξύ UAVs και μεταξύ UAVs και επίγειου σταθμού ελέγχου κατά τη διάρκεια αποστολών αναγνώρισης χρησιμοποιώντας αρχιτεκτονική επικοινωνίας πολλών επιπέδων και πολλών ομάδων [26].

Γενικά, τα υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης συνδυάζουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά των reactive και proactive πρωτοκόλλων και μπορούν να μετριάσουν τους περιορισμούς της υψηλής καθυστέρησης από άκρο σε άκρο και της υψηλής επιβάρυνσης από σήματα ελέγχου δρομολόγησης στα reactive και proactive πρωτόκολλα, αντίστοιχα. Συνεπώς, αυτή η κλάση πρωτοκόλλων δρομολόγησης δίνει καλύτερα αποτελέσματα απόδοσης σε όρους καθυστέρησης, ρυθμό διανομής πακέτων και επεκτασιμότητα. Όμως, η επιβάρυνση από τα σήματα ελέγχου μπορεί να αυξηθεί σημαντικά λόγω της συνεχούς ανίχνευσης συνδέσμων κατά τη μετάδοση δεδομένων σε σενάρια με δίκτυα υψηλής κινητικότητας και πυκνά. Έτσι, η σχεδίαση ενεργειακά αποδοτικών και με ποιότητα υπηρεσιών υβριδικών πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι μια σημαντική πρόκληση για έρευνα. Τα υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφαρμογές ενός επιπέδου και μιας ομάδας, που περιλαμβάνουν έναν μικρό έως μεγάλο αριθμό από UAVs, καθώς επίσης σε εφαρμογές που περιλαμβάνουν ετερογενή UAVs σε διαφορετικούς σχηματισμούς σε πολλών επιπέδων και πολλών ομάδων αρχιτεκτονικές επικοινωνίας [26].

#### **4.3.1.2 Hierarchical (cluster-based)**

Καθώς το μέγεθος των δικτύων αυξάνει, μια στρατηγική επίπεδης δρομολόγησης παράγει έναν τεράστιο όγκο μηνυμάτων δρομολόγησης, που μπορεί να κατακλύσουν το δίκτυο. Περαιτέρω, το δίκτυο μπορεί να αποτελείται από ετερογενείς κόμβους, που έχουν διαφορετική ποσότητα πόρων και υπολογιστικών δυνατοτήτων και οι οποίοι δημιουργούν μια

ιεραρχία από την πλευρά τους στο δίκτυο. Η ιεραρχική δρομολόγηση (cluster-based) είναι μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για την επίλυση της ετερογένειας των κόμβων, τη μείωση των μηνυμάτων δρομολόγησης που διαχέονται στο δίκτυο προκαλώντας συμφόρηση και επαύξηση της επεκτασιμότητας του δικτύου. Εκχωρεί διαφορετικούς ρόλους στα UAVs του δικτύου με βάση διαφορετικά κριτήρια συμπεριλαμβανομένων υπολογιστική και επικοινωνιακή ισχύ, ενέργεια και σχέδιο κινητικότητας.

Έτσι, τα UAVs οργανώνονται σε διαφορετικές ομάδες, που καλούνται συμπλέγματα (clusters). Ένα αντιπροσωπευτικό UAV, που αναφέρεται ως κεφαλή του συμπλέγματος (cluster head-CH) εκχωρείται σε κάθε σύμπλεγμα. Είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της δραστηριότητας του συμπλέγματος και για τις επικοινωνίες μεταξύ των συμπλεγμάτων ανάλογα με την υλοποίηση. Τα UAVs σε ένα σύμπλεγμα βρίσκονται εντός του εύρους μετάδοσης της κεφαλής του συμπλέγματος.

Διαφορετικές στρατηγικές δρομολόγησης μπορούν να εφαρμοστούν για επικοινωνίες μεταξύ συμπλεγμάτων αλλά και εντός συμπλέγματος. Η κύρια πρόκληση σε αυτήν την κατηγορία πρωτοκόλλων, είναι η επιλογή της κεφαλής του κάθε συμπλέγματος και η διαχείριση των συμπλεγμάτων, ειδικά στα δίκτυα με υψηλή δυναμική. Η βασική αρχή αυτού του σχήματος διαμόρφωσης συμπλεγμάτων για FANET, είναι ότι δημιουργεί την αρχιτεκτονική συμπλεγμάτων στο έδαφος, αφού αποστέλλονται σε τακτά χρονικά διαστήματα αναθεωρήσεις συμπλεγμάτων καθ' όλη τη διάρκεια της αποστολής στο δίκτυο. Είναι επιθυμητή η δημιουργία ενός όχι σύνθετου συμπλέγματος για την παροχή βελτιωμένης συνδεσιμότητας μεταξύ των UAVs. Στη συνέχεια περιγράφονται δύο πρωτόκολλα δρομολόγησης αυτής της κατηγορίας.

#### **4.3.1.2.1 Mobility Prediction Clustering Algorithm (MPCA)**

Στο [87], έχει προταθεί ένας αλγόριθμος σχηματισμού συμπλεγμάτων για FANETs, που λέγεται Mobility Prediction Clustering Algorithm (MPCA). Ένας συνδυασμός του χρόνου εκπνοής/λήξης σύνδεσης (Link Expiration Time-LET), που αναπαριστά το χρονικό διάστημα, που υπάρχει μια σύνδεση μεταξύ δύο UAVs χρησιμοποιώντας την τοποθεσία, την ταχύτητα και

πληροφορία κατεύθυνσης και του αλγόριθμου πρόβλεψης Dictionary Trie Structure (DTS) χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της τοπολογίας του δικτύου για την ελαχιστοποίηση του ρυθμού των ενημερώσεων του συμπλέγματος (cluster), λόγω της υψηλής κινητικότητας των UAVs.

Η κεφαλή ενός συμπλέγματος επιλέγεται με βάση το αποτέλεσμα του σταθμισμένου αθροίσματος του χρόνου εκπνοής/λήξης σύνδεσης (Link Expiration Time-LET) και των σχημάτων πρόβλεψης DTS, με τέτοιο τρόπο ώστε το UAV, που έχει την υψηλότερη τιμή μεταξύ των γειτόνων του εκχωρείται ως η κεφαλή του συμπλέγματος. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα προσομοίωσης, ο προτεινόμενος μηχανισμός επιλογής κεφαλής βοηθάει στη δημιουργία μιας σταθερής δομής συμπλέγματος. Το σχήμα δρομολόγησης με επίγνωση την πρόβλεψη της τοπολογίας, είναι μία ευοίωνη προσέγγιση στα FANETs με την υψηλή δυναμική. Το πρωτόκολλο MPCA μπορεί να βελτιωθεί λαμβάνοντας υπόψιν το ενεργειακό επίπεδο των UAVs στον υπολογισμό του βάρους και υλοποιώντας ένα ακριβές σχήμα πρόβλεψης τοποθεσίας για την προώθηση των πακέτων. Το MPCA μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γρήγορη κίνηση σε εφαρμογές FANETs [26], [87].

#### **4.3.1.2.2 Energy Aware Link-based Clustering (EALC)**

Ο περιορισμός της ενέργειας, ειδικά για μικρού μεγέθους UAVs και η δυναμική κινητικότητα των UAVs έχουν ως αποτέλεσμα πτήσεις μικρής διάρκειας και αναποτελεσματικά προβλήματα δρομολόγησης στα FANETs. Για αυτούς τους λόγους, οι συγγραφείς στο [88] πρότειναν το σχήμα δρομολόγησης EALC για FANETs. Για να επιλυθούν αυτά τα προβλήματα, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο πυκνότητας συμπλέγματος K-means για την αρχική επιλογή των κεντροειδών (centroids). Μια βέλτιστη επιλογή κεφαλής συμπλέγματος βελτιώνει το χρόνο ζωής του συμπλέγματος, καθώς επίσης μειώνει την επιβάρυνση του συμπλέγματος. Κατά τη διάρκεια της εκλογής της κεφαλής, το EALC χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του αλγορίθμου πυκνότητας K-means λαμβάνοντας υπόψιν δύο παραμέτρους, που είναι το επίπεδο ενέργειας και η απόσταση από τα γειτονικά UAVs για τη βέλτιστη εκλογή της κεφαλής του συμπλέγματος. Ο πρωτότυπος αλγόριθμος πυκνότητας K-means λαμβάνει υπόψιν μόνο το βαθμό γειννίασης. Επιπρόσθετα, το EALC

επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση ενέργειας των UAVs επιλέγοντας αποτελεσματικά την ισχύ μετάδοσης των UAVs βάσει των απαιτήσεων δικτύου (π.χ. ανάγκη για ελάχιστο εύρος επικοινωνίας για ένα UAV για να επικοινωνεί αποτελεσματικά).

Για τη δημιουργία συμπλεγμάτων και την επιλογή της κεφαλής, το EALC χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο K-means ταξινομημένης φυσικής κατάστασης (fitness) στον οποίο λαμβάνονται υπόψιν το ενεργειακό επίπεδο και η απόσταση για τον υπολογισμό της τιμής φυσικής κατάστασης. Το εύρος επικοινωνίας της κεφαλής συμπλέγματος λαμβάνεται υπόψιν για να αποφασιστεί ο αριθμός και το πλήθος των συμπλεγμάτων. Με τη λήψη της πληροφορίας τοποθεσίας και την επιλογή του εύρους μετάδοσης, κάθε UAV υπολογίζει τη δική του τιμή φυσικής κατάστασης και την προωθεί στα γειτονικά UAVs. Το UAV με την υψηλότερη τιμή φυσικής κατάστασης θα εκλεγεί ως κεφαλή, ενώ όλα τα άλλα UAVs στο επικοινωνιακό εύρος της κεφαλής θα γίνουν μέλη του συμπλέγματος (cluster members). Η συντήρηση του συμπλέγματος θα ζητηθεί εάν η τιμή φυσικής κατάστασης της κεφαλής του συμπλέγματος πέσει κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο κατωφλίου. Παρόλο που το EALC βελτιώνει το χρόνο ζωής των UAVs, δημιουργώντας με αποτελεσματικό τρόπο συμπλέγματα αφενός και ελέγχοντας το εύρος μετάδοσης των UAVs στο δίκτυο αφετέρου, συγκρινόμενο με τα άλλα σχήματα, που έχουν προταθεί για VANETs και βασίζονται στις τεχνικές βελτιστοποίησης ant colony και grey wolf, λαμβάνει υπόψιν μόνο τα UAVs με μεσαία κινητικότητα. Βέβαια, μπορεί να βελτιωθεί ενσωματώνοντας έναν αποτελεσματικό μηχανισμό πρόβλεψης κινητικότητας για την επιτέλεση αποτελεσματικής δρομολόγησης και των UAVs με την πολύ υψηλή κινητικότητα στο δίκτυο. Το EALC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές με UAVs με χαμηλό βαθμό κινητικότητας και συντονισμένη κίνηση όπως παρακολούθηση άγριων ζώων, ανίχνευση δασικών πυρκαγιών και αποστολές αναγνώρισης [26], [88].

Τα ιεραρχικά (cluster-based) πρωτόκολλα δρομολόγησης έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα σε όρους ευελιξίας και επεκτασιμότητας. Είναι κατάλληλα για FANETs μεγάλης κλίμακας, αποτελούμενα από ετερογενή UAVs με διαφορετικές δυνατότητες επικοινωνίας, χωρητικότητας ενέργειας,

αποθήκευσης και επεξεργασίας και μέγεθος. Αυτή η κλάση πρωτοκόλλων δρομολόγησης αποτελείται από δύο κύριες φάσεις, το σχηματισμό του συμπλέγματος και τη φάση απόφασης δρομολόγησης για τη δρομολόγηση εντός του συμπλέγματος (intra-cluster) και μεταξύ συμπλεγμάτων (inter-cluster). Αναλόγως, εισάγονται διαφορετικές στρατηγικές συμπλέγματος και αλγόριθμοι με διαφορετικούς στόχους βελτιστοποίησης, όπως μέγιστη διάρκεια ζωής του UAV, μέγιστη σταθερότητα συμπλέγματος και ελάχιστη εκλογή κεφαλής καθώς και επιβάρυνση συντήρησης. Οι πιο σημαντικές προκλήσεις στο σχηματισμό συμπλέγματος και στην εκλογή κεφαλής είναι η περιορισμένη ενέργεια πάνω στα UAVs και η υψηλή κινητικότητά τους στα περισσότερα σενάρια εφαρμογών FANETs. Για παράδειγμα, η συχνότητα ενημέρωσης της κεφαλής συμπλέγματος θα αυξηθεί απότομα και η δομή του συμπλέγματος θα αλλάξει γρήγορα όταν τα UAVs έχουν κίνηση σε υψηλό βαθμό, κάτι το οποίο έχει ως αποτέλεσμα υψηλή επιβάρυνση συντήρησης και αναποτελεσματικότητα όσον αφορά την ενέργεια. Η πολυπλοκότητα της δημιουργίας συμπλεγμάτων είναι μία άλλη σημαντική πρόκληση αυτής της κατηγορίας πρωτοκόλλων δρομολόγησης. Λαμβάνοντας υπόψιν, τους περιορισμούς των UAVs σε ένα σενάριο εφαρμογής, αποδοτικοί αλγόριθμοι σύνθεσης συμπλεγμάτων με λιγότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα πρέπει να σχεδιαστούν. Για την πρόβλεψη της κινητικότητας, τα περισσότερα σχήματα δρομολόγησης χρησιμοποιούν GPS για να λάβουν τις πληροφορίες τοποθεσίας των UAVs. Στα cluster-based πρωτόκολλα δρομολόγησης, διάφοροι παράγοντες όπως η κατάσταση της ενέργειας, η ταχύτητα, η τοποθεσία, το μέγεθος του χώρου προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων (buffer) θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας σχηματισμού συμπλέγματος και εκλογής κεφαλής. Επομένως, μια μέθοδος στάθμισης όλων των παραπάνω παραγόντων, μαζί με ένα αποδοτικό σχήμα πρόβλεψης, είναι επιθυμητά σε ένα σχήμα δρομολόγησης cluster-based, αφού η υψηλή κινητικότητα των UAVs και οι συχνές αλλαγές στην τοπολογία είναι αναπόφευκτα στα FANETs. Τα ιεραρχικά (cluster-based) πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι περισσότερο κατάλληλα για εφαρμογές, που περιλαμβάνουν UAVs σε αρχιτεκτονικές επικοινωνίας ενός επιπέδου και πολλών ομάδων καθώς και πολλών επιπέδων και πολλών ομάδων [26].

#### 4.3.2 Geographic

Στη γεωγραφική δρομολόγηση, η πληροφορία γεωγραφικής θέσης των κόμβων χρησιμοποιείται για λήψη αποφάσεων προώθησης πακέτων δεδομένων. Αποδεικνύεται με την υπόθεση ότι κάθε UAV γνωρίζει την τοποθεσία του χρησιμοποιώντας τη συσκευή GPS, που είναι ενσωματωμένη στη μονάδα του ή οποιοδήποτε άλλο μέσο συστήματος εντοπισμού θέσης. Η εκπομπή των πακέτων ανακάλυψης διαδρομής διαμέσω του δικτύου στα reactive πρωτόκολλα, η περιοδική ενημέρωση των πινάκων δρομολόγησης στα proactive πρωτόκολλα και η πληροφορία, που απαιτείται για αποφάσεις δρομολόγησης και στα δύο σχήματα δρομολόγησης κάνουν τα βασισμένα στην τοπολογία πρωτόκολλα δρομολόγησης αναποτελεσματικά όσον αφορά το εύρος ζώνης και την αποθήκευση. Αντίστροφα, τα γεωγραφικά σχήματα δρομολόγησης δεν χρειάζονται την πληροφορία ολόκληρου του δικτύου. Αντί για αυτήν, χρησιμοποιούν την τοπική πληροφορία για να προωθήσουν τα πακέτα δεδομένων. Επιπλέον, εκπομπές προς όλους πακέτων με πληροφορία ανακάλυψης διαδρομής και πίνακες δρομολόγησης δεν απαιτούνται. Συνεπώς, η ελάχιστη πληροφορία δρομολόγησης απαιτείται σε κάθε κόμβο. Έτσι, η επιβάρυνση δρομολόγησης, το εύρος ζώνης και η κατανάλωση ενέργειας μειώνονται αναλόγως. Λαμβάνοντας υπόψιν την υψηλή κινητικότητα των UAVs στο δίκτυο και τη δυναμική της αποστολής, μπορεί να είναι ωφέλιμο να εξεταστούν τα γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για FANETs. Για τις αποφάσεις δρομολόγησης, μόνο τα γειτονικά UAVs και η πληροφορία τοποθεσίας του UAV προορισμού απαιτούνται.

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης, που βασίζονται στη γεωγραφική πληροφορία χρησιμοποιούν, κυρίως, μια άπληστη/greedy τεχνική προώθησης για την προώθηση πακέτων και ένα μηχανισμό ανάκτησης στην περίπτωση της αποτυχίας της greedy τεχνικής προώθησης. Στην greedy προώθηση, ο κόμβος προωθεί πακέτα στο γειτονικό του κόμβο, που έχει την ελάχιστη απόσταση από τον προορισμό. Σε περιπτώσεις όπου δεν βρεθεί ένας γειτονικός κόμβος κοντά στον προορισμό, ξεκινάει ο μηχανισμός ανάκτησης [26].

Τα γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης ταξινομούνται περαιτέρω σε Delay Tolerant Networking (DTN) και Non-Delay Tolerant Networking (Non-DTN) και κάθε κατηγορία χρησιμοποιεί διαφορετικές τεχνικές για δρομολόγηση στα FANETs.

#### **4.3.2.1 Non-DTN routing protocols**

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης σε αυτήν την κατηγορία υλοποιούν τεχνικές greedy προώθησης, όπου κάθε κόμβος επιλέγει τον επόμενο κόμβο προώθησης, που είναι μεταξύ των γειτονικών κόμβων, ο κοντινότερος στον προορισμό και προωθεί τα πακέτα δεδομένων αναλόγως. Ο μηχανισμός greedy προώθησης αποτυγχάνει σε περιπτώσεις όπου ένας κόμβος που έχει ένα πακέτο δεδομένων για προώθηση, δεν έχει κόμβο κοντά στον προορισμό άλλον, εκτός από τον ίδιο του τον εαυτό.

Στο [89], προτάθηκε ένα σχήμα προσομοίωσης για την αξιολόγηση της απόδοσης των greedy γεωγραφικών αλγορίθμων δρομολόγησης προώθησης για FANET. Υποδεικνύει ότι για πυκνά συνδεδεμένες και όχι κρίσιμες εφαρμογές για FANET, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα greedy γεωγραφικό σχήμα προώθησης. Όμως, σε μια αραιή κατάσταση δικτύου, η αξιοπιστία μπορεί να είναι ένα μεγάλο πρόβλημα. Έτσι, για κρίσιμες εφαρμογές που απαιτούν αξιόπιστη παράδοση δεδομένων, άλλες μέθοδοι θα πρέπει να ενσωματωθούν στην greedy προώθηση. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που προτείνονται σε αυτήν την κατηγορία χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές για ανάκτηση από greedy αποτυχία.

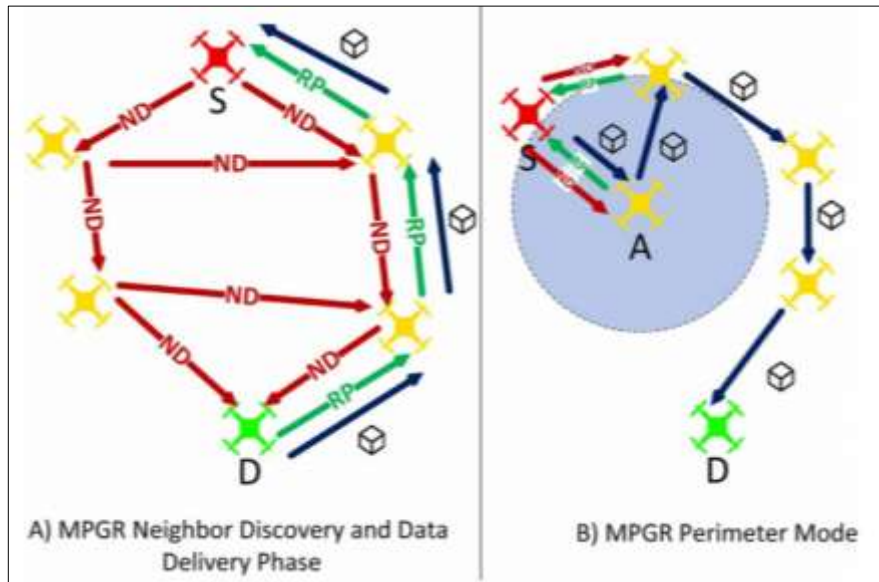
##### **4.3.2.1.1 Mobility Prediction-based Geographic Routing (MPGR)**

Το MPGR, είναι μια βελτίωση του πρωτοκόλλου Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR). Χρησιμοποιεί τον greedy προσδιορισμό προώθησης (GGF), σύμφωνα με την πληροφορία συντεταγμένων των γειτονικών κόμβων και του κόμβου προορισμού, χρησιμοποιώντας τις συνήθεις μετρικές π.χ. μικρότερη διαδρομή βασισμένη στα άλματα/βήματα ή πιο περίπλοκες μετρικές, όπως Reliable Next Hop (RNH). Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί λειτουργία προώθησης περιμέτρου, όταν η greedy προώθηση αποτυγχάνει.

Το MPGR ακολουθεί την ίδια προσέγγιση και τις ίδιες μεθοδολογίες με τα πρωτόκολλα GPSR και GPMOR. Η δομή των πακέτων του είναι διαφορετική,



αφού εκπέμπει προς όλους ένα πακέτο ανακάλυψης γείτονα (Neighbor Discovery-ND) για να αναγνωρίσει τους γείτονές του και διαλέγει τον κόμβο αναμετάδοσης βασισμένο στο πακέτο απόκρισης (Reply Packet -RP) (Εικόνα 4.5).



**Εικόνα 4.5:** Λειτουργίες πρωτοκόλλου MPGR [90]

Τα πλεονεκτήματα του MPGR προέρχονται από την ικανότητά του να αποκτά πληροφορίες σχετικές με την κατάσταση της σύνδεσης και να προβλέπει τη μελλοντική κίνηση κάθε κόμβου μέσα σε ένα FANET. Έτσι, απώλειες πακέτων συμβαίνουν αραιά και ο ρυθμός διανομής πακέτων στο δίκτυο αυξάνεται σημαντικά. Όμως, το MPGR δεν λαμβάνει υπόψιν το χρόνο λήξης της σύνδεσης και την προγραμματισμένη πορεία των επόμενων αλμάτων/βημάτων στη μελλοντική πρόβλεψη θέσης [90].

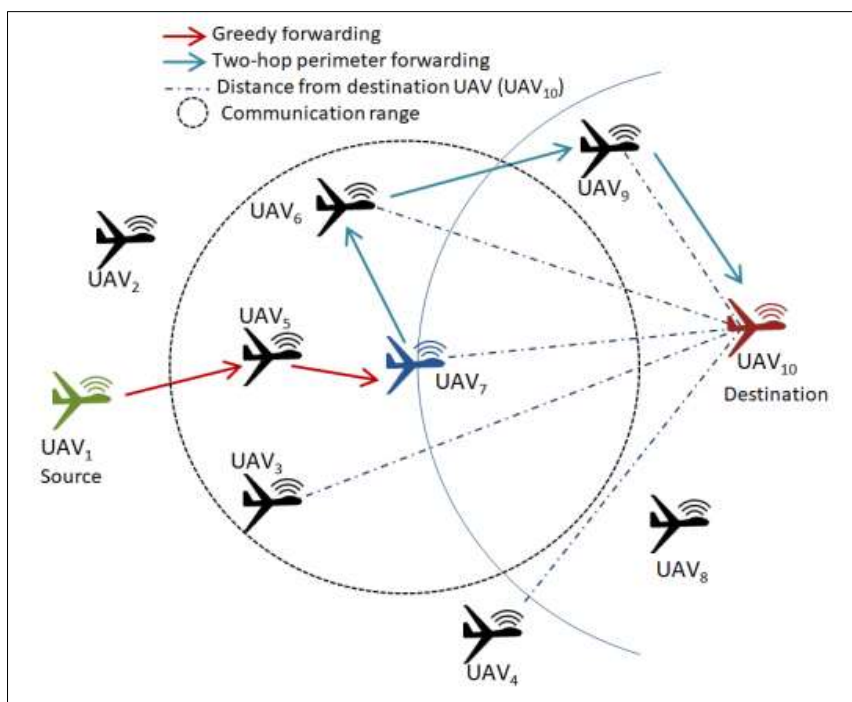
Στο MPGR, για να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση της υψηλής κινητικότητας των UAVs στην απόδοση της δρομολόγησης, ένα σχήμα πρόβλεψης κινητικότητας συγχωνεύεται με το μηχανισμό γεωγραφικής δρομολόγησης. Το MPGR χρησιμοποιεί μια τεχνική εκτίμησης κινητικότητας αξιοποιώντας μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Gauss, για να προβλέψει την κατανομή της θέσης των κόμβων σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, έχοντας σκοπό να ελαχιστοποιήσει την επίδραση της υψηλής κινητικότητας των κόμβων, με αποτέλεσμα τη χαμηλότερη επιβάρυνση, που προκαλείται από την μετάδοση των πακέτων ελέγχου. Η φάση της πρόβλεψης κίνησης μπορεί να

διαβεβαιώσει ότι ο κόμβος αναμετάδοσης θα παραμείνει εντός της εμβέλειας επικοινωνίας του αποστολέα, κατά τη διάρκεια της φάσης παράδοσης δεδομένων. Βασιζόμενος στην πρόβλεψη, ένας σύνδεσμος κριτηρίων δρομολόγησης, που λέγεται “Reliable Next Hop” (RNH), ο οποίος συνενώνει τα πλεονεκτήματα της μικρής απόστασης από τον προορισμό και της διατήρησης της γειτονικής σύνδεσης, χρησιμοποιείται για να διαλέξει τον επόμενο κόμβο προώθησης. Η διατήρηση της γειτονικής σύνδεσης αναπαριστά τη διάρκεια της αντοχής της σύνδεσης σε κάθε ζεύγος από UAVs. Το MPGR προτείνεται κυρίως για εφαρμογές στο πεδίο της μάχης και ως εκ τούτου αποφεύγει την περιοδική ανταλλαγή πληροφορίας γειτόνων για κοινή χρήση πληροφοριών θέσης. Αντίθετα, χρησιμοποιεί μια μέθοδο ανακάλυψης γειτόνων κατά απαίτηση. Εάν τα UAVs δεν έχουν πακέτα να στείλουν, ταξιδεύουν σιωπηλά για να μειώσουν την πιθανότητα σύλληψης από τον αντίπαλο. Όταν ένα UAV έχει ένα πακέτο δεδομένων για προώθηση, μεταδίδει ευρέως ένα πακέτο ελέγχου για να ανακαλύψει διαθέσιμους γείτονες και για να λάβει πληροφορίες σχετικά με τα πιθανά επόμενα UAVs για προώθηση. Επομένως, η πληροφορία που περιέχεται στα πακέτα απάντησης των γειτονικών UAVs χρησιμοποιούνται για να αποφασιστεί το κατάλληλο επόμενο UAV για προώθηση ή για επόμενο βήμα/άλμα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, όταν οι γειτονικοί κόμβοι στέλνουν πακέτα απάντησης στον αποστολέα, αυτά περιέχουν πληροφορίες για τη θέση των γειτόνων τους (two-hop neighbor) και την ταχύτητα. Με βάση την απάντηση από τους γειτονικούς κόμβους, ο αποστολέας δημιουργεί τον πίνακα των γειτόνων του και μετά υπολογίζει τη μετρική δρομολόγησης, RNH, για να επιλέξει το επόμενο βήμα από τους one-hop γείτονές του και να προωθήσει τα πακέτα δεδομένων αναλόγως.

Κατά τη διάρκεια της προώθησης δεδομένων, η greedy λειτουργία προώθησης μπορεί να αποτύχει λόγω ύπαρξης κενού στη δρομολόγηση. Το κενό δρομολόγησης συμβαίνει όταν η απόσταση μεταξύ κάθε γείτονα ενός UAV αποστολέα και του UAV προορισμού υπερβαίνει την απόσταση μεταξύ του εαυτού του (δηλαδή, του UAV αποστολέα) και του UAV προορισμού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πακέτο δεδομένων να κολλήσει στο UAV, που αντιμετωπίζει το κενό δρομολόγησης. Η Εικόνα 4.6 δείχνει το UAV7 να

αντιμετωπίζει κενό δρομολόγησης μετά τη λήψη πακέτου δεδομένων από το UAV5 σε λειτουργία greedy.



**Εικόνα 4.6:** Αποφυγή Routing Void χρησιμοποιώντας προώθηση Two-Hop Perimeter [26]

Για να εξαλειφθεί αυτό το πρόβλημα, προτείνεται η προώθηση two-hop perimeter. Έτσι, στο MPGR, όταν ένα UAV αντιμετωπίζει κενό δρομολόγησης, αλλάζει αυτόματα τη στρατηγική προώθησης από greedy σε two-hop perimeter. Η βασική ιδέα είναι ότι το UAV, που αντιμετωπίζει κενό δρομολόγησης επαληθεύει την πληροφορία των two-hop γειτόνων του (πληροφορία ταχύτητας και θέσης, που συλλέγεται από τα πακέτα απάντηση κατά τη διάρκεια ανακάλυψης γειτόνων) και υπολογίζει την Ευκλείδεια απόσταση κάθε two-hop γείτονα από τον κόμβο προορισμού. Μετά, επιλέγει το UAV με τη μικρότερη απόσταση από τον two-hop γείτονα προς τον προορισμό, ως το επόμενο UAV για προώθηση.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.6, το UAV<sub>7</sub> συγκρίνει την Ευκλείδεια απόσταση του two-hop γείτονά του από τον προορισμό. Ας υποθεθεί ότι το UAV<sub>9</sub> έχει τη μικρότερη απόσταση. Τότε, το UAV<sub>6</sub> επιλέγεται ως το επόμενο UAV για προώθηση και τα πακέτα δεδομένων αποστέλλονται αναλόγως. Στο MPGR,

λαμβάνοντας υπόψιν την κατάσταση της σύνδεσης μεταξύ των UAVs, η σταθερότητα του δικτύου ενισχύεται σημαντικά. Επιπλέον, για να προβλεφθεί η μελλοντική τοποθεσία για το επόμενο UAV προς προώθηση και για να αποφευχθούν απώλειες πακέτων, κάθε UAV στο δίκτυο εκτιμά τις θέσεις των γειτόνων του αξιοποιώντας τη συνάρτηση διανομής Gauss. Έτσι, η απόφαση δρομολόγησης λαμβάνει υπόψιν τη μικρότερη απόσταση από τον προορισμό και τη διατήρηση της σύνδεσης για να επιλέξει το επόμενο UAV για προώθηση. Ως αποτέλεσμα, το MPGR παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα σε όρους καθυστέρησης μετάδοσης με λιγότερη επιβάρυνση, συγκρινόμενο με τα πρωτόκολλα AODV και GPSR. Παρόλα αυτά, η πρόβλεψη της κινητικότητάς του και η υλοποίηση, εξαρτώνται ολοκληρωτικά από το σχήμα κινητικότητας Gauss-Markov. Έτσι, η απόδοσή του πρέπει να αξιολογηθεί με άλλα μοντέλα κινητικότητας. Επιπλέον, δεν λαμβάνει υπόψιν την κατάσταση όταν συμβαίνει κενό δρομολόγησης και η προτεινόμενη two-hop perimeter προώθηση δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Το MPGR μπορεί να βελτιωθεί λαμβάνοντας υπόψιν την προγραμματισμένη πορεία των UAVs στο δίκτυο, για την ακριβέστερη εκτίμηση της μελλοντικής θέσης του επόμενου προς προώθηση UAV [26], [90].

Στα Non-DTN γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για FANETs, η μικρότερη απόσταση προς τον προορισμό (greedy) συνδυασμένη με το σχήμα κινητικότητας (πρόβλεψη κινητικότητας) χρησιμοποιούνται ως μετρική δρομολόγησης για την επιλογή του καλύτερου επόμενου UAV για προώθηση. Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αυτής της κατηγορίας έχουν μικρή επιβάρυνση δρομολόγησης, είναι επεκτάσιμα και έχουν μικρότερη κατανάλωση εύρους ζώνης και μνήμης, αφού η απόφαση για το επόμενο UAV για προώθηση βασίζεται ως επί το πλείστον στην πληροφορία θέσης των UAVs στο δίκτυο [26].

Οι πιο σημαντικές προκλήσεις σε αυτήν την κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης είναι η λήψη πληροφορίας της ακριβούς τοποθεσίας των UAVs και η αποφυγή του κενού δρομολόγησης, ειδικά στα FANETs που είναι αραιά και με υψηλή δυναμική. Όλα τα πρωτόκολλα χρησιμοποιούν τη συσκευή GPS ως την πηγή λήψης της πληροφορίας τοποθεσίας για τα UAVs για την εύρεση του μικρότερου μονοπατιού δρομολόγησης. Βέβαια, αυτό

μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες απαιτήσεις σε υλικό. Επίσης, η απόδοση αυτών των πρωτοκόλλων δρομολόγησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια της πληροφορίας τοποθεσίας από το GPS. Εάν είναι ανακριβής ή μη διαθέσιμη, το επιθυμητό μονοπάτι δρομολόγησης δεν θα μπορεί να βρεθεί.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν το σφάλμα τοποθεσίας, η πρόβλεψη της τοποθεσίας των γειτονικών UAVs χρησιμοποιώντας τρισδιάστατη εκτίμηση, ασφαλής ανταλλαγή της πληροφορίας τοποθεσίας μεταξύ των UAVs και του GCS, η κατάσταση της σύνδεσης και άλλοι αλγόριθμοι εντοπισμού στη μετρική δρομολόγησης θα ήταν ευεργετικοί για αξιόπιστη, γρήγορη και ασφαλή μετάδοση πακέτων δεδομένων στα FANETs.

Στα αραιά FANETs με υψηλή δυναμική, η συνδεσιμότητα του δικτύου δεν μπορεί να είναι σίγουρη και γίνεται δύσκολη η εύρεση του κατάλληλου επόμενου προς προώθηση UAV, ειδικά εάν τα UAVs κινούνται τυχαία χωρίς προηγούμενη σχεδίαση πτήσης ή λόγω συχνών ενημερώσεων της αποστολής. Τα Non-DTN πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν λαμβάνουν υπόψιν την ενεργειακή απόδοση και την εξισορρόπηση φορτίου, τα οποία είναι σημαντικές μετρικές για να παρατείνουν τη διάρκεια ζωής των δικτύων, που αποτελούνται από μικρά UAVs περιορισμένης ενέργειας και εγγυώνται τις απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας συγκεκριμένων εφαρμογών FANETs λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά κυκλοφορίας των δεδομένων. Τα Non-DTN γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για όλους τους τύπους αρχιτεκτονικών επικοινωνίας και είναι κατάλληλα για σενάρια εφαρμογών για μεγάλης κλίμακας και πυκνά FANETs [26].

#### **4.3.2.2 DTN routing protocols**

Τα πρωτόκολλα δρομολόγησης αυτής της κατηγορίας είναι σχεδιασμένα για διακοπτόμενα συνδεδεμένα δίκτυα όπως τα FANETs, λόγω της υψηλής κινητικότητας των UAVs στο δίκτυο και την αραιή πυκνότητα δικτύου. Για την αντιμετώπιση της διαλείπουσας συνδεσιμότητας και των προβλημάτων κατάτμησης του δικτύου, τα σχήματα της DTN δρομολόγησης εκμεταλλεύονται την κινητικότητα των κόμβων και την τεχνική αποθήκευσης των μηνυμάτων (buffering), που λέγεται τεχνική store-carry-forward. Αυτή η

κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης, βασικά, χρησιμοποιεί την τεχνική store-carry-forward οπότεδήποτε οι κόμβοι δεν μπορούν να φθάσουν τους άλλους κόμβους για να προωθήσουν πακέτα δεδομένων προς τον προβλεπόμενο κόμβο προορισμό.

Αυτή η τεχνική μπορεί να βελτιώσει τη διανομή των πακέτων επιτρέποντας σε έναν κόμβο να κρατήσει ένα μήνυμα για ένα προκαθορισμένο χρόνο, μέχρις ότου βρει έναν πιθανό κόμβο προώθησης σύμφωνα με τις καθορισμένες μετρικές στο εύρος επικοινωνίας του ή στον κόμβο προορισμού. Η καθυστέρηση είναι η κύρια πρόκληση αυτής της τεχνικής, ειδικά για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Στη συνέχεια περιγράφεται ένα πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας.

#### **4.3.2.2.1 Location Aware Routing for Opportunistic Delay Tolerant Networks (LAROD)**

Η λειτουργία του πρωτοκόλλου LAROD εξαρτάται από τις συνθήκες του δικτύου και χρησιμοποιεί είτε άπληστη/greedy προώθηση είτε τεχνική store-carry-and-forward. Σε περιπτώσεις όπου το δίκτυο είναι αραιά συνδεδεμένο το UAV που μεταφέρει το πακέτο (πηγή ή ενδιάμεσος κόμβος), εκμεταλλεύεται την τεχνική store-carry-and-forward μέχρις ότου φθάσει είτε σε έναν κόμβο αναμετάδοσης, ο οποίος έχει μια διαδρομή προς τον προορισμό, είτε στον ίδιο τον προορισμό.

Στις περιπτώσεις, όπου το δίκτυο έχει μια υψηλότερη πυκνότητα, υλοποιείται η άπληστη τεχνική προώθησης, που βασίζεται σε ένα χρονόμετρο, που κάθε κόμβος έχει στη διάθεσή του. Κάθε γείτονας λαμβάνει το πακέτο, αλλά μόνο ο κόμβος με το χρονόμετρο που έληξε πρώτα, θεωρείται ως ο καλύτερος κόμβος αναμετάδοσης και μόνο αυτός ο κόμβος μπορεί να αναμεταδώσει το πακέτο, που διασχίζει το δίκτυο μέχρι να φθάσει στον προορισμό ακολουθώντας την ίδια στρατηγική.

Κάθε κόμβος, που αναμεταδίδει ένα πακέτο είναι υπεύθυνος να ακούσει την εκ νέου μετάδοση του επόμενου άλματος (hop) προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το πακέτο ελήφθη με επιτυχία. Εάν δεν το κάνει, πρέπει να αναμεταδώσει το πακέτο στους γείτονές του, οι οποίοι πρέπει να εκκινήσουν τα χρονόμετρά τους.

Τα πλεονεκτήματα του LAROD απορρέουν από την beacon-less στρατηγική του, που μειώνει τη συνολική επιβάρυνση του δικτύου και από την store-carry-and-forward τεχνική, που μπορεί να βελτιώσει το ρυθμό παράδοσης πακέτων του δικτύου. Βέβαια, η τεχνική store-carry-and-forward εισάγει υψηλή καθυστέρηση στην παράδοση των πακέτων. Ως αποτέλεσμα, το LAROD δεν αποτελεί επιλογή για εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση ή για εφαρμογές που πραγματοποιούνται σε αστικές περιοχές, λόγω του ότι η ακρόαση δεν είναι αρκετά ακριβής σε περιοχές με πολλά εμπόδια. Το LAROD θα μπορούσε να είναι ένα καλό υποψήφιο πρωτόκολλο για εφαρμογές χαρτογράφησης, δημιουργίας video και αναγνώρισης [90].

Το LAROD είναι ένα σχήμα γεωγραφικής δρομολόγησης για FANETs, που ολοκληρώνει την τεχνική store-carry-forward με το beaconless σχήμα δρομολόγησης. Η κύρια ιδέα του LAROD είναι ότι χρησιμοποιεί greedy προώθηση, εάν υπάρχει δυνατότητα. Σε ένα αραιά συνδεδεμένο δίκτυο και όταν είναι αδύνατο να εκτελεστεί η greedy προώθηση, το τρέχον UAV χρησιμοποιεί το σχήμα store-carry-forward μεταφέροντας το μήνυμα μέχρι να βρει άλλους πιθανούς κόμβους προώθησης για να συνεχίσει την greedy προώθηση. Η διαδικασία προώθησης του LAROD συνοψίζεται στη συνέχεια. Όταν ένας κόμβος πηγή έχει δεδομένα για προώθηση, απλά τα εκπέμπει ευρέως. Για να προωθήσει τα δεδομένα μακρύτερα στον κόμβο στόχο sink, τα UAVs που αποκτούν το πακέτο και παρέχουν μια κίνηση προώθησης προς την κατεύθυνση του προορισμού τιτλοφορούνται ως αποστολείς/προωθητές (forwarders). Ο καλύτερος κόμβος προώθησης μεταξύ αυτών των υποψήφιων προωθητών αποφασίζεται χρησιμοποιώντας μια “linear timer συνάρτηση/λειτουργία” με τη μέγιστη καθυστέρηση στην πηγή και την ελάχιστη καθυστέρηση μετά από κάποιο προκαθορισμένο μέρος μακριά από την πηγή. Αυτό βοηθάει στο να δοθεί προτεραιότητα σε κόμβους, που βρίσκονται σε μακρινή απόσταση, ελαττώνοντας τον αριθμό των προωθήσεων που χρειάζονται για το μήνυμα για να ληφθεί από τον κόμβο προορισμού. Όλοι οι υποψήφιοι προωθητές δημιουργούν ένα χρονόμετρο για επανεκπομπή του πακέτου σύμφωνα με τη θέση τους από τον αποστολέα. Για να αποφευχθεί ταυτόχρονη εκπομπή του ίδιου πακέτου δεδομένων, τα UAVs συμπεριλαμβάνουν έναν τυχαίο χρόνο αναμονής στη λειτουργία

χρονομέτρου. Αναλόγως, ένα UAV επιλέγεται ως το επόμενο για προώθηση και επανεκπέμπει το πακέτο εάν το χρονόμετρό του εκπνεύσει πρώτο συγκρινόμενο με τα άλλα υποψήφια UAVs για επόμενη προώθηση. Όταν τα άλλα UAVs ακούσουν τυχαία το πακέτο που έχει μεταδοθεί, θα απορρίψουν το διπλό πακέτο δεδομένων. Ωστόσο, εάν αυτή η μετάδοση δεν ακουστεί από τον δημιουργό του πακέτου δεδομένων, ο κόμβος περιοδικά, μεταδίδει αυτό το πακέτο δεδομένων μέχρι να βρει ένα UAV για προώθηση. Με την παραλαβή του πακέτου από τον κόμβο προορισμό, ο κόμβος προορισμός μεταδίδει ένα πακέτο αναγνώρισης προς τον κόμβο αποστολέα/πηγή για να τερματίσει η μετάδοση. Ένα time to live (TTL) ενσωματώνεται σε όλα τα πακέτα για την αποφυγή αόριστης προώθησης του πακέτου μεταξύ των UAVs. Αυτό σημαίνει ότι όλα τα UAVs, που μεταφέρουν το πακέτο το απορρίπτουν όταν λήξει το TTL. Ο ρυθμός παράδοσης του πακέτου στο πρωτόκολλο LAROD είναι εξίσου αποτελεσματικό με αυτό του πρωτοκόλλου δρομολόγησης BeaconLess Routing (BLR), που έχει προταθεί για MANET, με πολύ χαμηλότερη γενική επιβάρυνση. Αυτό συμβαίνει λόγω της τεχνικής store-carry-forward και του beaconless σχήματος, που υλοποιείται στο LAROD. Εκτός από τη μείωση της κατανάλωσης εύρους ζώνης, το beaconless σχήμα είναι, επίσης, ευεργετικό για μικρού μεγέθους UAVs με περιορισμούς στην ενέργεια. Ωστόσο, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές ευαίσθητες στην καθυστέρηση λόγω της τεχνικής store-carry-forward. Επιπλέον, το σύστημα ακρόασης μπορεί να μην είναι εφικτό σε περιοχές με υψηλά εμπόδια όπως αστικές περιοχές, που μπορεί να θεωρηθούν ως παραμορφωτικός παράγοντας. Σε τέτοιες περιπτώσεις, το UAV δημιουργός μπορεί να μην γνωρίζει εάν το επόμενο για προώθηση UAV έχει λάβει και αναμεταδώσει το πακέτο δεδομένων, ακόμη και αν ο αποστολέας το έχει ήδη αναμεταδώσει. Κατά συνέπεια, το UAV δημιουργός θα αναγκαστεί να αναμεταδώσει το πακέτο πολλές φορές, με αποτέλεσμα υψηλή επιβάρυνση. Επιπλέον, το σχήμα ακρόασης είναι ευπαθές σε όρους ασφάλειας. Το LAROD μπορεί να βελτιωθεί χρησιμοποιώντας ένα σχήμα πρόβλεψης για να βρίσκει το επόμενο βέλτιστο για προώθηση UAV και έτσι να μειώνεται η επιβάρυνση που προκύπτει από την περιοδική εκπομπή πακέτων, όταν δεν εισακούεται καμία εκπομπή. Το LAROD μπορεί να



χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές ανεκτικές στην καθυστέρηση όπως δημιουργία video, χαρτογράφηση, αναγνώριση περιοχών κ.ά. [26], [90].

Τα FANETs θα χρησιμοποιούνται κυρίως σε δύσκολες καταστάσεις και η κατάτμηση του δικτύου μπορεί να συμβαίνει συχνά, πιθανόν για μεγάλη διάρκεια. Σε αυτήν την περίπτωση συμβατικοί μηχανισμοί ίσως δεν εγγυώνται συνδεσιμότητα μεταξύ των UAVs στο δίκτυο. Για αυτό το λόγο, τα FANETs έχουν προταθεί να είναι ανεκτικά στην καθυστέρηση και τη διακοπή ενσωματώνοντας τις δυνατότητες store-carry-forward.

Τα DTN γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης για FANETs, χρησιμοποιούν την τεχνική store-carry-forward οποτεδήποτε οι κόμβοι είναι ανίκανοι να φθάσουν τους άλλους κόμβους για να προωθήσουν πακέτα δεδομένων προς τον κόμβο sink/προορισμό. Η μικρότερη απόσταση προς τον προορισμό και η μικρότερη απόσταση συνδυασμένη με σχέδιο κινητικότητας και queue backlog χρησιμοποιούνται ως μετρική δρομολόγησης για την επιλογή του καλύτερου επόμενου για προώθηση UAV.

Κανένα από αυτά τα πρωτόκολλα δρομολόγησης δεν λαμβάνουν υπόψιν την ενεργειακή απόδοση και την εξισορρόπηση φορτίου. Η επιλογή των κατάλληλων UAVs για προώθηση, που βασίζεται στα ποικίλα φορτία δεδομένων κίνησης μπορεί να είναι απαραίτητη για την αύξηση του ρυθμού παράδοσης δεδομένων και ελάττωση της καθυστέρησης. Η εξισορρόπηση φορτίου και η ενεργειακή απόδοση, ειδικά για σενάρια εφαρμογών FANETs με μεγάλη κίνηση δεδομένων, πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν κατά τη διάρκεια σχεδιασμού πρωτοκόλλου δρομολόγησης. Επιπλέον, βελτιώνοντας και λαμβάνοντας υπόψιν την πληροφορία τροχιάς των UAVs στο δίκτυο, μπορεί να είναι σημαντικό στη διαδικασία πρόβλεψης κινητικότητας για να ληφθούν πιο ακριβείς πληροφορίες τοποθεσίας για τα επόμενα UAVs για προώθηση. Τα DTN πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι κατάλληλα για σενάρια εφαρμογών με εγγυημένη απαίτηση παράδοσης πακέτων και ανοχή στην καθυστέρηση σε χαλαρά συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές εφαρμογών [26].

#### **4.3.3 Hybrid (Topology & geographic)**

Αυτή η προσέγγιση συνδυάζει τα σχήματα δρομολόγησης, που βασίζονται στην τοπολογία, ειδικότερα τα επίπεδα reactive πρωτόκολλα δρομολόγησης

και τα γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης. Τα γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης είναι περισσότερο επεκτάσιμα και είναι κατάλληλα για σενάρια εφαρμογών FANETs με υψηλή δυναμική, μεγάλα και πυκνά. Όμως, στα greedy γεωγραφικά πρωτόκολλα δρομολόγησης, η απόδοση του δικτύου ελαττώνεται καθώς το δίκτυο γίνεται αραιότερο λόγω της δυσκολίας στην εύρεση του κατάλληλου επόμενου για προώθηση UAV, ειδικά εάν τα UAVs κινούνται τυχαία, χωρίς προηγούμενο σχεδιασμό διαδρομής. Επιπρόσθετα, η πυκνότητα του δικτύου δεν εξαρτάται μόνο από τον αριθμό των UAVs που σχηματίζουν FANETs, αλλά επηρεάζεται, επίσης, από τα ποικίλα σενάρια εφαρμογών. Για παράδειγμα, σε αποστολές αναζήτησης, τα UAVs θα πρέπει να κατανεμηθούν σε μια περιοχή, έτσι ώστε να μπορούν να καλύψουν ολόκληρη την περιοχή αναζήτησης. Οπότε, η κατανομή των UAVs μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα ένα αραιό δίκτυο εάν η περιοχή αναζήτησης είναι μεγάλη. Από την άλλη μεριά, όταν τα UAVs χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση ενός αντικειμένου, ένας αριθμός από UAVs ακολουθούν τον στόχο. Συνεπώς, δεν χρειάζεται να εξαπλωθούν και μπορούν να παραμείνουν στο εύρος επικοινωνίας του άλλου. Έτσι, είναι σημαντικό κατά το σχεδιασμό σχημάτων δρομολόγησης για FANETs, να ληφθεί υπόψιν η επίδραση των παραλλαγών της πυκνότητας στη συνδεσιμότητα του δικτύου [26].

Επιπλέον, στα υπάρχοντα γεωγραφικά σχήματα δρομολόγησης, ακόμη και αν η πληροφορία θέσης του γειτονικού UAV μπορεί να συλλεχθεί από περιοδικά μηνύματα “hello” για αναμετάδοση πακέτων δεδομένων, το δίκτυο θα πρέπει να υλοποιήσει μια ξεχωριστή υπηρεσία τοποθεσίας για να παρέχει στον κόμβο προορισμού πληροφορία τοποθεσίας, κάτι το οποίο μπορεί να απαιτεί μια άλλη αρχιτεκτονική επικοινωνίας. Έτσι, συνδυάζοντας τη γεωγραφική δρομολόγηση με άλλα σχήματα δρομολόγησης βασισμένα στην τοπολογία, ίσως είναι ωφέλιμο για την επίλυση της απαίτησης της ξεχωριστής υπηρεσίας τοποθεσίας στη γεωγραφική δρομολόγηση και της καθυστέρησης που εισάγεται για την εύρεση μιας καινούριας διαδρομής κατά τη διάρκεια μιας αποτυχίας διαδρομής στα βασισμένα στην τοπολογία πρωτόκολλα δρομολόγησης [26]. Στη συνέχεια περιγράφεται ένα πρωτόκολλο αυτής της κατηγορίας.

#### 4.3.3.1 Reactive-Greedy-Reactive (RGR)

Το πρωτόκολλο RGR αποτελεί μια ολοκλήρωση της κατά απαίτησης δρομολόγησης και του σχήματος γεωγραφικής δρομολόγησης για FANETs. Το πρωτόκολλο AODV θεωρείται ως ο πυρήνας του reactive μηχανισμού του, τον οποίο χρησιμοποιεί κατά τη φάση δημιουργίας διαδρομής. Κατά τη φάση διανομής δεδομένων, το RGR ξεκινά να προωθεί πακέτα με ένα reactive τρόπο. Σε περίπτωση που συμβεί μια αποτυχία διαδρομής προς τον προορισμό, κατά τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων χρησιμοποιώντας την reactive μέθοδο, το RGR χρησιμοποιεί την τεχνική της γεωγραφικής άπληστης προώθησης (Greedy Geographic Forwarding-GGF) [89] για να διανείμει τα υπολειπόμενα πακέτα.

Στο πρωτόκολλο RGR, υποτίθεται ότι κάθε UAV λαμβάνει τα δεδομένα συντεταγμένων του μέσω συσκευών GPS, που είναι ενσωματωμένες στη μονάδα του. Οι τύποι μηνυμάτων που ορίζονται από το πρωτόκολλο RGR είναι Route Requests-RREQs, Route Replies-RREPs, Route Errors-RERRs και hello μηνύματα. Το RGR έχει χτιστεί στην κορυφή του AODV, ως εκ τούτου η συμπεριφορά και η διάδοση αυτού του είδους των μηνυμάτων είναι παρόμοια με το AODV, εκτός από το γεγονός ότι στο RGR τα μηνύματα μεταφέρουν και πληροφορία τοποθεσίας, επίσης. Δηλαδή, τα μηνύματα “hello” του AODV επαναπροσδιορίζονται για να συμπεριλάβουν την πληροφορία τοποθεσίας των κόμβων. Έτσι, κάθε UAV διατηρεί την πληροφορία τοποθεσίας των γειτονικών του UAVs στον πίνακα με τις πληροφορίες των γειτόνων. Επιπλέον, τα πακέτα ελέγχου RREP και RREQ του AODV, επίσης, επαναπροσδιορίζονται για να συμπεριλάβουν πληροφορία για τη θέση προορισμού και πηγής, αντίστοιχα. Αυτό διευκολύνει τη διαμοίραση της πληροφορίας τοποθεσίας των κόμβων, χωρίς υλοποίηση μηχανισμού διαμοίρασης πληροφορίας τοποθεσίας.

Η Εικόνα 4.7 δείχνει τη διαδικασία δρομολόγησης του πρωτοκόλλου RGR. Ένας κόμβος, που έχει ένα πακέτο δεδομένων για προώθηση ξεκινά τη διαδικασία εξεύρεσης διαδρομής (ίδια με το πρωτόκολλο AODV) εκπέμποντας προς όλους στο δίκτυο RREQs (Εικόνα 4.7(a)). Όταν το UAV προορισμός ή κάποιο άλλο ενδιαμέσο UAV, που έχει ένα μονοπάτι δρομολόγησης προς τον sink κόμβο, λάβει το RREQ, τότε ένα από αυτά απαντά στέλνοντας ένα RREP

πίσω στον αποστολέα. Με την παραλαβή του RREP, το UAV αποστολέας ξεκινά να στέλνει το πακέτο δεδομένων. Κατά τη διάρκεια της μετάδοσης των δεδομένων, εάν η reactive διαδρομή προς τον προορισμό είναι κατεστραμμένη, το RGR αλλάζει στην τεχνική της γεωγραφικής greedy προώθησης (GGF), εκμεταλλευόμενο τις γεωγραφικές πληροφορίες του προορισμού, διαβάζοντας τον πίνακα δρομολόγησης και τον πίνακα των γειτονικών κόμβων και προωθεί το πακέτο δεδομένων στο γειτονικό UAV, που είναι πιο κοντά προς τον προορισμό. Ταυτόχρονα, ένα μήνυμα λανθασμένης διαδρομής (route error-RERR) στέλνεται προς την αντίθετη κατεύθυνση, προς το προηγούμενο UAV μέχρι το UAV αποστολέας λάβει το μήνυμα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.7(b), όταν το UAV2 βιώσει μια αποτυχία διαδρομής, υπολογίζει την απόστασή του από τον παραλήπτη-στόχο UAV, που είναι το UAV7, με την απόσταση προς τον ίδιο στόχο-παραλήπτη όλων των τρεχόντων γειτόνων του, UAV3 και UAV4.

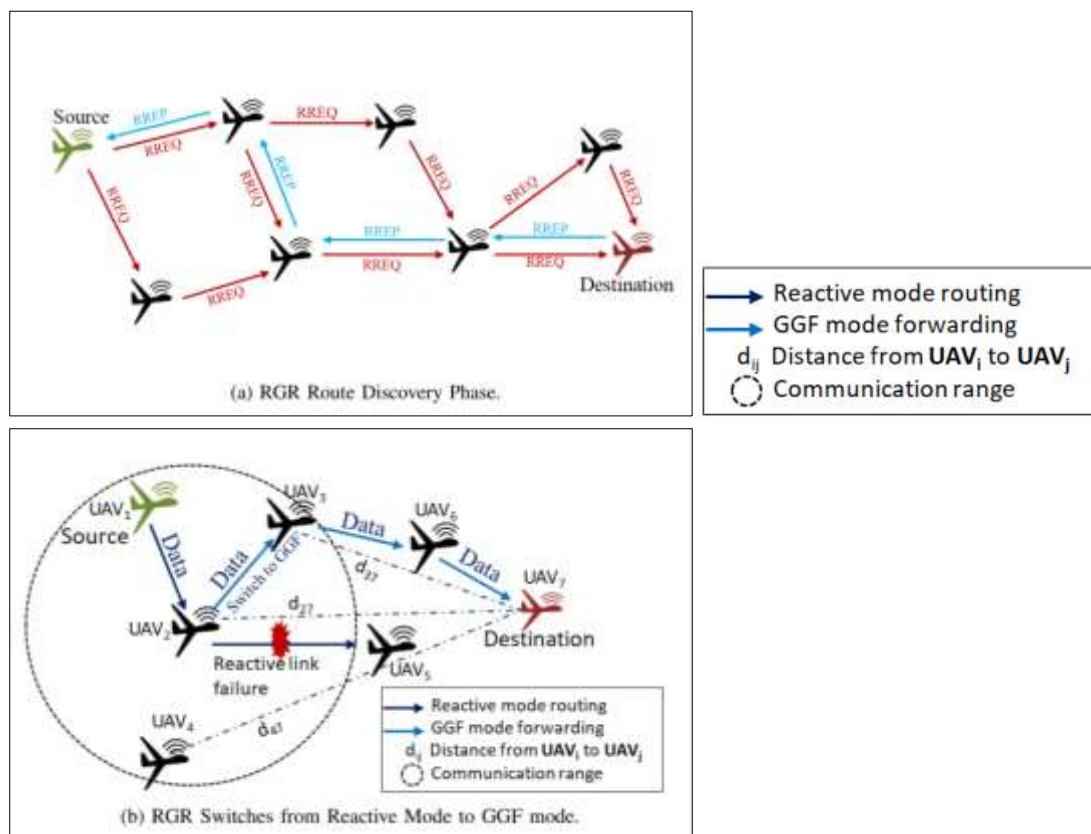
Ας υποθεθεί ότι η απόσταση του UAV3 από το UAV7 ( $d_{37}$ ) είναι μικρότερη από τις υπόλοιπες ( $d_{27}$  και  $d_{47}$ ). Τότε, το UAV2 στέλνει το πακέτο δεδομένων στο UAV3. Όταν το πιο κοντινό γειτονικό UAV προς τον προορισμό, λάβει το πακέτο, πρώτα επαληθεύει εάν υπάρχει ένα reactive μονοπάτι προς τον προορισμό στον πίνακα δρομολόγησης του, που έχει δημιουργηθεί από το reactive μέρος του αλγορίθμου δρομολόγησης. Εάν υπάρχει, το πακέτο δεδομένων στέλνεται στον επόμενο γειτονικό κόμβο, χρησιμοποιώντας αυτό το μονοπάτι. Διαφορετικά, αλλάζει, επίσης, σε GGF και αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρις ότου το UAV προορισμός παραλάβει το πακέτο [26], [90].

Όμως, το σχήμα GGF μπορεί να αποτύχει όταν ο κόμβος δεν μπορεί να αποκτήσει έναν γειτονικό κόμβο (για παράδειγμα είναι εκτός εμβέλειας), ο οποίος είναι ο πιο κοντινός στον προορισμό. Εάν από τον πίνακα με τις πληροφορίες των γειτονικών κόμβων δεν μπορεί να βρεθεί κάποιος κόμβος, που είναι πιο κοντά στον προορισμό, τότε το πακέτο δεδομένων απορρίπτεται.

Όταν το UAV αποστολέας, παραλάβει το πακέτο RERR, που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας reactive αποτυχίας, εκπέμπει προς όλους ένα RREQ πακέτο για να προσδιορίσει μια νέα διαδρομή, ενώ το σχήμα GGF προσπαθεί να μεταφέρει τα δεδομένα στον καθορισμένο προορισμό.

Πειράματα προσομοίωσης εκτελέστηκαν για να αξιολογήσουν την απόδοση του πρωτοκόλλου RGR, λαμβάνοντας υπόψιν τις αποστολές αναζήτησης και παρακολούθησης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο ρυθμός παράδοσης των πακέτων του RGR, ήταν καλύτερος από το AODV με λιγότερη καθυστέρηση από άκρο σε άκρο. Αναφορικά με τις αδυναμίες του RGR, αξίζει να αναφέρουμε ότι οι γεωγραφικές τοποθεσίες δεν ενημερώνονται τακτικά, με αποτέλεσμα τα πακέτα δεδομένων να χάνονται εάν προωθούνται σε μια μη ενημερωμένη γεωγραφική θέση. Επίσης, το RGR έχει μεγάλη επιβάρυνση δρομολόγησης, λόγω των πολλαπλών μεταδόσεων προς όλους των πακέτων ελέγχου, που σχετίζονται με πολλαπλές αιτήσεις διαδρομών, κατά τη διαδικασία εξεύρεσης διαδρομών.

Το RGR μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές, όπως επιχειρήσεις παρακολούθησης και αναζήτησης, πραγματοποιώντας ανταλλαγές σημαντικών μηνυμάτων μεταξύ UAVs σχετικά με στόχους ή θύματα [26], [90].



Εικόνα 4.7: Reactive-Greedy-Reactive (RGR) διαδικασία δρομολόγησης [26]

Γενικά, τα υβριδικά πρωτόκολλα δρομολόγησης (γεωγραφικά και βασισμένα στην τοπολογία) χρησιμοποιούν το γεωγραφικό μηχανισμό δρομολόγησης ως μια εναλλακτική καλύτερης προσπάθειας όταν συμβαίνει μια αποτυχία σύνδεσης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης δεδομένων, χρησιμοποιώντας την πληροφορία τοποθεσίας των UAVs, που λαμβάνονται από τα πακέτα ελέγχου διαδρομής του reactive σχήματος δρομολόγησης χωρίς να απαιτείται μια ανεξάρτητη υπηρεσία πληροφοριών τοποθεσίας. Συνεπώς, παρέχουν καλύτερο ρυθμό διανομής πακέτων σε ένα σενάριο με σχετικά υψηλή κινητικότητα. Η επιβάρυνση ελέγχου λόγω της εκπομπής των πακέτων RREQ και RERR στο αυθεντικό πρωτόκολλο RGR, ελαττώνεται στα άλλα πρωτόκολλα δρομολόγησης χρησιμοποιώντας τεχνικές *scoped flooding* (RGR-SFDRR) και πρόβλεψη κινητικότητας (Optimized-RGR). Όμως, η ενεργειακή απόδοση, η εξισορρόπηση φορτίου και τα χαρακτηριστικά κίνησης δεν λαμβάνονται υπόψιν σε αυτήν την κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης, επίσης. Επιπλέον, ο μηχανισμός ανάκτησης, που έχει σχεδιαστεί για ανάκαμψη από τη γεωγραφική *greedy* αποτυχία, προκαλεί περαιτέρω ETED (Estimated Time Enroute to Destination) για λήψη πακέτων στον προορισμό, κάτι το οποίο μπορεί να κάνει τα πρωτόκολλα αυτής της κατηγορίας ακατάλληλα για εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Επομένως, αυτή η κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης μπορεί να είναι κατάλληλη για εφαρμογές ανεκτικές στην καθυστέρηση όπως μακροχρόνια στρατιωτική παρακολούθηση, περιβαλλοντική παρακολούθηση κλπ σε χαλαρά συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές εφαρμογών [26].

#### **4.3.4 Bio-inspired**

Πρόσφατα, η *bio-inspired* υπολογιστική εμπνευσμένη από βιολογικά συστήματα, έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον λόγω των αποτελεσμάτων υψηλής απόδοσης και των δυνατοτήτων της να επιλύει διάφορα σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης. Μία από τις περιοχές, που έχει εφαρμοστεί εκτεταμένα είναι η δικτύωση των υπολογιστών για την επίλυση θεμάτων που αφορούν δρομολόγηση, ασφάλεια, έλεγχο συμφόρησης. Εξελικτικοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φυσική εξέλιξη και αλγόριθμοι, που βασίζονται σε σμήνη, κινούμενοι από τη συλλογική συμπεριφορά στην

κοινωνία των ζώων, είναι οι δύο περισσότερο κυρίαρχες τάξεις των εμπνευσμένων από τη βιολογία αλγόριθμων. Ο αλγόριθμος Artificial bee colony algorithm (ABC), ο particle swarm optimization (PSO), και ο ant colony optimization (ACO) είναι παραδείγματα αλγορίθμων, που βασίζονται σε σμήνος και εμπνέονται από την συμπεριφορά των μελισσών, των κοπαδιών των πουλιών, που αναζητούν τροφή και τη διατροφική συμπεριφορά των μυρμηγκιών, αντίστοιχα.

#### **4.3.4.1 Boids of Reynolds-AODV (BR-AODV)**

Ο BR-AODV είναι ένα bio-inspired reactive σχήμα δρομολόγησης για FANETs, που βασίζεται στο κλασσικό πρωτόκολλο AODV. Ο κύριος σκοπός του BR-AODV είναι η διατήρηση της συνδεσιμότητας της γραμμής σε μια διαδρομή δρομολόγησης κατά τη διάρκεια της μετάδοσης πακέτων δεδομένων. Η διατήρηση της συνδεσιμότητας είναι απαραίτητη για την αντιμετώπιση ανεπιθύμητων διακοπών διαδρομής στο σχήμα δρομολόγησης AODV σε σενάρια με υψηλή κινητικότητα, ειδικά όταν υπάρχει ανάγκη για ανταλλαγή σημαντικών ποσοτήτων κίνησης στο δίκτυο. Τα αποτελέσματα της υψηλής κινητικότητας των UAVs εντείνονται κατά την εξέταση σεναρίου εφαρμογής, όπως η αναζήτηση. Επιπρόσθετα, τα UAVs μπορεί να κινούνται σύμφωνα με μία ανεξάρτητη προγραμματισμένη από πριν διαδρομή πτήσης και το δίκτυο μπορεί συχνά να υπόκειται κατάτμηση. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, χρησιμοποιείται το AODV για αντιδραστική (reactive) διερεύνηση διαδρομής και η μέθοδος Boids του Reynolds χρησιμοποιείται για τη διατήρηση της συνδεσιμότητας του ενεργού μονοπατιού κατά τη διάρκεια της μετάδοσης πακέτων δεδομένων (το Boids είναι ένα πρόγραμμα, που αναπτύχθηκε από τον Craig Reynolds το 1986, που εξομοιώνει τη συμπεριφορά των πουλιών σε κοπάδια. Το άρθρο του σε αυτό το θέμα δημοσιεύτηκε το 1987 στις εργασίες του συνεδρίου ACM SIGGRAPH. Το όνομα "boid" αντιστοιχεί σε μια σύντμηση του "bird-oid object", το οποίο αναφέρεται σε ένα αντικείμενο που μοιάζει με πουλί (bird-like object). Συμπωματικά, "boid" είναι μια προφορά της μητροπολιτικής διαλέκτου της Νέας Υόρκης για τη λέξη "bird"). Ειδικότερα, ο μηχανισμός διατήρησης της διαδρομής του πρωτοκόλλου AODV αντικαθίσταται από έναν μηχανισμό ελέγχου κινητικότητας, που

εκμεταλλεύεται την τεχνική Boids of Reynolds για να υποστηρίξει τη διατήρηση των ενεργών μονοπατιών ενώ μεταδίδονται τα δεδομένα. Το πρωτόκολλο βασίζεται στην υπόθεση ότι κάθε UAV έχει επίγνωση της θέσης και της ταχύτητάς του, καθώς και του γειτονικού του UAV [26].

Για το σχηματισμό του γείτονα, κάθε UAV υπολογίζει την απόσταση διαχωρισμού μεταξύ τους και τη συγκρίνει με το εύρος μετάδοσής του. Εάν η απόσταση διαχωρισμού είναι μικρότερη ή ίση με το εύρος μετάδοσης, τότε το UAV θεωρείται γείτονας και αποθηκεύεται στη λίστα των γειτόνων. Για διατήρηση της συνδεσιμότητας, η ιδέα "Boids of Reynolds" υλοποιείται στην κίνηση των UAVs, που παίρνουν μέρος σε ενεργές διαδρομές, όπου η κίνηση αυτών των UAVs περιορίζεται από το διαχωρισμό (διατηρείται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ γειτόνων), τη συνοχή (παραμένει κοντά στους γείτονές του) και την ευθυγράμμιση (προσαρμόζει την ταχύτητά του με τους γείτονες).

Ο μηχανισμός ελέγχου κινητικότητας, που υλοποιείται στο BR-AODV χρησιμοποιώντας Boids of Reynolds, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια αρχιτεκτονική εφαρμογής, που βασίζεται στο σχηματισμό, όπου οι κινήσεις των UAVs πρέπει να τηρούν αυστηρές παραμέτρους αποστολής και συντονισμού, όπως η απόσταση και το σχέδιο πτήσης. Για παράδειγμα, στη συνεργατική εναέρια παρακολούθηση, διεργασίες απαιτούν να οργανώνονται τα UAVs σε σχηματισμούς έτσι ώστε οι κινήσεις τους και οι σχετικές θέσεις τους να είναι καλά συντονισμένες [26].



#### 4.4 Σύγκριση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών κλάσεων των πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs.

A HIGH LEVEL COMPARISON OF ROUTING PROTOCOLS									
Criteria	Proactive	Reactive	Hybrid	Cluster-based	Geographic (Non-DTN)	Geographic (DTN)	Hybrid (To. & Geo.)	Bio-inspired	
Memory requirement	Very high (Store information about entire network)	High (store information on-demand)	High	Medium	Low (only neighbor information)	Low (only neighbor information)	High	Medium	
Signaling overhead	Very high (frequent update)	High (flood RREQ packet)	Medium	High (cluster maintenance overhead)	Low	High	Medium	High	
Bandwidth and energy consumption	Very high (frequent update of routing table)	High (RREQ packet flooding)	Medium	Medium (different routing strategy within & outside a cluster)	Low	High	Medium	High	
Communication latency	Very low	High (due to route discovery phase)	Medium to high	Medium	Low	High	medium	Medium	
Network size	Small scale	Small to medium scale	Small to large scale	Small to large scale	Small to large scale	Small to large scale	Small to large scale	Small to large scale (if appropriately designed)	
Application scenarios	Real-time applications, traffic monitoring cooperative transportation of objects	Data collection in precision agriculture, post-disaster operation, remote sensing	Reconnaissance, search and rescue, border surveillance	Battlefield applications, network coverage, cooperative surveillance	Cooperative traffic monitoring, battlefield, surveillance, reconnaissance	Delay tolerant applications, video making, sensor data collection	Network coverage, tracking and searching, multi-task co-operation	Searching for evading targets, battlefield applications	
Communication architecture	Suitable for SLSG	Suitable for SLSG	Suitable for SLSG & MLMG	Suitable for SLMG & MLMG	Suitable for SLSG, SLMG, & MLMG	Suitable for SLSG, SLMG, & MLMG	Suitable for SLSG, SLMG, & MLMG	Suitable for SLSG & SLMG	

SLSG = single-layer and single-group, SLMG = single-layer and multi-group, MLMG = multi-layer and multi-group, Hybrid (To. & Geo) = Hybrid (Topology-based & Geographic)

Πίνακας 4.1: Σύγκριση πρωτοκόλλων δρομολόγησης για FANETs [26]

Τα UAVs σε ένα FANET μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές εφαρμογές με ποικίλες απαιτήσεις όπως χαρακτηριστικά δεδομένων κίνησης συμπεριλαμβανομένων ανεκτικότητας στην καθυστέρηση και το jitter, όγκοι δεδομένων, επικοινωνιακά φορτία, κλπ. Επομένως, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης που αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους καθώς και άλλα που έχουν δημιουργηθεί, λαμβάνουν υπόψιν διαφορετικές στρατηγικές δρομολόγησης και μετρικές για την επιλογή της καλύτερης διαδρομής ή των επόμενων UAVs για προώθηση.

Αναφορικά με την αξιολόγηση της απόδοσης, διαφορετικά εργαλεία προσομοίωσης και μοντέλα κινητικότητας χρησιμοποιούνται. Επιπρόσθετα, κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης σε κάθε κατηγορία υπολογίζει διαφορετικές μετρικές απόδοσης, που εξαρτώνται από το συγκεκριμένο σενάριο ή τις τεχνικές και στρατηγικές που χρησιμοποιήθηκαν για να αξιολογήσουν την απόδοσή του και να το συγκρίνουν με άλλα πρωτόκολλα. Αναλόγως με τα αποτελέσματα προσομοίωσης, τις εξεταζόμενες παραδοχές και τις προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν, διαφορετικές αδυναμίες αλλά και δυνατότητες μπορούν να εξαχθούν σε κάθε πρωτόκολλο δρομολόγησης.

Όλα τα πρωτόκολλα δρομολόγησης προσφέρουν πλεονεκτήματα σε ένα συγκεκριμένο σενάριο αξιολόγησης. Όμως, διαθέτουν και τα μειονεκτήματά τους. Συνεπώς, κανένα πρωτόκολλο δρομολόγησης δεν ξεπερνά τα άλλα. Αναλόγως, η απόφαση της επιλογής του κατάλληλου πρωτοκόλλου δρομολόγησης για επικοινωνία μεταξύ των UAVs στα FANETs, εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της εφαρμογής, που καθορίζουν διάφορες απαιτήσεις, συμπεριλαμβανομένων το μέγεθος του δικτύου σε όρους του αριθμού των UAVs, της καθυστέρησης, της αξιοπιστίας, της ασφάλειας, της απόδοσης κλπ καθώς επίσης και απαιτήσεις, που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά των UAVs όπως χωρητικότητα αποθήκευσης, επεξεργαστική ισχύς, χωρητικότητα μπαταρίας, αντοχή μετάδοσης, βαθμός κινητικότητας, δυνατότητες GPS, για να αναφέρουμε μερικά.

Αναλόγως, τα proactive σχήματα που εξαρτώνται από τους αποθηκευμένους πίνακες δρομολόγησης μπορούν να προσαρμοστούν σε αλλαγές τοπολογίας μέσω περιοδικών ενημερώσεων και έχουν χαμηλή καθυστέρηση πρόσβασης διαδρομής. Από την άλλη, έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε μνήμη για τον πίνακα

δρομολόγησης, καθώς, επίσης και πολύ υψηλό εύρος ζώνης και κατανάλωση ενέργειας λόγω του υψηλού αριθμού σημάτων για ενημέρωση και διατήρηση του πίνακα δρομολόγησης, ειδικά στα FANETs μεγάλης κλίμακας που αποτελούνται από κινούμενα UAVs. Οπότε, τα proactive σχήματα θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα για εφαρμογές που χρησιμοποιούν UAVs με χαμηλό βαθμό κινητικότητας, έχουν μικρό αριθμό από UAVs και έχουν απαιτήσεις πιο γρήγορων επικοινωνιών πραγματικού χρόνου σε ενός επιπέδου και μιας ομάδας αρχιτεκτονικές επικοινωνίας και σε χαλαρά συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές εφαρμογών.

Τα reactive σχήματα χαρακτηρίζονται από την κατά απαίτηση εξεύρεση και διατήρηση του μονοπατιού δρομολόγησης και μπορούν, επίσης, να προσαρμοστούν σε αλλαγές τοπολογίας και να έχουν λιγότερη κατανάλωση ενέργειας και εύρους ζώνης, όπως επίσης λιγότερη επιβάρυνση μετάδοσης σημάτων για τη δημιουργία και διατήρηση ενός μονοπατιού δρομολόγησης προς τον κόμβο sink, συγκρινόμενα με τα proactive σχήματα. Όμως, η καθυστέρηση για την εξεύρεση της διαδρομής είναι ο κύριος περιορισμός αυτής της κλάσης σχημάτων δρομολόγησης. Επομένως, τα reactive σχήματα είναι περισσότερο κατάλληλα για δυναμικά FANETs, που αποτελούνται από μικρό έως μεσαίο αριθμό από UAVs και για εφαρμογές που μπορούν να ανεχθούν την καθυστέρηση μετάδοσης, που εισάγεται για την ανακάλυψη μιας νέας διαδρομής σε αρχιτεκτονικές εφαρμογής χαλαρά συνδεδεμένες και αρχιτεκτονικές επικοινωνίας ενός επιπέδου και μιας ομάδας.

Τα υβριδικά σχήματα δρομολόγησης, που συνδυάζουν reactive και proactive στρατηγικές, έχουν μεσαία κατανάλωση ενέργειας και εύρους ζώνης για τα πακέτα ελέγχου, μεσαία απαίτηση για αποθήκευση και μνήμη, μεσαία πολυπλοκότητα και καθυστέρηση μετάδοσης κυμαινόμενη από μεσαία έως υψηλή. Είναι κατάλληλα για εφαρμογές με μικρό έως μεγάλο αριθμό από UAVs σε ενός επιπέδου και μιας ομάδας και ενός επιπέδου και πολλών ομάδων αρχιτεκτονικές επικοινωνίας και μπορούν να ληφθούν υπόψιν και για σφιχτά και χαλαρά συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές εφαρμογών.

Τα ιεραρχικά (cluster-based) σχήματα δρομολόγησης μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και εύρους ζώνης καθώς επίσης και τη χρήση της μνήμης σε FANETs μεγάλης κλίμακας, υλοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές

δρομολόγησης εντός και εκτός ενός συμπλέγματος (cluster). Έτσι, έχουν περισσότερα πλεονεκτήματα όσον αφορά την επεκτασιμότητα και την ευελιξία και είναι κατάλληλα για εφαρμογές που χρησιμοποιούν ένα μεγάλο αριθμό ετερογενών UAVs με ποικίλα μεγέθη σε δυνατότητες επικοινωνίας, ισχύος, αποθήκευσης/μνήμης και επεξεργασίας σε αρχιτεκτονικές επικοινωνίας ενός επιπέδου και πολλών ομάδων και πολλών επιπέδων και πολλών ομάδων. Όσον αφορά τις αρχιτεκτονικές εφαρμογών είναι κατάλληλα για συντονισμένο σχηματισμό, σε συνεργασία σμήνους και σε κατανομή εργασίας.

Συγκρινόμενα με τα βασισμένα στην τοπολογία σχήματα δρομολόγησης, τα γεωγραφικά σχήματα δρομολόγησης έχουν λιγότερη κατανάλωση εύρους ζώνης για την ανταλλαγή των πακέτων ελέγχου και χαμηλή καθυστέρηση μετάδοσης, στις περισσότερες των περιπτώσεων. Αυτή η κατηγορία πρωτοκόλλων δρομολόγησης απαιτεί ακριβή πληροφορία για τη θέση των UAVs για την ανακάλυψη της πιο αποτελεσματικής διαδρομής δρομολόγησης. Η συσκευή GPS παρέχει πληροφορία τοποθεσίας, που οδηγεί σε πολυπλοκότητα υλικού.

Τα Non-DTN γεωγραφικά σχήματα δρομολόγησης είναι κατάλληλα για FANETs με υψηλή δυναμική, μεγάλης κλίμακας και πυκνότητας αποτελούμενα από UAVs εξοπλισμένα με GPS ή άλλου είδους συσκευές εύρεσης τοποθεσίας με ένα συντονισμένο σχηματισμό σε χαλαρά συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές επικοινωνίας. Για αραιά FANETs και εφαρμογές που δεν είναι ευαίσθητες στην καθυστέρηση σε μια χαλαρά συνδεδεμένη αρχιτεκτονική επικοινωνίας, τα DTN γεωγραφικά πρωτόκολλα μπορούν να ληφθούν υπόψιν.

Τα υβριδικά (γεωγραφικά και βασισμένα στην τοπολογία πρωτόκολλα δρομολόγησης) χρησιμοποιούν το σχήμα γεωγραφικής προώθησης ως την εναλλακτική καλύτερης προσπάθειας κατά τη διάρκεια αποτυχίας της reactive σύνδεσης για να αυξήσουν το ρυθμό διανομής πακέτων. Μπορούν να ληφθούν υπόψιν σε χαλαρά συνδεδεμένες αρχιτεκτονικές εφαρμογών.

Εν τέλει, οι bio-inspired τεχνικές επιτρέπουν τη σχεδίαση σχημάτων δρομολόγησης προσαρμόσιμων, επεκτάσιμων και ανθεκτικών με ελάχιστη πολυπλοκότητα και επιβάρυνση δρομολόγησης για τα FANETs. Είναι περισσότερο κατάλληλα για εφαρμογές, που χρησιμοποιούν UAVs με

αρχιτεκτονικές εφαρμογών σε συντονισμένο σχηματισμό και συνεργασία σμήνους.

Παρόλο που τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δρομολόγησης που προτάθηκαν για FANETs επιδεικνύουν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα ανάλογα με τα σενάρια στα οποία εφαρμόζονται, πρέπει να διερευνηθούν ορισμένες προκλήσεις σχεδιασμού. Για παράδειγμα, τα περισσότερα σχήματα δρομολόγησης δεν λαμβάνουν υπόψη την ενεργειακή απόδοση, που είναι ένα σοβαρό πρόβλημα για εμπορικά UAVs τροφοδοτούμενα με μπαταρία και τα χαρακτηριστικά της κίνησης (εξισορρόπηση φορτίου), που ανταλλάσσεται μεταξύ των UAVs και μεταξύ των UAVs και του επίγειου σταθμού ελέγχου. Επομένως, για να αυξηθεί ο χρόνος ζωής του δικτύου και να διατηρηθεί η συνδεσιμότητα καθώς επίσης και να αυξηθεί η απόδοση του δικτύου, η ενεργειακή απόδοση και τα χαρακτηριστικά της κίνησης θα πρέπει να ληφθούν υπόψη [26].

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη και οι Εφαρμογές τους σε Remote Sensing και Logistics - Γεώργιος Ξωνίκης, Θεόδωρος Τζιούτζιας - Μεταπτυχιακή εργασία - Πανεπιστήμιο Μακεδονίας - Μάιος 2017 - Θεσσαλονίκη
- [2] Δίκτυα Επικοινωνίας των Μη Επανδρωμένων Ιπτάμενων Οχημάτων - Αθανάσιος Θωμαΐδης, Κουκιάλη Χένρι – Πανεπιστήμιο Μακεδονίας - ΔΠΜΣ στα Πληροφοριακά Συστήματα - Μάθημα: Δίκτυα Υπολογιστών - Θεσσαλονίκη - Μάιος 2019
- [3] Η συμβολή των Drones στην διαχείριση των καταστροφών : Σύγχρονα Πεδία Εφαρμογών-Search And Rescue (SAR) Operations - Γκέκας Χρήστος - Μεταπτυχιακή εργασία – Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο - Τμήμα Γεωγραφίας - Φεβρουάριος 2016 - Αθήνα
- [4] Μελέτη τεχνικών ενσωμάτωσης drones σε έξυπνες πόλεις - Λιβέρη Χριστίνα – Πτυχιακή εργασία – Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας, Τμήμα Διοίκησης Επιχειρήσεων – 2019 - Μεσολόγγι
- [5] [https://el.wikipedia.org/wiki/Μη\\_επανδρωμένο\\_αεροσκάφος](https://el.wikipedia.org/wiki/Μη_επανδρωμένο_αεροσκάφος) - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [6] Defending Airports from UAS: A Survey on Cyber-Attacks and Counter-Drone Sensing Technologies - Georgia Lykou, Dimitrios Moustakas and Dimitris Gritzalis - Ιούνιος 2020
- [7] Unmanned Aerial Vehicle classification, Applications and challenges: A Review -Gaurav Singhal, Babankumar Bansod, Lini Mathew - Νοέμβριος 2018
- [8] Τεχνολογία και Εφαρμογές Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων Εισαγωγή – Εφαρμογές – Εξελίξεις - Μ. Μπατιστάτος, Γ. Τσούλος, Ν. Σαγιάς, Δ. Ζαρμπούτη, Γ. Αθανασιάδου, Π. Ματσάγγος - Εργαστήριο Ασυρμάτων και Κινητών Επικοινωνιών ( <http://wmcclab.uop.gr>) - Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών - Πανεπιστήμιο Πελοποννήσου - Τρίπολη
- [9] ΑΥΤΟΝΟΜΗ ΠΛΟΗΓΗΣΗ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΩΝ ΑΕΡΟΣΚΑΦΩΝ - Τσιλιβής Παναγιώτης - ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ - ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΜΗΜΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ - Ιούλιος 2016

- [10] Παραμετροποίηση συστήματος μη επανδρωμένου ηλεκτροκινητήριου ανεμόπτερου σε εφαρμογές τρισδιάστατης αποτύπωσης - Κοσμέτος Ευάγγελος - Διπλωματική εργασία - ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ - Χανιά 2018
- [11] Κατασκευή μη επανδρωμένου τετρακόπτερου (Drone) - ΠΑΠΑΔΗΜΗΤΡΙΟΥ ΔΑΝΙΗΛ - ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ - ΑΡΤΑ 2019
- [12] [https://www.glaive.store/GCL4\\_Oil\\_Powered\\_Fixed\\_Wing\\_UAV/p6038704\\_196\\_29930.aspx](https://www.glaive.store/GCL4_Oil_Powered_Fixed_Wing_UAV/p6038704_196_29930.aspx) - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [13] <https://en.wikipedia.org/wiki/Ornithopter> - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [14] <https://www.yankodesign.com/2010/09/14/swiss-and-unmanned/> - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [15] [https://psdatm.gr/images/pdf/A.Georgopoulos\\_-----.pdf](https://psdatm.gr/images/pdf/A.Georgopoulos_-----.pdf) - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [16] [https://en.wikipedia.org/wiki/EOMST\\_unmanned\\_blimps](https://en.wikipedia.org/wiki/EOMST_unmanned_blimps) - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [17] <https://futuretech.news/2018-11-20-unmanned-airship-surveillance-camera-can-spy-on-people.html> - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [18] Η τεχνολογία των μη επανδρωμένων οχημάτων αεροφωτογράφισης - Ανδρέας Γεωργόπουλος Καθηγητής ΕΜΠ - Εργαστήριο Φωτογραμμετρίας - Μη Επανδρωμένα Εναέρια Συστήματα (UAS) και Χαρτογράφηση ΔΙΗΜΕΡΙΔΑ ΠΣΔΑΤΜ – 25 & 26.11.2016
- [19] <https://www.naftemporiki.gr/story/1219838/u-lion-ybridiko-uav-pou-uposxetai-epanastasi-sta-drones> - 2017 - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [20] <https://www.digitallife.gr/bell-v-247-vigilant-to-proto-ivridiko-uav-apo-tin-bell-83515> - 2016 - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [21] Εναέρια μη επανδρωμένα συστήματα λήψης εικόνων και τα προγράμματα φωτογραμμετρικής παραγωγής τους - Νίκη Καρτσακλή - Ερευνητική Εργασία - ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ & ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ – Θεσσαλονίκη - Σεπτέμβριος 2018
- [22] UAS Platforms - A White Paper prepared for NCAR / EOL Workshop - Unmanned Aircraft Systems for Atmospheric Research – February 2017 -

Matt Fladeland, NASA Ames Research Center Susan Schoenung, Bay Area  
Environmental Research Institute Mark Lord, NCAR

- [23] <https://www.slideserve.com/hoshi/history-of-unmanned-aerial-systems> -  
Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [24] APPLICATION OF MULTIPLE CATEGORIES OF UNMANNED AIRCRAFT  
SYSTEMS (UAS) IN DIFFERENT AIRSPACES FOR BUSHFIRE  
MONITORING AND RESPONSE - N. Homainejad , C. Rizos - The University  
of New South Wales, School of Civil and Environmental Engineering, Sydney,  
Australia – 2015
- [25] Ζητήματα επικοινωνιών σε μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα - Περικλής  
Δαφνοπατίδης – Διπλωματική εργασία – Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο -  
Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας Συστήματα Κινητού και Διάχυτου  
Υπολογισμού - Πάτρα - Σεπτέμβριος 2019
- [26] Routing in Flying Ad Hoc Networks: A Comprehensive Survey - Demeke  
Shumeye Lakew, Umar Sa’ad, Nhu-Ngoc Dao, Woongsoo Na, and Sungrae  
Cho - IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS AND TUTORIALS, VOL. XX,  
NO. XX - Μάρτιος 2020
- [27] Review and Comparison of Emerging Routing Protocols in Flying Ad Hoc  
Networks Qianqian Sang , Honghai Wu ,Ling Xing and Ping Xie - Symmetry -  
Published: 8 June 2020
- [28] Flying ad-hoc network application scenarios and mobility models - Armir  
Bujari, Carlos T Calafate, Juan-Carlos Cano, Pietro Manzoni, Claudio Enrico  
Palazzi and Daniele Ronzani - International Journal of Distributed Sensor  
Networks 2017, Vol. 13(10)
- [29] <https://www.e-education.psu.edu/geog892/node/643> - Πρόσβαση Νοέμβριος  
2020
- [30] <http://kotsanas.com/exh.php?exhibit=2001001> - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [31] [https://el.wikipedia.org/wiki/Αρχύτας\\_ο\\_Ταραντίνος](https://el.wikipedia.org/wiki/Αρχύτας_ο_Ταραντίνος) - Πρόσβαση Νοέμβριος  
2020
- [32] <https://www.mixanitouxronou.gr/i-proti-iptameni-michani-kataskevastike-apo-ellina-pithagorio-filosofu-ke-petaxe-se-apostasi-200-metron-o-idios-elise-ena-apo-ta-megalitera-mathimatika-provlimata/> - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020



- [33] DRONE TECHNOLOGY & DATA IN RESEARCH JOURNALISM - Κων/νος  
Μαρκάτης - Διπλωματική Εργασία – Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο - ΣΧΟΛΗ  
ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ  
- ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ - «ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ 3η:  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ» - Αθήνα -  
2017
- [34] [https://el.wikipedia.org/wiki/Πρώτες\\_ιπτάμενες\\_μηχανές](https://el.wikipedia.org/wiki/Πρώτες_ιπτάμενες_μηχανές) - Πρόσβαση  
Νοέμβριος 2020
- [35] <https://interestingengineering.com/a-brief-history-of-drones-the-remote-controlled-unmanned-aerial-vehicles-uavs> - Πρόσβαση Νοέμβριος 2020
- [36] THE HISTORY AND THE EVOLUTION OF UAVs FROM THE BEGINNING  
TILL THE 70s - Vasile PRISACARIU - Air Force Academy, Brasov, Romania -  
Journal of Defense Resources Management Vol. 8, Issue 1 (14) /2017
- [37] <https://www.kurzweilai.net/nano-hummingbird-uav> - Πρόσβαση Νοέμβριος  
2020
- [38] The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for engineering geology  
applications - Daniele Giordan & Marc S. Adams & Irene Aicardi & Maria  
Alicandro & Paolo Allasia & Marco Baldo & Pierluigi De Berardinis & Donatella  
Dominici & Danilo Godone & Peter Hobbs & Veronika Lechner & Tomasz  
Niedzielski & Marco Piras & Marianna Rotilio & Riccardo Salvini & Valerio  
Segor & Bernadette Sotier & Fabrizio Troilo - Bulletin of Engineering Geology  
and the Environment (2020) 79:3437–3481 - <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01766-2> / Published online: 1 April 2020
- [39] [https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial\\_measurement\\_unit](https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit) - Πρόσβαση  
Ιανουάριος 2021
- [40] <https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/what-gnss> - Πρόσβαση  
Ιανουάριος 2021
- [41] [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS\\_Systems](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/SBAS_Systems) - Πρόσβαση  
Ιανουάριος 2021
- [42] Εναέρια μη επανδρωμένα συστήματα λήψης εικόνων και η χρήση τους σε  
εφαρμογές μηχανικού - Μαρία Α. Σιφναίου - Διπλωματική Εργασία -  
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ

ΣΧΟΛΗ - ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ –

Θεσσαλονίκη - Σεπτέμβριος 2016

- [43] Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications—A Review - Huang Yao, Rongjun Qin and Xiaoyu Chen – Ιούνιος 2019
- [44] [https://el.wikipedia.org/wiki/Ορολογία\\_Drone](https://el.wikipedia.org/wiki/Ορολογία_Drone) - Πρόσβαση Ιανουάριος 2021
- [45] <https://www.cnet.com/news/the-history-of-the-predator-the-drone-that-changed-the-world-q-a/> - Πρόσβαση Ιανουάριος 2021
- [46] <https://science.howstuffworks.com/predator.htm> - Πρόσβαση Ιανουάριος 2021
- [47] <https://interestingengineering.com/us-army-awards-pocket-sized-drones-206-million-contract> - Πρόσβαση Ιανουάριος 2021
- [48] <https://techthelead.com/solar-powered-drone-to-set-flight-and-enable-5g/> - Πρόσβαση Ιανουάριος 2021
- [49] <https://www.e-mc2.gr/el/node/445> - Πρόσβαση Ιανουάριος 2021
- [50] Fuel Cells: A Real Option for Unmanned Aerial Vehicles Propulsion - Óscar González-Espasandín, Teresa J. Leo and Emilio Navarro-Arévalo - The Scientific World Journal, Volume 2014, Article ID 497642
- [51] Propulsion system for a small unmanned aerial vehicle - OSCAR ANDERSSON, DENNIS WILKMAN - School of Engineering Sciences KTH Royal Institute of Technology Sweden - June 2020
- [52] <https://www.defence-point.gr/news/kina-to-pto-drone-poy-chrisimopoiei-methanoli-os-kaysimo-einai-gegonos> - Πρόσβαση Ιανουάριος 2021
- [53] Τα Μη Επανδρωμένα Αεροσκάφη (μΕΑ) ως Νέο Τεχνολογικό Εργαλείο Πολέμου: Πολιτικές και Στρατιωτικές Παράμετροι από τη Χρήση τους - Παναγιώτης Κιούσης - Διπλωματική εργασία - ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ - ΣΧΟΛΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ - ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ - Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών - Κατεύθυνση Πολιτικής Ιστορίας και Στρατηγικών Σπουδών - Θεσσαλονίκη - Ιούνιος 2018
- [54] <https://www.allerin.com/blog/10-stunning-applications-of-drone-technology> - Πρόσβαση Φεβρουάριος 2021
- [55] Unmanned Aerial Vehicles in Smart Agriculture: Applications, Requirements and Challenges Praveen Kumar Reddy Maddikunta , Saqib Hakak , Mamoun

Alazab , Sweta Bhattacharya , Thippa Reddy Gadekallu , Wazir Zada Khan ,  
and Quoc-Viet Pham – 25 July 2020

- [56] A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture - Dimosthenis C. Tsouros , Stamatia Bibi and Panagiotis G. Sarigiannidis - Department of Electrical and Computer Engineering, University of Western Macedonia, 50100 Kozani, Greece - 11 November 2019
- [57] <https://www.tovima.gr/2017/02/15/science/to-prwto-drone-epikoniastis/> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [58] <https://www.economist.com/science-and-technology/2017/02/09/plans-for-artificial-pollinators-are-afoot> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [59] <https://vegetablegrowersnews.com/article/robots-replace-honeybees-pollinators/pollinator-japanese-flyer-eijiro-miyako-660x314/> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [60] Drone Applications for Supporting Disaster Management - Agoston Restas- Institute of Disaster Management, National University of Public Service, Budapes -published 22 October 2015
- [61] Αποτίμηση Αλγορίθμων Ελέγχου Ρομποτικού Σμήνου - ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΑ ΖΗΣΙΜΟΥ- ΔΙΑΤΡΙΒΗ - Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής - Σχολή Μηχανικών - Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής-Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών: Αυτοματισμός Παραγωγής και Υπηρεσιών - Πειραιάς, Ιούνιος 2018
- [62] <https://www.dronesolutions.gr/> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [63] <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/business-stories/uranus-pente-mixanikoi-thetoun-ta-drones-stin-ipiresia-tis-thalassias-diasosis/> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [64] <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/harnessing-space-save-lives-sea> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [65] Η χρήση των δικτύων των UAVs για ανθρωπιστικούς και περιβαλλοντικούς σκοπούς - Φωτεινή Ταρará - Πανεπιστήμιο Μακεδονίας - ΔΠΜΣ Πληροφοριακά Συστήματα - Μάθημα: Δίκτυα Υπολογιστών – Θεσσαλονίκη - Μάιος 2018
- [66] <https://www.bbc.com/news/uk-england-lincolnshire-43188849> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021

- [67] <https://medium.com/srmscro/drones-for-weather-forecasting-67289386b5d8> -  
Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [68] <https://www.ghsupplychain.org/news/uavs-and-their-role-health-supply-chain-case-study-malawi> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [69] Do drones have a realistic place in a pandemic fight for delivering medical supplies in healthcare systems problems? - Chinese Society of Aeronautics and Astronautics & Beihang University - Chinese Journal of Aeronautics - Jalel EUCHI - Department of Management Information Systems and Production Management, College of Business and Economics, Qassim University, Buraydah 51452, Saudi Arabia b - OLID Laboratory, ISGIS, Sfax University, Sfax 3021, Tunisia - May 2020
- [70] SMART CITIES: ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΠΟΛΕΩΝ ΧΑΡΤΗΣ ΚΑΛΩΝ ΠΡΑΚΤΙΚΩΝ - ΤΣΟΥΡΟΥΦΛΗΣ ΑΓΓΕΛΟΣ - ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ - ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΔΙΑΚΥΒΕΡΝΗΣΗ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ - ΙΟΥΝΙΟΣ 2016
- [71] <https://www.geospatialworld.net/blogs/how-drones-are-crucial-for-smart-cities/> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [72] <https://smartcities.ellak.gr/anichtes-technologies-gia-ti-sigchroni-poli/> - Πρόσβαση Μάρτιος 2021
- [73] <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Cargo-drones-The-urban-parcel-delivery-network-of-tomorrow.html> - Πρόσβαση Απρίλιος 2021
- [74] <https://forcetechnology.com/en/services/drone-inspection-services> - Πρόσβαση Απρίλιος 2021
- [75] <https://www.dronegenuity.com/ways-drones-help-save-the-environment/> - Πρόσβαση Απρίλιος 2021
- [76] <https://blog.ferrovial.com/en/2017/06/drones-for-environmental-monitoring/> - Πρόσβαση Απρίλιος 2021
- [77] Μελέτη, ανάλυση, προσομοίωση υβριδικού συστήματος παροχής ηλεκτρικής ισχύος μη επανδρωμένου αεροσκάφους (UAV), με σκοπό τη μείωση του θερμικού και του ηχητικού ίχνους - Γεώργιος Π. Καράπατσας - ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΙΣΧΥΟΣ - ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ - Αθήνα, Οκτώβριος 2020

- [78] Wireless Communications with Unmanned Aerial Vehicles: Opportunities and Challenges - Yong Zeng, Rui Zhang, and Teng Joon Lim - Department of Electrical and Computer Engineering, National University of Singapore - February 12, 2016
- [79] UNMANNED AERIAL VEHICLE IN MILITARY OPERATIONS - Gheorghe UDEANU, Alexandra DOBRESCU, Mihaela OLTEAN - "Nicolae Bălcescu" Land Forces Academy, Sibiu, Romania - DOI: 10.19062/2247-3173.2016.18.1.26
- [80] <https://www.facebook.com/DailyMail/videos/3508999225863219/> - Πρόσβαση Απρίλιος 2021
- [81] <https://interestingengineering.com/genesis-breaks-world-record-by-flying-3281-drones-over-shanghai> - Πρόσβαση Απρίλιος 2021
- [82] On the Routing in Flying Ad hoc Networks - Md. Hasan Tareque, Md. Shohrab Hossain -Department of Computer Science and Engineering - Bangladesh University of Engineering and Technology Dhaka, Bangladesh - Mohammed Atiquzzaman - School of Computer Science - The University of Oklahoma - DOI: 10.15439/2015F002
- [83] Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Review of Communication architectures, and Routing protocols - Muhammad Asghar Khan - Hamdard University, Alamgir Safi - ISRA University, Islamabad Campus, Ijaz Mansoor Qureshi - AIR University, Inam Ullah Khan - ISRA University, Islamabad Campus - Department of Electrical Engineering - Islamabad, Pakistan – Νοέμβριος 2017
- [84] FANET: Communication, mobility models and security issues - Amira Chriki, Haifa Touati, Hichem Snoussi, Farouk Kamoun - Computer Networks 163 (2019) 106877
- [85] Ground Control System Based Routing for Reliable and Efficient Multi-Drone Control System - Woonghee Lee, Joon Yeop Lee, Jiyeon Lee, Kangho Kim, Seungho Yoo , Seongjoon Park and Hwangnam Kim - Published: 23 October 2018
- [86] <https://www.proquest.com/docview/1424346351> - Πρόσβαση Ιούνιος 2021

- [87]** Comprehensive Mobility Prediction Based Clustering Algorithm for Ad Hoc UAV Networks - Yunlong Yu, Le Ru, Kun Fang, Xufeng Jia - 4th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT) 2016
- [88]** Energy Aware Cluster-Based Routing in Flying Ad-Hoc Networks - Farhan Aadil, Ali Raza, Muhammad Fahad Khan, Muazzam Maqsood, Irfan Mehmood and Seungmin Rho - 3 May 2018
- [89]** On the Delay of Reactive-Greedy-Reactive Routing in Unmanned Aeronautical Ad-hoc Networks - Rostam Shirani, Marc St-Hilaire, Thomas Kunz, Yifeng Zhou, Jun Li and Louise Lamont - The 3rd International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT) - Procedia Computer Science 10 ( 2012 ) 535 – 542
- [90]** FANETs in Agriculture - A routing protocol survey - Georgios A. Kakamoukas, Panagiotis G. Sarigiannidis, Anastasios A. Economides - 2020