



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση, σχεδίαση και υλοποίηση συστήματος μετάδοσης βίντεο σε
πραγματικό χρόνο με την υποστήριξη εφήμερων υποδομών**

Ρίζος Θεόδωρος

A.M.: 179

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Σπυριδούλα Μαργαρίτη

Άρτα, Ιανουάριος, 2025

Analysis, design, and implementation of live streaming system using ephemeral infrastructures

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 21/01/2025

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπουσα καθηγήτρια

Μαργαρίτη Σπυριδούλα,

2. Μέλος επιτροπής

Στεργίου Ελευθέριος,

3. Μέλος επιτροπής

Στύλιος Χρυσόστομος.

© Ρίζος, Θεόδωρος, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εξ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Ρίζος, Θεόδωρος

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα. Μαργαρίτη Σπυριδούλα για την πολύτιμη βοήθειά της κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας, αλλά και την καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια της ακαδημαϊκής μου φοίτησης. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, την κοπέλα μου και τους φίλους μου, για την αμέριστη στήριξη και κατανόηση καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρεία λογισμικού ActionNPA για την διάθεση των υλικών ώστε να πραγματοποιηθεί η συγκεκριμένη εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ζωντανή μετάδοση δραστηριοτήτων ή εκδηλώσεων μέσω του διαδικτύου έχει μεγάλη απήχηση στο κοινό λόγω της αμεσότητας, αυθεντικότητας, της άρσης των γεωγραφικών ορίων και της ανάδυσης των μέσων κοινωνικής δικτύωσης. Ο χρήστης (θεατής, θεάτρια) έχει την αίσθηση ότι συμμετέχει σε ένα γεγονός είτε πρόκειται για μια κοινωνική εκδήλωση, είτε για ένα αθλητικό δρώμενο όπως ένας αγώνας ταχύτητας αυτοκινήτων. Η συνεχής ανάπτυξη των τεχνολογιών δικτύωσης σε επίπεδο υλικού και λογισμικού συνέτεινε στην αύξηση της ζήτησης για μετάδοση ζωντανής ροής και την ανάγκη κάλυψης γεγονότων ακόμη και μέσω εφήμερων υποδομών. Ταυτόχρονα, αυξάνονται και οι απαιτήσεις για μετάδοση ζωντανής ροής βίντεο με χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή ποιότητα.

Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής ενέχει πολλές προκλήσεις καθώς απαιτείται α) η λήψη βίντεο σε πραγματικό χρόνο και η μετατροπή σε μορφή κατάλληλη για μετάδοση, β) η μεταφορά των δεδομένων βίντεο σε ένα υπολογιστικό σύστημα-εξυπηρετητή και η μετάδοσή του μέσω του διαδικτύου στους τελικούς αποδέκτες και γ) η παράδοση των ροών βίντεο στους τελικούς χρήστες για αναπαραγωγή. Επιπλέον, το σύστημα θα πρέπει να είναι λειτουργικό και αποτελεσματικό για εφαρμογή σε εξωτερικό περιβάλλον που ενδεχομένως δεν διατίθεται σταθερή υποδομή δικτύωσης, ή βρίσκεται εκτός εμβέλειας δικτύου είτε η σύνδεση είναι σχετικά αργή.

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης αναλύεται, σχεδιάζεται και υλοποιείται ένα ολοκληρωμένο σύστημα μετάδοσης ζωντανής ροής βίντεο χρησιμοποιώντας εφήμερες υποδομές και δοκιμάζεται η λειτουργικότητά του σε πραγματικό χρόνο για την κάλυψη ενός αγώνα ταχύτητας αυτοκινήτων. Για την υλοποίησή του επιλέγονται οι κατάλληλες υποδομές (δικτύωσης, συλλογής εικόνας και βίντεο, κλπ.), οι διαθέσιμες τεχνολογίες, και το απαραίτητο λογισμικό. Εστιάζοντας στις τεχνολογίες “behind the scenes”, επιτυγχάνεται η δημιουργία ενός τελικού συστήματος “Live Streaming” χαμηλού κόστους, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και χαμηλής καθυστέρησης.

Λέξεις-κλειδιά: Σύστημα Μετάδοσης Ζωντανής Ροής Βίντεο, Wowza Video, Πρωτόκολλα Χαμηλής Καθυστέρησης, Εφήμερες Υποδομές.

ABSTRACT

The live streaming of activities or events over the internet has gained significant popularity due to immediacy, authenticity, the abolition of geographical boundaries and the rise of social media. Viewers feel that they are participating in an event, whether it is a social or a sports event, such as a car race. The continuous development of networking technologies at both the hardware and software levels has led to the demand for live streaming and the need to cover events, even through ephemeral infrastructures. At the same time, requirements for low-latency and high-quality video streaming are also increasing.

Creating a complete live streaming system involves many challenges, as it requires a) capturing video in real time and converting it into a suitable format for transmission, b) transferring the video data to a server and streaming it over the internet to the end users and c) delivering the video stream to the end users for playback. Additionally, the system must be fully functional and efficient for use in outdoor environments where stable network infrastructure may not be available, it may be outside network coverage range or connection may be relatively slow.

In the context of this study, an integrated live video transmission system is analyzed, designed and implemented using ephemeral infrastructures and its functionality is tested in real-time to cover a car race. For its implementation, the appropriate infrastructures (networking, video and image capture, etc.), available technologies and necessary software is selected. By focusing on the “behind the scenes” technologies, the creation of the final low cost, low energy consumption and low latency live streaming system is achieved.

Keywords: Live Video Streaming System, Wowza Video, Low Latency Protocols, Ephemeral Infrastructure.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	13
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ	14
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
1.1 Κίνητρο και Στόχος.....	16
1.2 Δομή Εργασίας.....	16
2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	18
2.1 Ανάλυση Απαιτήσεων	18
2.2 Δομή - Αρχιτεκτονική.....	21
2.3 Λειτουργία Συστήματος.....	23
2.4 Σχετικές Εργασίες.....	24
3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	26
3.1 Υποδομή.....	26
3.1.1 Πηγές Βίντεο.....	27
3.1.2 Μικροκυματικές Ζεύξεις.....	31
3.1.3 Σύνδεση στο διαδίκτυο	36
3.1.4 Προορισμός Ροής	37
3.2 Τεχνολογίες.....	37
3.2.1 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας	37
3.2.2 Κωδικοποιήσεις Βίντεο.....	42
3.2.3 Cloud-Based πλατφόρμα	43
3.2.4 Αναπαραγωγή Βίντεο	45
3.3 Λογισμικά.....	45
4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΖΩΝΤΑΝΗΣ ΜΕΤΑΔΩΣΗΣ.....	53
4.1 Υλοποίηση Συστήματος	53
4.2 Έλεγχος λειτουργικότητας συστήματος.....	61

4.3	Αξιολόγηση Συστήματος.....	62
4.3.1	Μετρικές.....	62
4.3.2	Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	63
4.4	Συζήτηση	70
4.4.1	Διαπιστώσεις.....	70
4.4.2	Περιορισμοί.....	71
4.4.3	Μελλοντική Εργασία	72
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	73
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	75
	Παράρτημα Α: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της υποδομής	79
	Παράρτημα Β: Παραμετροποίηση της Cloud-Based πλατφόρμας Wowza	85

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2-1: Αρχιτεκτονική Συστήματος Live Streaming.	22
Εικόνα 2-2: Αγωνιστική διαδρομή.	23
Εικόνα 2-3: Τοποθεσία διεξαγωγής αγώνα.	24
Εικόνα 3-1: Απαραίτητα βήματα για την μετάδοση ζωντανής ροής.....	27
Εικόνα 3-2: Μεγέθη FPV καμερών.....	28
Εικόνα 3-3: Αισθητήρες CCD & CMOS.	28
Εικόνα 3-4: Rolling Shutter & Global Shutter effect.	29
Εικόνα 3-5: Αναλογίες διαστάσεων.	29
Εικόνα 3-6: Οπτικό πεδίο οράσεως.	30
Εικόνα 3-7: Wide Dynamic Ranging.	30
Εικόνα 3-8: Διαθέσιμα κανάλια στην περιοχή των 5.8GHz.	32
Εικόνα 3-9: Επικοινωνία κεραιών πομπού και δέκτη.....	33
Εικόνα 3-10: Omnidirectional & Bidirectional antennas.	34
Εικόνα 3-11: Helical & Patch antennas.	34
Εικόνα 3-12: Κυκλική πόλωση κεραιών (Right-Hand Circular Polarization (RHCP) and Left-Hand Circular Polarization (LHCP)).	35
Εικόνα 3-13: Κέρδος κεραίας.....	36
Εικόνα 3-14: Πρωτόκολλα TCP και UDP.	38
Εικόνα 3-15: Στάδια ροής.	40
Εικόνα 3-16: Καθυστερήσεις πρωτοκόλλων.....	41
Εικόνα 3-17: Διάγραμμα ροής Wowza video.	44
Εικόνα 3-18: OBS σε λειτουργία Studio Mode.	47
Εικόνα 3-19: Χρήση γραφικών στοιχείων στο OBS.....	48
Εικόνα 3-20: Σύνδεση με τον custom SRT server της πλατφόρμας Wowza.....	48
Εικόνα 3-21: Παράθυρο ρυθμίσεων OBS.	49
Εικόνα 3-22: Επεξεργασία Γραφικών από 3D Paint.	50
Εικόνα 3-23: Επεξεργασία Γραφικών από το Photoshop.	50
Εικόνα 3-24: Alert.	51
Εικόνα 3-25: Γραφικό ολοκλήρωσης αγώνα.	51
Εικόνα 3-26: Εύρεση LOS με Google Earth.	52
Εικόνα 3-27: Οπτικοποίηση LOS με το online εργαλείο radioFresnel.....	52
Εικόνα 4-1: Διάγραμμα ροής Συστήματος.....	54
Εικόνα 4-2: Κατασκευή πομπού 5.8GHz.....	56
Εικόνα 4-3: Η τοποθέτηση των δεκτών 5.8GHz πάνω σε κατάλληλες κατασκευές.....	57
Εικόνα 4-4: Χειρισμός live μέσω εικόνων.....	58
Εικόνα 4-5: Μέτρηση ταχύτητας σύνδεσης.....	59
Εικόνα 4-6: Wowza transmuxing.	60
Εικόνα 4-7: Διεπαφή Wowza.	60
Εικόνα 4-8: Στιγμιότυπο από την αναπαραγωγή του βίντεο στο Wowza WebRTC Player.	61
Εικόνα 4-9:Υπολογισμός καθυστέρησης με καταγραφή ρολογιού οθόνης.....	63
Εικόνα 4-10: Εκτίμηση μέσης καθυστέρησης για διάφορες ευρωπαϊκές πόλεις.....	64
Εικόνα 4-11: Χρόνος Επεξεργασίας	65

Εικόνα 4-12: Προτεινόμενες ρυθμίσεις κωδικοποιητή Wowza video.	66
Εικόνα 4-13: Throughput για τις διάφορες τιμές bitrate.	66
Εικόνα 4-14: Stream Health ενός χρήστη.	67
Εικόνα 4-15: Κατανάλωση δεδομένων ενός χρήστη.	68
Εικόνα 4-16: Stream Health Αγώνα 1ης ημέρας.....	68
Εικόνα 4-17: Stream Health Αγώνα 2ης ημέρας.....	69
Εικόνα 4-18: Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων από την πλατφόρμα για το διάστημα 10:30 με 11:45.	69
Εικόνα 4-19: Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων προς την πλατφόρμα για το διάστημα 10:00 με 14:45.	69
Εικόνα 4-20: Egress υψηλού φόρτου.	70
Εικόνα A-1: Phoenix 2 Camera Special Edition V2 By Runcam.	79
Εικόνα A-2: Reolink 4G Go Plus.....	80
Εικόνα A-3: iFlight BLITZ 5.8GHz PIT/25mW/400mW/1000mW/2500mW MMCX VTX.....	81
Εικόνα A-4: EWRF UVC OTG 5.8G 48ch 720*480 Diversity Audio FPV Receiver for Android Tablet Smartphone	82
Εικόνα A-5: RC832 Boscam FPV 5.8G 32CH Wireless AV Receiver for RC Drones.....	83
Εικόνα A-6: Starlink.....	84
Εικόνα A-7: Anga PS-C240.....	84

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1: Συσχέτιση mW και db.....	36
Πίνακας 3-2: Σύγκριση πλατφορμών.....	43
Πίνακας 3-3: Σύγκριση Λογισμικών Ροής.....	46
Πίνακας 4-1: Επίγειοι σταθμοί.....	54
Πίνακας 4-2: Σταθμός βάσης.....	55
Πίνακας 4-3: Μη επανδρωμένο αεροσκάφος.....	55
Πίνακας 4-4: Πίνακας Bitrate.....	66
Πίνακας A-1: Χαρακτηριστικά αναλογικής κάμερας.....	79
Πίνακας A-2: Χαρακτηριστικά ψηφιακής κάμερας.....	80
Πίνακας A-3: Χαρακτηριστικά πομπού.....	81
Πίνακας A-4: Χαρακτηριστικά δέκτη.....	82
Πίνακας A-5: Χαρακτηριστικά δέκτη.....	83
Πίνακας A-6: Χαρακτηριστικά συσκευής ψηφιοποίησης σήματος.....	84

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

FPV:	First Person View
VOD:	Video On Demand
LOS:	Line Of Sight
GIS:	Geographic Information Systems
CAGR:	Compounded Annual Growth Rate
RTMP:	Real-Time Messaging Protocol
SRT:	Secure Reliable Transport
WebRTC:	Web Real-Time Communication
HTTP:	HyperText Transfer Protocol
HLS:	HTTP Live Streaming
RTSP:	Real-Time Streaming Protocol
SSL:	Secure Sockets Layer
OSI:	Open Systems Interconnection
TCP:	Transmission Control Protocol
UDP:	User datagram Protocol
Wi-Fi:	Wireless Fidelity
OBS:	Open Broadcaster Software
HD:	High Definition
UAV:	Unmanned Aerial Vehicle
FPS:	Frames Per Second
GOP:	Group Of Pictures
SIM:	Subscriber Identity Module
USB:	Universal Serial Bus
VTX:	Video Transmitter
VRX:	Video Receiver
GHz:	Gigahertz
RF:	Radio Frequency
mW:	Milliwatt
db:	Decibel
FOV:	Field Of View
CCD:	Charge-Coupled Device
CMOS:	Complementary Metal Oxide Semiconductor
PAL:	Phase Alternate Line
NTSC:	National Television Standards Committee
WDR:	Wide Dynamic Ranging
TVL:	Television Lines
OSD:	On Screen Display
AVC:	Advanced Video Coding
HEVC:	High Efficiency Video Coding
AAC:	Augmentative and Alternative Communication
AES:	Advanced Encryption Standard
iSAC:	internet Speech Audio Codec
iLBC:	Internet Low Bitrate Codec
LEO	Low Earth Orbit

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία και συνεχής ανάπτυξη των υποδομών των επικοινωνιακών δικτύων, έχει οδηγήσει σε αυξανόμενες απαιτήσεις ως προς την ζήτηση των ανθρώπων για βίντεο ζωντανής ροής όπως η μετάδοση αθλητικών γεγονότων, μουσικών εκδηλώσεων, διαδικτυακών μαθημάτων και διασκέψεων με όσο το δυνατόν χαμηλότερες καθυστερήσεις και υψηλότερη ποιότητα μετάδοσης. Τι συμβαίνει όμως στην περίπτωση όπου σε ένα εξωτερικό περιβάλλον δεν διατίθεται η κατάλληλη υποδομή για την υποστήριξη ενός τέτοιου δικτύου; Ή ακόμη και αν υπάρχει διαθέσιμο δίκτυο τότε αυτό δεν είναι ικανοποιητικό για την υποστήριξη μιας τέτοια εκδήλωσης;

Στην εποχή της ψηφιακής τεχνολογίας, η παρακολούθηση και μετάδοση βίντεο έχει αποκτήσει τεράστια δημοφιλία με τις έρευνες να δείχνουν πως το 91.8% των συνολικών χρηστών του διαδικτύου παρακολουθεί online βίντεο σε εβδομαδιαία βάση, με το 66% αυτών να αναφέρουν πως η παρακολούθηση βίντεο αποτελεί τον κύριο τρόπο ενημέρωσης τους [1]. Υπάρχουν αρκετές μορφές ροής βίντεο που χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς σκοπούς, ανάλογα με το είδος του περιεχομένου και το κοινό στο οποίο στοχεύουν. Ορισμένες από αυτές είναι το βίντεο κατ' απαίτηση (video on demand, VOD), τα βίντεο ιστολογίου (vlog), τα εκπαιδευτικά βίντεο (tutorials) και η ζωντανή μετάδοση ροής (live streaming) [2]. Η ζωντανή μετάδοση ροής αναφέρεται ως η μετάδοση δεδομένων ήχου και βίντεο από άκρο σε άκρο μέσω του διαδικτύου σε πραγματικό χρόνο [3]. Η δημοφιλία του live streaming εκτοξεύθηκε από την έναρξη της πανδημίας το 2020 με τα ποσοστά του να βρίσκονται κοντά στο 25% στην σχετική λίστα παρακολούθησης βίντεο [2]. Αυτό συμβαίνει, διότι μέσα από την ζωντανή μετάδοση, δημιουργείται μια αμεσότητα και σχέση αλληλεπίδρασης, δίνοντας την αίσθηση στον θεατή που παρακολουθεί πως βρίσκεται στο μέρος όπου εξελίσσονται τα γεγονότα. Η ζωντανή μετάδοση ροής κερδίζει συνεχώς έδαφος, αφού δίνει την ευκαιρία σε απλά άτομα και επιχειρήσεις να προβάλλουν ζωντανά το περιεχόμενο τους, εκμεταλλευόμενοι την ευρεία χρήση έξυπνων συσκευών (π.χ. smartphones) και τις πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης.

Η ταχύτατη εξέλιξη του live streaming έχει οδηγήσει στον ανταγωνισμό με την παραδοσιακή τηλεόραση, αφού βρίσκει εφαρμογή σε πολλά πεδία όπως η παρακολούθηση και η ασφάλεια, οι ζωντανές εκδηλώσεις, η εκπαίδευση και άλλες διαδραστικές εφαρμογές [4]. Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία του video streaming έχει σημειώσει σημαντική αύξηση ιδίως στον τομέα της ζωντανής ροής. Το 2023, το live streaming εκτιμήθηκε στην παγκόσμια αγορά έναντι 87.55 δισεκατομμυρίων δολαρίων, ενώ προβλέπεται αύξηση έως το 2030 κατά 23% σύμφωνα με τον δείκτη ετήσιου ρυθμού ανάπτυξης (CAGR) [5]. Ωστόσο, παρά την ταχεία ανάπτυξη εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις, ιδίως όσον αφορά την ύπαρξη μιας τυποποιημένης υποδομής και ενός πλαισίου για την μετάδοση ζωντανής ροής βίντεο σε απομακρυσμένες τοποθεσίες όπου δεν υπάρχει μόνιμη ή σταθερή δικτυακή υποδομή. Αυτό αποτελεί ιδιαίτερο πρόβλημα για περιπτώσεις εφήμερων εκδηλώσεων που χρειάζεται να μεταδοθούν ζωντανά και πραγματοποιούνται μακριά από τον αστικό ιστό, όπως είναι οι συναυλίες ή οι αθλητικοί αγώνες.

1.1 Κίνητρο και Στόχος

Η αυξανόμενη ζήτηση υπηρεσιών ζωντανής μετάδοσης στην σημερινή αγορά έχει οδηγήσει τις εταιρίες να προσφέρουν με υψηλότερο κόστος την παροχή αυτής της υπηρεσίας. Επιπρόσθετα, η απαίτηση για αυξημένη ποιότητα, και η ανάγκη διαχείρισης της μεγάλης ποσότητας των δεδομένων, προσθέτουν μια επιπλέον δυσκολία στην μείωση αυτού του κόστους. Κίνητρο για αυτή την εργασία αποτέλεσε μια προσπάθεια για την δημιουργία ενός συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής, χαμηλής καθυστέρησης και χαμηλού κόστους που έλαβε χώρα μερικούς μήνες νωρίτερα, στην βορειοδυτική Ελλάδα, κοντά στην πόλη των Ιωαννίνων. Η υλοποίηση του συστήματος δεν επέφερε τα επιθυμητά αποτελέσματα καθώς παρουσιάστηκαν συχνές διακοπές κατά την επικοινωνία μεταξύ των συσκευών (εξαιτίας της έλλειψης σύνδεσης) καθώς επίσης και στην ύπαρξη μεγάλης καθυστέρησης κατά την αναπαραγωγή του βίντεο από τους τελικούς χρήστες. Η “φτωχή” απόδοση του συστήματος αποδίδεται στην εσφαλμένη επιλογή του εξοπλισμού και των τεχνολογιών καθώς επίσης και στον συνωστισμό, που οδήγησε στη μειωμένη κάλυψη εξαιτίας του διαμοιρασμού του διαθέσιμου εύρους ζώνης της κινητής τηλεφωνίας και τη συνολική μείωση της απόδοσης του συστήματος.

Η εμπειρία αυτή ανέδειξε τις ακόλουθες προκλήσεις που χρήζουν αντιμετώπισης:

- Υψηλή καθυστέρηση.
- Αναξιόπιστες συνδέσεις.
- Περιορισμένο εύρος ζώνης.
- Αποδοτικότητα και σχέση κόστους – κλιμάκωσης.

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη, η σχεδίαση και η ανάπτυξη ενός συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής για την κάλυψη και προβολή ενός αγώνα αυτοκινήτων. Η μελέτη εστιάζει κυρίως στις τεχνολογίες “behind the scenes” και διερευνά βασικά στοιχεία όπως το υλικό (hardware) και το λογισμικό (software) που χρησιμοποιούνται σήμερα για την δημιουργία συστημάτων live streaming. Γίνεται περιγραφή σημαντικών στοιχείων ενός τέτοιου συστήματος, από τις κάμερες μέχρι και τα πρωτόκολλα μετάδοσης που χρησιμοποιούνται για την επικοινωνία. Δίνεται έμφαση στην δημιουργία ενός λειτουργικού και ταυτόχρονα αποτελεσματικού συστήματος χαμηλού κόστους, χαμηλής ενεργειακής κατανάλωσης και χαμηλής καθυστέρησης. Η μελέτη περίπτωσης επικεντρώνεται στις προκλήσεις και τις απαιτήσεις μιας ζωντανής ροής βίντεο για την προβολή ενός αγώνα αυτοκινήτων σε εξωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας εφήμερες υποδομές.

1.2 Δομή Εργασίας

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, στο δεύτερο κεφάλαιο αυτής της εργασίας πραγματοποιείται μια σύντομη επισκόπηση του συστήματος λειτουργίας. Συγκεκριμένα, αναλύονται οι λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις του συστήματος για να μπορέσει αυτό να ανταποκριθεί αποτελεσματικά στις ανάγκες της εκδήλωσης. Στην συνέχεια,

παρουσιάζεται μια γενική “εικόνα” της αρχιτεκτονικής που ακολουθήθηκε και αναλύεται βήμα-βήμα η δομή του, ενώ ακόμη, συζητείται η περιγραφή του τρόπου λειτουργίας συνολικά του συστήματος, με βάση τις υπηρεσίες που αυτό πρέπει να παρέχει. Τέλος, παρουσιάζονται σχετικές εργασίες από άλλους ερευνητές που προσέγγισαν τμήματα της συγκεκριμένης υλοποίησης και γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της δικής τους προσέγγισης και της υλοποίησης του προτεινόμενου συστήματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται η ανάπτυξη του προτεινόμενου μοντέλου. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η υποδομή του συστήματος, δηλαδή ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του, αλλά και τα λογισμικά που αξιοποιήθηκαν για την ικανοποίηση των λειτουργικών του αναγκών. Δίνεται έμφαση στις τεχνολογίες που μελετήθηκαν, όπως τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, οι κωδικοποιήσεις και οι πλατφόρμες διαχείρισης και αναπαραγωγής βίντεο. Ακόμη, παρουσιάζεται αναλυτικά ο σχεδιασμός και η λειτουργία του συστήματος.

Το εγχείρημα της υλοποίησης ολοκληρωμένων συστημάτων μετάδοσης ζωντανής ροής, ενέχει πολλές προκλήσεις. Έτσι, στο τέταρτο κεφάλαιο επισημαίνεται αναλυτικά ο τρόπος υλοποίησης του συγκεκριμένου συστήματος ενώ παράλληλα αξιολογείται η απόδοσή του, τόσο σε πειραματικές και δοκιμαστικές μετρήσεις, όσο και σε πραγματικές συνθήκες κατά την διάρκεια της ζωντανής μετάδοσης του αγώνα. Ακολουθούν οι περιορισμοί που συνάντησε το σύστημα κατά την λειτουργία του, ενώ ακόμη παρουσιάζονται και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εξέλιξη. Στο πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Με την πάροδο των χρόνων, οι τεχνολογίες ροής (streaming technologies) βελτιώνονται όλο και περισσότερο, όμως ο βασικός κορμός παραμένει ίδιος και περιλαμβάνει την μετάδοση βίντεο μέσω του διαδικτύου επιτρέποντας στην άλλη πλευρά την αναπαραγωγή του [6]. Οι εξελίξεις έγκειται στον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιείται η λήψη του βίντεο από κάποια συσκευή και την επεξεργασία που επιδέχονται τα δεδομένα στα διάφορα στάδια κατά την μεταφορά τους από άκρο σε άκρο, μέχρι και την προβολή τους στον τελικό αποδέκτη.

Παραδοσιακά, ένα σύστημα μετάδοσης ζωντανής ροής αξιοποιεί τα διαθέσιμα δίκτυα 4G, 5G και WiFi για να αποκτήσει πρόσβαση στο διαδίκτυο. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις σε απομακρυσμένες περιοχές, εκτός αστικού ιστού, όπου οι υπηρεσίες δικτύου που αναφέρθηκαν προηγουμένως δεν είναι διαθέσιμες ή δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών ενός τέτοιου συστήματος. Αυτό οφείλεται στην πολύπλοκη δημιουργία και συντήρηση των δικτύων που είναι συνήθως και κοστοβόρα. Φυσικά ή τεχνητά εμπόδια περιορίζουν τις πιθανότητες ανάπτυξης των δικτύων αυτών σε αραιοκατοικημένες περιοχές, όπου συνήθως επιλέγονται παλαιότερες και λιγότερο αποτελεσματικές τεχνολογίες [7]. Έτσι, είναι σημαντικό να βρεθεί ένας εναλλακτικός τρόπος προσέγγισης του ζητήματος. Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζεται μια συνολική επισκόπηση ενός ολοκληρωμένου, χαμηλού κόστους και ενεργειακά αποδοτικού συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής δεδομένων, ικανό να λειτουργεί σε εξωτερικό περιβάλλον μέσω εφήμερων υποδομών. Ταυτόχρονα, το προτεινόμενο σύστημα διαθέτει την ικανότητα μετάδοσης και προβολής σε πραγματικό χρόνο.

Η υλοποίηση του ολοκληρωμένου συστήματος μετάδοσης live streaming προήλθε ύστερα από εκτενή μελέτη των υλικών και των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν, και τον λεπτομερή σχεδιασμό των συνδέσεων μεταξύ τους, με βάση τους περιορισμούς που τέθηκαν. Το κεφάλαιο αυτό, εστιάζει στις τεχνολογίες “behind the scenes” που χρησιμοποιούνται για τη συγκεκριμένη σύνθεση, όπως είναι για παράδειγμα η χρήση αναλογικών καμερών, η εφαρμογή μικροκυματικών ζεύξεων, και η αξιοποίηση δορυφορικών επικοινωνιών. Βασική επιδίωξη αποτελεί, η παροχή ενός συστήματος χαμηλού κόστους, χαμηλής καθυστέρησης και χαμηλής ενεργειακής απόδοσης.

Στα ακόλουθα υποκεφάλαια πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην ανάλυση των λειτουργικών και μη λειτουργικών απαιτήσεων του συστήματος, στα στοιχεία που συνθέτουν την βασική δομή και αρχιτεκτονική του, καθώς επίσης και μια ολοκληρωμένη περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων του. Ακόμη, παρουσιάζονται εργασίες από ερευνητές που προσέγγισαν προηγουμένως το θέμα και αναφέρονται οι επιμέρους διαφοροποιήσεις.

2.1 Ανάλυση Απαιτήσεων

Το πρώτο και σημαντικότερο βήμα για τον σχεδιασμό και την ανάπτυξη οποιουδήποτε συστήματος, αποτελεί η ανάλυση των απαιτήσεων. Πιο συγκεκριμένα, η απόδοση και η

αξιοπιστία ενός συστήματος, αποτελούν δυο θεμελιώδη χαρακτηριστικά που επηρεάζονται άμεσα από τον σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής ύστερα από μελέτη και κατανόηση των λειτουργικών και μη λειτουργικών αναγκών που προκύπτουν [8]. Στην προκειμένη περίπτωση, η δημιουργία συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής για την προβολή αγώνα αυτοκινήτων με την χρήση αναλογικών καμερών, γίνεται με γνώμονα την αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος, την ποιοτική μετάδοση του σήματος και την δυνατότητα ζωντανής προβολής με ελάχιστες καθυστερήσεις και μηδενικές απώλειες σήματος στους θεατές. Στη συνέχεια περιγράφονται οι απαιτήσεις του συστήματος οι οποίες διακρίνονται σε δυο βασικές κατηγορίες [9]:

- Λειτουργικές, είναι αυτές που σχετίζονται άμεσα με τις δυνατότητες και τις υπηρεσίες του συστήματος,
- Μη λειτουργικές, είναι αυτές που περιλαμβάνουν θέματα όπως η απόδοση, η αξιοπιστία και ο χρόνος απόκρισης.

Λειτουργικές Απαιτήσεις [10]:

- 1) *Δυνατότητα παρακολούθησης βίντεο σε πραγματικό χρόνο:* Η παρακολούθηση βίντεο σε πραγματικό χρόνο είναι μια ιδιαίτερα σημαντική δυνατότητα που μπορεί να προσφέρει ένα τέτοιο σύστημα, καθώς έχει μεγάλη απήχηση από το κοινό, δίνοντας την αίσθηση της αμεσότητας και της αυθεντικότητας σε αυτούς που παρακολουθούν. Ακόμη, μπορεί να φανεί χρήσιμη στην λήψη κρίσιμων αποφάσεων από την διοίκηση του αγώνα. Χωρίς αυτή την δυνατότητα, η συνολική εμπειρία των χρηστών θα επηρεάζονταν αρνητικά.
- 2) *Υποστήριξη πολλαπλών καμερών:* Ένα σύστημα που είναι διαθέσιμο να υποστηρίξει πολλαπλές κάμερες διασφαλίζει λήψεις από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Με τον τρόπο αυτό, βελτιώνεται η κάλυψη του χώρου που διαδραματίζεται η εκδήλωση και παράλληλα επιτρέπει στον θεατή να «βρίσκεται» ταυτόχρονα σε πολλές και διαφορετικές τοποθεσίες.
- 3) *Απρόσκοπτη λειτουργία δικτύου:* Για την διασφάλιση συνεχόμενης ροής δεδομένων και την αξιόπιστη μετάδοσή τους, είναι απαραίτητη η επιλογή κατάλληλου τρόπου μετάδοσης. Η χρήση *μικροκυματικών* ζεύξεων ενέχει πολλές προκλήσεις και η επιλογή κατάλληλης συχνότητας με βάση τις νόμιμες προϋποθέσεις για ασύρματη μετάδοση βίντεο είναι μια από αυτές. Ωστόσο, μπορεί να ξεκλειδώσει δυνατότητες απομακρυσμένης αποστολής και λήψης σήματος, χωρίς την ανάγκη καλωδίωσης και άλλων φυσικών περιορισμών.
- 4) *Πρόσβαση στις υπηρεσίες Cloud:* Η χρήση κατάλληλου λογισμικού για την διαχείριση και κωδικοποίηση των λαμβανόμενων δεδομένων και η σωστή διαμόρφωση πλατφόρμας στο νέφος (Cloud) για την επεξεργασία αυτών, αποτελούν εξίσου σημαντικά χαρακτηριστικά για την ορθή και ασφαλή λειτουργία ενός συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής.

- 5) *Δυνατότητα αναπαραγωγής βίντεο στον τελικό χρήστη*: Σημαντικό βήμα για την εύκολη και άμεσα προσβάσιμη προβολή του βίντεο στον τελικό χρήστη μέσω του διαδικτύου, αποτελεί η χρήση κατάλληλης πλατφόρμας για την αναπαραγωγή βίντεο (Video Playback). Η δυνατότητα αναπαραγωγής βίντεο μπορεί να βελτιώσει την συνολική εμπειρία του χρήστη, ενώ παράλληλα εξασφαλίζει και συμβατότητα με πολλαπλά format.

Μη Λειτουργικές Απαιτήσεις [11]:

- 1) *Ανάπτυξη και υποστήριξη εφήμερης υποδομής για εξωτερικό περιβάλλον – Φορητότητα υποδομής*: Σημαντική προϋπόθεση για εξωτερικές δραστηριότητες όπως οι αγώνες αυτοκινήτων είναι οι κινητές εγκαταστάσεις. Συνεπώς, η ύπαρξη εφήμερων υποδομών για εξωτερικά περιβάλλοντα που θα λειτουργούν σε προσωρινές και ποικίλες τοποθεσίες χωρίς σταθερές υποδομές είναι αναγκαίες.
- 2) *Ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες*: Ένας ακόμη παράγοντας που λαμβάνεται υπόψιν κατά την μελέτη και τον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων είναι η ανθεκτικότητα στις καιρικές συνθήκες. Είναι απαραίτητη η διασφάλιση της σωστής και αξιόπιστης λειτουργίας του συστήματος ακόμη και σε εξωτερικά περιβάλλοντα με δυσμενείς καιρικές συνθήκες όπως οι υψηλές θερμοκρασίες, η υγρασία και η βροχή.
- 3) *Διατήρηση χαμηλής καθυστέρησης & Συμμόρφωση κατώτατου ορίου εύρους ζώνης*: Η απαίτηση για διατήρηση χαμηλής καθυστέρησης (latency) και η συμμόρφωση με ένα κατώτατο όριο (threshold) εύρους ζώνης, αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για την ομαλή μετάδοση του σήματος και την ορθή λειτουργία ενός συστήματος. Πιο συγκεκριμένα, η χαμηλή καθυστέρηση αποτελεί στοιχείο ζωτικής σημασίας ειδικά για περιπτώσεις όπως η ζωντανή μετάδοση, αφού η οποιαδήποτε καθυστέρηση μπορεί να επηρεάσει αρνητικά την παρακολούθηση. Από την άλλη πλευρά πρέπει να διασφαλιστεί πως υπάρχει ένα κατώτατο όριο εύρους ζώνης το οποίο καθορίζει κατά πόσο είναι δυνατή η μετάδοση χωρίς την απώλεια ή απόρριψη(drop) πακέτων.
- 4) *Μέγιστη απόσταση εκπομπής & Μέγιστη επιτρεπτή καθυστέρηση*: Για μια επιτυχημένη ζεύξη μεταξύ των σταθμών εκπομπής και λήψης πρέπει να ληφθούν υπόψιν παράγοντες όπως η μέγιστη δυνατή απόσταση εκπομπής (συνήθως σε km), η οποία ταυτόχρονα θα τηρεί και τα όρια της μέγιστης επιτρεπόμενης καθυστέρησης κατά τη μετάδοση των δεδομένων. Στις μικροκυματικές ζεύξεις, αυτό συνήθως επιτυγχάνεται μέσα από την χρήση συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (Geographic Information Systems, GIS) για την εύρεση οπτικής επαφής (Line Of Sight, LOS), μεταξύ του σταθμού εκπομπής και του σταθμού λήψης. Με άλλα λόγια, η μέγιστη απόσταση μετάδοσης ουσιαστικά, καθορίζει τα όρια του συστήματος όσον αφορά τη γεωγραφική κάλυψη. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό, τα όρια αυτά να είναι γνωστά για την σωστή τοποθέτηση του εξοπλισμού, την αποφυγή παρεμβολών και την διασφάλιση της αδιάλειπτης μετάδοσης των δεδομένων. Από την άλλη πλευρά, η μέγιστη

επιτρεπτή καθυστέρηση πρέπει να διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα για την ορθή παροχή ποιότητας υπηρεσιών.

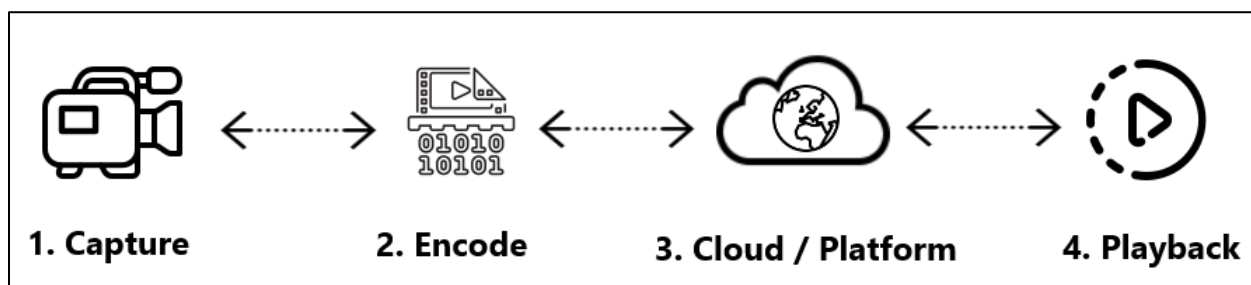
- 5) *Δυνατότητα κλιμάκωσης*: Σε κάθε σύστημα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης και κλιμάκωσης, ώστε στο μέλλον να εξασφαλίζεται η ευελιξία του συστήματος, επιτρέποντας παράλληλα την προσθήκη ή αφαίρεση συσκευών δίχως να απαιτείται εκ νέου ο επανασχεδιασμός του. Η κλιμάκωση ωστόσο περιλαμβάνει και το κοινό που παρακολουθεί το live. Σε περίπτωση μεγάλου αριθμού αιτήσεων, θα πρέπει η Cloud-Based πλατφόρμα διαχείρισης του live να μπορεί να εξυπηρετήσει το κοινό με το μικρότερο δυνατό κόστος, αποφεύγοντας επιπλέον χρεώσεις.
- 6) *Αξιοπιστία μετάδοσης σήματος & Ενεργειακή αποδοτικότητα συστήματος*: Η αξιοπιστία της μετάδοσης σήματος και η ενεργειακή αποδοτικότητα του συστήματος αποτελούν θεμελιώδεις μεταβλητές για την επίτευξη μιας σταθερής, οικονομικής και επιτυχημένης σύνθεσης. Συγκεκριμένα, για την ομαλή λειτουργία του συστήματος απαιτείται αξιοπιστία κατά την μετάδοση των δεδομένων, καθώς οποιαδήποτε απώλεια ή αλλοίωση μπορεί να οδηγήσει σε αποτυχία του συστήματος. Ακόμη, η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να εξασφαλίσει την μακροχρόνια λειτουργία του συστήματος χρησιμοποιώντας περιορισμένους πόρους, καθιστώντας την οικονομικά αποδοτική και βιώσιμη.
- 7) *Διαλειτουργικότητα*: Η επιλογή κατάλληλων πρωτοκόλλων επιτρέπει την ασφαλή και σταθερή μετάδοση των δεδομένων από το σημείο λήψης μέχρι τον τελικό προορισμό, περιορίζοντας τον κίνδυνο απώλειας δεδομένων ή παρεμβολών. Η διαλειτουργικότητα εξασφαλίζει την ομαλή συνεργασία των στοιχείων του συστήματος, διασφαλίζοντας την συνεχή και χωρίς διακοπές μετάδοση.
- 8) *Ασφάλεια*: Τέλος, η διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων και η συνολική προστασία του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής, είτε από σκόπιμη πράξη (π.χ. hacking), είτε από τυχαίο γεγονός (π.χ. αστοχία υλικού) είναι ζωτικής σημασίας. Η εφαρμογή μηχανισμών προστασίας είναι απαραίτητο βήμα για την αποφυγή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης και την διατήρηση της ακεραιότητας των δεδομένων κατά την μεταφορά τους στο διαδίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων πρωτοκόλλων, λογισμικών και καναλιών επικοινωνίας.

2.2 Δομή - Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική ενός συστήματος παίζει καθοριστικό ρόλο στην ορθή και αποτελεσματική λειτουργία του. Ουσιαστικά, η αρχιτεκτονική περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο τα επιμέρους στοιχεία του συστήματος συνεργάζονται μεταξύ τους για να επιφέρουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ο καθορισμός της οργάνωσης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ του υλικού και του

λογισμικού μιας τέτοιας σύνθεσης, είναι από τα κυριότερα βήματα κατά τον σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής ενός συστήματος.

Με βάση τις απαιτήσεις που αναφέρθηκαν προηγουμένως, στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 2-1), παρουσιάζεται το διάγραμμα υλοποίησης του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής της εργασίας. Συγκεκριμένα, διακρίνονται τέσσερα βασικά στάδια, τα στοιχεία των οποίων αναφέρονται αναλυτικά σε επόμενη ενότητα. Η γενική φιλοσοφία πίσω από αυτό το σχήμα είναι α) η καταγραφή βίντεο μέσω καμερών, β) η κωδικοποίηση των δεδομένων και η μεταφορά στο cloud, γ) η επεξεργασία των δεδομένων σε μια cloud-based πλατφόρμα και δ) τελικά, η προβολή του βίντεο στον θεατή. Ουσιαστικά, στην εικόνα αποτυπώνεται η ροή των δεδομένων που ακολουθείται από το συγκεκριμένο σύστημα [6].



Εικόνα 2-1: Αρχιτεκτονική Συστήματος Live Streaming¹.

1. *Λήψη (Capture)*: Το πρώτο βήμα για να μπορέσει να λειτουργήσει σωστά ένα σύστημα μετάδοσης live streaming, είναι η λήψη βίντεο όπου θα προβάλλεται στους τελικούς χρήστες. Αυτό επιτυγχάνεται, μέσα από την χρήση πολλαπλών αναλογικών καμερών που τοποθετούνται σε αρκετά σημεία για κάλυψη διαφορετικών οπτικών γωνιών. Στη συνέχεια, η εικόνα αυτή μεταδίδεται μέσω μικροκυματικών ζεύξεων μέχρι τον σταθμό βάσης, όπου ξεκινάει το δεύτερο βήμα, η κωδικοποίηση.
2. *Κωδικοποίηση (Encode)*: Στον σταθμό βάσης βρίσκεται ένας κεντρικός υπολογιστής, όπου με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού υποβάλλει σε κωδικοποίηση το λαμβανόμενο σήμα του πρώτου βήματος. Η διαδικασία της κωδικοποίησης πραγματοποιείται για να βελτιστοποιηθεί η μετάδοση του σήματος μειώνοντας το μέγεθος των δεδομένων που θα σταλούν στο διαδίκτυο, ενώ παράλληλα το βίντεο διατηρεί ακέραια την ποιότητα του.
3. *Πλατφόρμα Cloud*: Το κωδικοποιημένο πλέον σήμα μεταδίδεται μέχρι μια Cloud-based πλατφόρμα, όπου αποθηκεύεται, επεξεργάζεται και ετοιμάζεται για αναπαραγωγή στον online video player που προσφέρει η ίδια.
4. *Αναπαραγωγή (Playback)*: Τελευταίο βήμα αποτελεί η αναπαραγωγή του βίντεο μέσω του κατάλληλα διαμορφωμένου video player που προσφέρει η πλατφόρμα διαχείρισης του live

¹ Τα εικονίδια είναι από <https://icons8.com>

streaming. Το κομμάτι αυτό είναι αρκετά σημαντικό για την παρακολούθηση της ζωντανής μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο.

Η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος έγινε με βάση την αποδοτική διαχείριση των δεδομένων και την επεκτασιμότητα, εξασφαλίζοντας παράλληλα χαμηλή καθυστέρηση και υψηλή αξιοπιστία κατά την μετάδοση βίντεο.

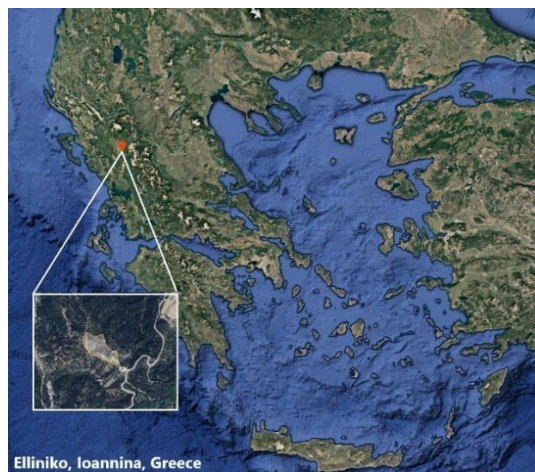
2.3 Λειτουργία Συστήματος

Ένα σύστημα για να θεωρηθεί πετυχημένο θα πρέπει να πληροί συγκεκριμένα κριτήρια τα οποία καθορίζονται από τους στόχους, τις προσδοκίες και τις απαιτήσεις των χρηστών. Τα κριτήρια αυτά συνήθως περιλαμβάνουν την αποτελεσματική και αποδοτική λειτουργία του συστήματος, την φιλικότητα προς τον χρήστη και την συμμόρφωση με τους υπάρχοντες κανονισμούς, ικανοποιώντας παράλληλα τις λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις που έχουν οριστεί προηγουμένως. Συνεπώς, ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος αποτελεί ίσως τον κρισιμότερο παράγοντα όσον αφορά την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί, σχετικά με την αποτελεσματική μετάδοση βίντεο σε πραγματικό χρόνο.



Εικόνα 2-2: Αγωνιστική διαδρομή.

Η μελέτη επικεντρώνεται σε έναν αγώνα αυτοκινήτων γνωστό ως “4x4 Mega Four”. Ο αγώνας αποτελείται από δυο πίστες (Εικόνα 2-2) με τους διαγωνιζόμενους να καλούνται να τις διασχίσουν σε μικρό χρονικό διάστημα, με σκοπό ο ταχύτερος να θεωρηθεί νικητής. Η υλοποίηση και οι πειραματικές μετρήσεις έλαβαν τόπο στο χωριό Ελληνικό Ιωαννίνων στις 21-22 Σεπτεμβρίου 2024, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2-3). Ζητούμενο από τους διοργανωτές του αγώνα ήταν η προβολή του σε κάποια πλατφόρμα που θα εξασφάλιζε χαμηλή καθυστέρηση και αξιοπιστία, ώστε να προβάλλεται σε μεγάλο κοινό και ταυτόχρονα να χρησιμοποιείται για την ταχύτατη λήψη αποφάσεων από την διοίκηση του αγώνα.



Εικόνα 2-3: Τοποθεσία διεξαγωγής αγώνα.

Λαμβάνοντας υπόψιν, τόσο τις απαιτήσεις των χρηστών, όσο και του ίδιου του συστήματος, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο του οποίου βασικός στόχος ήταν η μετάδοση ζωντανής ροής βίντεο σε πολλαπλούς αποδέκτες με χαμηλή καθυστέρηση. Δεδομένου ότι το σύστημα αυτό λειτουργούσε σε εξωτερικό περιβάλλον, ήταν απαραίτητη η δημιουργία εφήμερης αλλά αξιόπιστης και αποτελεσματικής υποδομής. Η συνεργασία των επιμέρους στοιχείων του συστήματος ήταν σημαντική με σκοπό να διασφαλίσουν την ομαλή και συνεχή ροή δεδομένων από άκρο σε άκρο επιτρέποντας ασφαλή και αξιόπιστη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο.

Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα έπρεπε να καταγράφει ζωντανά μέσω καμερών την εικόνα και με την βοήθεια συσκευών μικροκυματικών ζεύξεων (ζεύγος πομπού-δέκτη) που λειτουργούσαν στην ίδια συχνότητα, έπρεπε να μεταφέρει τα δεδομένα μέχρι τον σταθμό βάσης. Εκεί, υπήρχε ένας κεντρικός Η/Υ που με την βοήθεια κατάλληλου λογισμικού κωδικοποιούσε το λαμβανόμενο σήμα, το οποίο στην συνέχεια έστελνε σε μια Cloud-Based πλατφόρμα χρησιμοποιώντας το αξιόπιστο πρωτόκολλο SRT. Η σύνδεση του υπολογιστή με το διαδίκτυο γινόταν μέσω δορυφορικής επικοινωνίας, χρησιμοποιώντας προϊόν της εταιρείας SpaceX. Στην πλατφόρμα, τα δεδομένα επιδέχονταν μια σειρά από επεξεργασίες, με στόχο την μετακωδικοποίησή τους και την εύκολη προβολή τους, σε άλλες συσκευές. Στο σημείο αυτό, γινόταν αλλαγή του πρωτοκόλλου επικοινωνίας μεταξύ της πλατφόρμας και του video player από το SRT στο WebRTC με σκοπό την ταχύτερη μεταφορά των δεδομένων. Έτσι, οι τελικοί χρήστες (Θεατές) είχαν την ικανότητα να αναπαράγουν την ζωντανή μετάδοση από την άνεση της προσωπικής τους συσκευής για την παρακολούθηση του αγώνα.

2.4 Σχετικές Εργασίες

Τα τελευταία χρόνια έχουν διεξαχθεί αρκετές μελέτες που διερευνούν την ανάπτυξη και εφαρμογή συστημάτων live streaming. Κάθε μελέτη στοχεύει σε διαφορετικές πτυχές των τεχνολογιών ζωντανής ροής όπως η υποδομή, το κόστος, η ενεργειακή αποδοτικότητα και η μετάδοση σε πραγματικό χρόνο.

Η Anna Haaraoja στην εργασία της με τίτλο “ Fundamentals of Streaming: How to Setup a Virtual Event System ”, παρέχει έναν αναλυτικό οδηγό για την δημιουργία και υποστήριξη μετάδοσης μιας εικονικής εκδήλωσης. Στοχεύει κυρίως στα βασικά τεχνικά στοιχεία όπως είναι ο εξοπλισμός και η τεχνική κατάρτιση που απαιτείται για την υποστήριξη μιας τέτοιας εκδήλωσης [12].

Μια ακόμη πολύ καλή εργασία είναι της Ida-Maria Tunturipuro με τίτλο “ Building a Low-Cost Streaming System: Streaming and Camera Operating System for Live Internet Productions ”. Η συγκεκριμένη εργασία αφορά την κατασκευή ενός συστήματος ζωντανής ροής χαμηλού κόστους για διαδικτυακές παραγωγές. Παρουσιάζει μια πιο θεωρητική προσέγγιση της μετάδοσης ζωντανής ροής, περιγράφοντας τα βήματα που οδηγούν στην δημιουργία ενός οικονομικά αποδοτικού και με υψηλή ποιότητα συστήματος μετάδοσης live streaming. Ακόμη, συγκρίνει τεχνικές πτυχές του συστήματος όπως τα πρωτόκολλα, κωδικοποιητές και πλατφόρμες μεταξύ τους [13].

Η εργασία “ Cloud Live Video Transfer ” του Ryan Babcock επικεντρώνεται στη δημιουργία μιας υποδομής που βασίζεται στο cloud, με σκοπό να επιτύχει επεκτάσιμη και αξιόπιστη μετάδοση ζωντανής ροής. Ταυτόχρονα, εξετάζει μεθόδους για την μεταφορά των βίντεο δεδομένων στο cloud, αντιμετωπίζοντας προκλήσεις όπως η υψηλή κίνηση δεδομένων και η χαμηλή καθυστέρηση [14].

Τέλος, η εργασία του Ahmed “ Live streaming for individuals and Businesses; Case study of E-sports as a game platform ”, ανέδειξε την τεχνική υποδομή που απαιτείται για την μετάδοση ζωντανής ροής και την κάλυψη εκδηλώσεων e-sports, διερευνώντας βασικά πρωτόκολλα επικοινωνίας και πλατφόρμες προβολής βίντεο [4].

Η συγκεκριμένη εργασία παρέχει έναν ολοκληρωμένο οδηγό για την δημιουργία και την λειτουργία ενός συστήματος live streaming που βασίζεται σε εφήμερες υποδομές για την υποστήριξη υπαίθριας εκδήλωσης (αγώνα αυτοκινήτων). Επικεντρώνεται στην δημιουργία ενός χαμηλού κόστους και ενεργειακά αποδοτικού συστήματος το οποίο χρησιμοποιεί αναλογικές κάμερες, μικροκυματικές ζεύξεις, δορυφορικό internet και μια cloud-based πλατφόρμα για επεξεργασία και προβολή των βίντεο δεδομένων στους τελικούς χρήστες με χαμηλή καθυστέρηση και εξαιρετική απόδοση. Διερευνά τόσο τα θεωρητικά, όσο και τα τεχνικά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να έχει ένα σύστημα live streaming και παρέχει ολοκληρωμένο οδηγό για την διαμόρφωση του συστήματος.

3 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Οι πιθανοί τρόποι με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί μια μετάδοση ζωντανής ροής ποικίλουν κάθε φορά, ανάλογα με τις απαιτήσεις, τον εξοπλισμό και τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται. Το κεφάλαιο αυτό, εξετάζει την ανάπτυξη του προτεινόμενου συστήματος, το οποίο μελετήθηκε, σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για μετάδοση βίντεο ζωντανής ροής από απομακρυσμένες τοποθεσίες συνδυάζοντας ποικίλες τεχνολογίες και χαμηλού (προσιτού) κόστους εξοπλισμό. Σκοπός είναι να αναδειχθεί στην πράξη η λειτουργικότητα, αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία του. Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος, επηρεάζεται άμεσα από τις συνδέσεις μεταξύ των στοιχείων του, την επίτευξη αξιόπιστων επικοινωνιών και τη χρήση κατάλληλης πλατφόρμας για επεξεργασία και προβολή του περιεχομένου σε πραγματικό χρόνο.

Ύστερα από τον καθορισμό των απαιτήσεων και την ανάλυση της αρχιτεκτονικής, που μελετήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, σε αυτό το κεφάλαιο, εξετάζονται τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του συστήματος. Συγκεκριμένα, γίνεται μια αναλυτική περιγραφή της υποδομής του συστήματος, δηλαδή το υλικό, το λογισμικό και τις τεχνολογίες που εφαρμόστηκαν. Η επιτυχημένη ανάπτυξη ενός οποιουδήποτε συστήματος, βασίζεται στην επιλογή κατάλληλου εξοπλισμού και στο συντονισμό των επιμέρους υποσυστημάτων, με στόχο την αδιάλειπτη μετάδοση βίντεο χαμηλής καθυστέρησης [13]. Η διαδικασία της ανάπτυξης περιλαμβάνει την διερεύνηση και επιλογή α) κατάλληλων υποδομών, β) διαθέσιμων τεχνολογιών και γ) απαραίτητων λογισμικών, που θα βοηθήσουν στην δημιουργία μιας αξιόπιστης σύνθεσης ικανοποιώντας παράλληλα όλες τις λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις που έχουν τεθεί.

3.1 Υποδομή

Η υποδομή του συστήματος, ουσιαστικά αφορά τον εξοπλισμό και συγκεκριμένα τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία της σύνθεσης του συστήματος live streaming. Το σημαντικότερο βήμα στην ζωντανή ροή είναι το περιεχόμενο που πρέπει να μεταδοθεί. Επομένως, ολόκληρο το σύστημα ξεκινάει από τις κάμερες που βρίσκονται στο πεδίο. Αφού πραγματοποιηθεί η λήψη του βίντεο, τότε αυτό θα πρέπει με κάποιο τρόπο να μεταφερθεί στον σταθμό βάσης που διαχειρίζεται την μετάδοση. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση ζεύγους πομπού-δέκτη μικροκυματικών ζεύξεων, αφού πρώτα το βίντεο έχει μετατραπεί σε ηλεκτρομαγνητικό σήμα για να πραγματοποιηθεί η μετάδοσή του.

Ο υπολογιστής που βρίσκεται στον σταθμό βάσης, μετατρέπει το λαμβανόμενο σήμα του δέκτη σε ψηφιακή μορφή, κατανοητή για εκείνον, με την χρήση κατάλληλων συσκευών. Έπειτα, τα δεδομένα μεταφέρονται κωδικοποιημένα πλέον μέσω διαδικτύου, προς την πλατφόρμα διαχείρισης της ζωντανής ροής, με την χρήση δορυφορικών επικοινωνιών, πριν την προβολή τους στους τελικούς χρήστες, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-1 που ακολουθεί.



Εικόνα 3-1: Απαραίτητα θήματα για την μετάδοση ζωντανής ροής.

3.1.1 Πηγές Βίντεο

A. Κάμερες προβολής πρώτου προσώπου (First Person View – FPV)

Η μετάδοση ζωντανής ροής ξεκινάει με την καταγραφή βίντεο, συνήθως με την χρήση κάμερας. Οι περισσότερες σύγχρονες κάμερες είναι ψηφιακές και μπορούν να καταγράψουν βίντεο σε πολύ υψηλή ανάλυση, ωστόσο αυτό δεν είναι πάντα απαραίτητο. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι χρήστες προκειμένου να μειώσουν το κόστος της υλοποίησης ενός συστήματος live streaming και να επενδύσουν σε κάτι άλλο όπως η ταχύτητα, επιλέγουν φθηνότερες κάμερες όπως είναι για παράδειγμα οι IP, οι Webcam ή ακόμη και τα κινητά τους τηλέφωνα [6]. Υπάρχει όμως και μια ακόμα επιλογή η οποία δεν είναι τόσο διαδεδομένη στο κομμάτι του Live Streaming και αφορά τις FPV κάμερες.

Ως FPV χαρακτηρίζεται η προβολή πρώτου προσώπου, δηλαδή η οπτική γωνία που θα είχε για παράδειγμα ο χειριστής ενός οχήματος, αν βρισκόταν ο ίδιος μέσα σε αυτό. Σε αντίθεση με το TPV (Third Person View), όπου η οπτική γωνία καλύπτει ολόκληρο το αντικείμενο. Το FPV αποτελεί τον κύριο τρόπο που χρησιμοποιούν τα περισσότερα μη επανδρωμένα αεροσκάφη για τον χειρισμό τους. Εκτός από τα μη επανδρωμένα αεροσκάφη, το FPV καθίσταται ιδανικό για εφαρμογές όπου απαιτείται ροή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Έτσι, βρίσκει εφαρμογή σε τομείς όπως η βιντεοσκοπήση διαφημίσεων, οι αγώνες drones, η γεωργία, ο εντοπισμός και η διάσωση ανθρώπων. Τα κύρια μέρη ενός συστήματος FPV είναι [15]:

- Οι FPV κάμερες
- Οι πομποί και οι δέκτες
- Οι κεραίες
- Οι μπαταρίες

Οι FPV κάμερες μπορούν να μεταδώσουν βίντεο είτε μέσω αναλογικής, είτε μέσω ψηφιακής μορφής (HD κάμερες). Τα ψηφιακά συστήματα συνήθως προσφέρουν υψηλότερη ποιότητα εικόνας με αυξημένη όμως καθυστέρηση (~150msec) και μεγαλύτερη οικονομική επιβάρυνση [16]. Αυτοί, ήταν και οι λόγοι που οδήγησαν στην επιλογή αναλογικού FPV

συστήματος παρέχοντας βίντεο χαμηλής καθυστέρησης (~10msec) με ικανοποιητική εικόνα. Οι FPV κάμερες διαθέτουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά που μπορούν να επηρεάσουν την απόδοσή τους [16]:

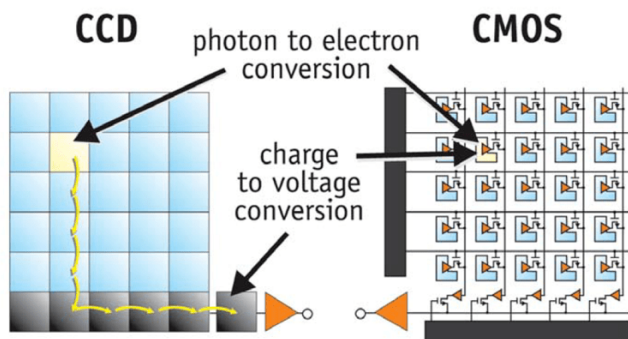
- **Μέγεθος κάμερας:** Το μέγεθος διακρίνεται σε 4 κατηγορίες: Full, Mini, Micro και Nano, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3-2).



Εικόνα 3-2: Μεγέθη FPV καμερών².

- **Αισθητήρες (CCD / CMOS):** Υπάρχουν δυο ειδών αισθητήρες στις FPV κάμερες: α) ο CCD (Charge-Coupled Device) και β) ο CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Κυρίως διαφέρουν στον τρόπο με τον οποίο συλλαμβάνεται η εικόνα από τον αισθητήρα. Οι FPV κάμερες μετατρέπουν τα σήματα φωτός σε ηλεκτρικά σήματα έτσι ώστε να μπορούν να τα μεταδώσουν στους πομπούς.

Σε έναν CCD αισθητήρα το σήμα μεταφέρεται κατά μήκος του τσιπ και διαβάζεται σε κάποια από τις γωνίες της συστοιχίας. Το ηλεκτρικό φορτίο μεταφέρεται από γραμμή σε γραμμή, μέχρι όλες οι γραμμές των pixel να ολοκληρώσουν την εξαγωγή. Αντίθετα ο αισθητήρας CMOS διαβάζει τα ηλεκτρικά σήματα σε κάθε pixel ξεχωριστά (Εικόνα 3-3).



CCDs move photogenerated charge from pixel to pixel and convert it to voltage at an output node. CMOS imagers convert charge to voltage inside each pixel.

Εικόνα 3-3: Αισθητήρες CCD & CMOS³.

² Πηγή: <https://www.quadjunkie.co.nz/product-category/fpv-gear/fpv-cameras/analog-cameras>

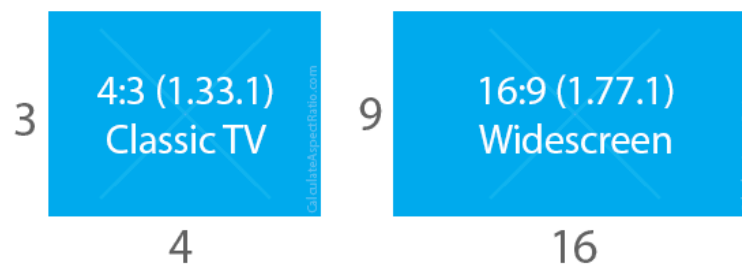
³ Πηγή: <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/05/ccd-vs-cmos-fpv.png>

Μια ακόμα μεγάλη διαφορά μεταξύ των δυο αισθητήρων είναι ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η λήψη της εικόνας. Ο αισθητήρας CCD χρησιμοποιεί Global shutter, δηλαδή καταγράφει στιγμιαία την εικόνα, σε αντίθεση με τον αισθητήρα CMOS όπου η καταγραφή της εικόνας γίνεται γραμμή προς γραμμή. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3-4).



Εικόνα 3-4: Rolling Shutter & Global Shutter effect⁴.

- **Αναλογίες διαστάσεων (Aspect Ratio):** Η αναλογία διαστάσεων αναφέρεται στο μέγεθος της εικόνας που φαίνεται σε μια οθόνη. Συνηθισμένες μορφές στις FPV κάμερες είναι οι 16x9 και 4x3.

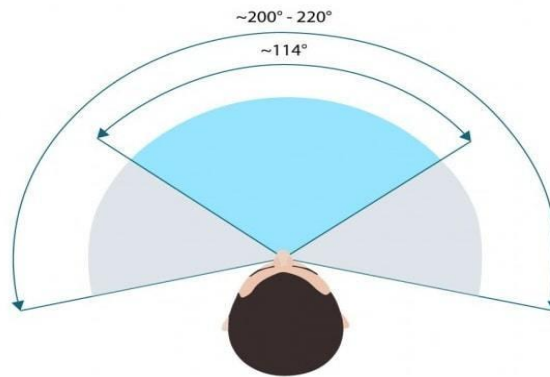


Εικόνα 3-5: Αναλογίες διαστάσεων⁵.

- **Καθυστέρηση (Latency):** Οι FPV κάμερες απαιτούν λίγο χρόνο για την λήψη και την επεξεργασία της εικόνας πριν την μεταδώσουν στον πομπό. Αυτός ο χρόνος είναι που χρειάζεται μια κάμερα για να μετατρέψει μια εικόνα σε ηλεκτρικό σήμα. Επιθυμητό, είναι η καθυστέρηση να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερη. Οι περισσότερες αναλογικές FPV κάμερες έχουν καθυστέρηση περίπου 4 με 10msec, σε αντίθεση με τις ψηφιακές που ξεπερνούν τα 100msec.
- **Πεδίο Όρασης:** Το πεδίο όρασης ή όπως είναι στα αγγλικά FOV (Field Of View), αναφέρεται στην περιοχή όπου η κάμερα μπορεί να επιβλέπει, δηλαδή να καταγράφει. Το μέγεθος του φακού (lens) της κάμερας καθορίζει αυτό το πεδίο. Όσο μικρότερος ο φακός, τόσο μεγαλύτερο το πεδίο όρασης.

⁴ Πηγή: <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/05/jello-effect-fpv-camera.png>

⁵ Πηγή: <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/05/calculate-aspect-ratio-camera-fpv.png>



Εικόνα 3-6: Οπτικό πεδίο οράσεως⁶.

- *Κωδικοποίηση Βίντεο (NTSC / PAL Encoding)*: Η κωδικοποίηση βίντεο αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο το βίντεο που λαμβάνεται από τη κάμερα μετατρέπεται σε μορφή κατάλληλη για μετάδοση. Υπάρχουν 2 κύριες μορφές τέτοιας κωδικοποίησης: NTSC και PAL, με διαφορές στην ανάλυση και στον ρυθμό καρέ:
 - *NTSC*: 720×480 30fps και υψηλότερους ρυθμούς
 - *PAL*: 720×576 25fps και μεγαλύτερη ανάλυση
- *Ανάλυση κάμερας (TVL)*: Το TVL (television lines) αναφέρεται στις γραμμές της οθόνης. Μια κάμερα με 1000TVL, μπορεί να καταγράψει 500 μαύρες και 500 λευκές γραμμές.
- *Wide Dynamic Ranging (WDR)*: Το WDR αναφέρεται στην ικανότητα της κάμερας να αποτυπώνει ορθά τα φωτεινά και τα σκοτεινά μέρη μιας εικόνας.



Εικόνα 3-7: Wide Dynamic Ranging⁷.

- *On Screen Display (OSD)*: Το OSD είναι η ικανότητα της κάμερας να παρέχει βασικές πληροφορίες στον χρήστη κατά την διάρκεια λειτουργίας της.

⁶ Πηγή: <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/05/fpv-lens-fov.jpg>

⁷ Πηγή: <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/05/Dynamic-Range-FPV-Camera.jpg>

B. IP 4G ψηφιακές κάμερες

Οι κάμερες 4G τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετά δημοφιλείς και αυτό οφείλεται στα πολλαπλά πλεονεκτήματα έναντι των Wi-Fi καμερών. Σημαντικό στοιχείο τους είναι η εύκολη και γρήγορη εγκατάσταση σε οποιοδήποτε μέρος υπάρχει υπηρεσία δικτύου 4G από κάποιον πάροχο. Οι κάμερες αυτές χρησιμοποιούν δίκτυο μέσα από την κάρτα SIM που τοποθετείται στο εσωτερικό τους, χωρίς να χρειάζεται μηνιαία συνδρομή όπως σε μια σταθερή γραμμή. Η επιλογή μιας κάμερας 4G απαλλάσσει από προβλήματα όπως η τροφοδοσία, καθώς οι περισσότερες διαθέτουν ηλιακό πάνελ για αυτόματη φόρτιση, με την διάρκεια λειτουργίας να αυξάνεται κατακόρυφα [17]. Ακόμη, έχουν την δυνατότητα να καταγράψουν βίντεο σε πολύ υψηλή ανάλυση όπου μερικές φορές φτάνει και τα 4k.

3.1.2 Μικροκυματικές Ζεύξεις

A. Πομπός (Video Transmitter - VTX)

Δεδομένου ότι η κάμερα FPV λαμβάνει συνεχόμενα βίντεο από τα αντικείμενα γύρω της, πρέπει τα δεδομένα να μεταδοθούν μέχρι τον σταθμό βάσης. Το συγκεκριμένο σύστημα χρησιμοποιεί μικροκυματικές ζεύξεις για να εγκαταστήσει επικοινωνία μεταξύ των επίγειων σταθμών, των σταθμών δηλαδή που υπάρχουν οι κάμερες και του σταθμού βάσης. Για να επιτευχθεί αυτή η επικοινωνία, σε κάθε σταθμό που υπάρχει κάμερα, τοποθετείται ένα πομπός. Πομπός ή Video Transmitter (VTX) χαρακτηρίζεται μια συσκευή, η οποία μπορεί να μεταδώσει δεδομένα βίντεο από μια κάμερα FPV σε έναν δέκτη. Ο κύριος και μοναδικός σκοπός ενός VTX είναι η μετάδοση βίντεο. Οι περισσότεροι αναλογικοί πομποί έχουν σχετικά μικρή ποιότητα ανάλυσης σε 640x480, σε αντίθεση με τους σύγχρονους ψηφιακούς που μπορούν να μεταδώσουν βίντεο ποιότητας 720p και 1080p [18].

Όπως οι κάμερες, έτσι και οι πομποί διαθέτουν ορισμένα χαρακτηριστικά που μπορούν να επηρεάσουν την ποιότητα μετάδοσης βίντεο και ουσιαστικά, να τους κατηγοριοποιήσουν σε λειτουργικούς ή μη λειτουργικούς:

- *Συχνότητα (f)*: Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά είναι η συχνότητα λειτουργίας. Υπάρχουν πομποί που μπορούν να εκπέμψουν σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, όπως για παράδειγμα τα 1.2GHz, τα 2.4GHz και τα 5.8GHz. Κάθε συχνότητα έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Οι χαμηλές συχνότητες μπορούν να διανύσουν μεγαλύτερες αποστάσεις και μπορούν να διεισδύσουν μέσα από αντικείμενα. Όσο όμως μεγαλώνει η συχνότητα, αυτή η διείσδυση αρχίζει να χάνεται σημαντικά. Μια ακόμη διαφορά είναι πως οι χαμηλές συχνότητες απαιτούν και μεγαλύτερες κεραίες συγκριτικά με τις υψηλότερες.
- *Ισχύς εξόδου*: Η ισχύς εξόδου αναφέρεται στην ενέργεια που εκπέμπεται προς το περιβάλλον, όσο μεγαλύτερη είναι τόσο περισσότερη θερμότητα παράγεται, άρα χρειάζεται καλύτερη ψύξη. Συνήθως οι πομποί VTX λειτουργούν με ισχύ εξόδου από τα 25mW και πάνω (π.χ. 200mW, 600mW κλπ.). Όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύς τόσο μεγαλύτερη είναι η

απόσταση στην οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η μετάδοση, χωρίς αυτό όμως να αποτελεί τον κανόνα. Υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την εμβέλεια μιας μετάδοσης, όπως για παράδειγμα το είδος των κεραιών που θα χρησιμοποιηθούν, η ευαισθησία τους και το περιβάλλον λειτουργίας. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η χρήση υψηλής ισχύος μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα παρεμβολών ή πολλαπλών μονοπατιών με αποτέλεσμα την εξασθένηση του σήματος. Συνήθως τα 25mW χρησιμοποιούνται για κοντινές αποστάσεις (short range), τα 200-600mW για εξωτερική χρήση και μεσαίες αποστάσεις, ενώ από 800mW και πάνω τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται για μεγάλες (long range) αποστάσεις [19].

- **Κανάλια:** Σε ένα αναλογικό σύστημα χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο πέντε ζώνες (A, B, C, E, F), με οκτώ κανάλια η κάθε μια. Αυτό δίνει περίπου 40 διαθέσιμα κανάλια για χρήση στην συχνότητα των 5.8GHz. Ωστόσο, ορισμένα από τα κανάλια επικαλύπτονται και έτσι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταυτόχρονα. Συνήθως, στους αγώνες με drone χρησιμοποιείται αρκετά η C band ή όπως αλλιώς ονομάζεται Race Band. Αυτό συμβαίνει επειδή υπάρχει μεγαλύτερος διαχωρισμός μεταξύ των καναλιών και συνεπώς λιγότερες παρεμβολές [19].

Freq Band	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	Bandwidth
A	5865	5845	5825	5805	8785	8765	8745	8725	25
B	5733	5752	5771	5790	5809	5828	5847	5866	19
C	5658	5695	5732	5769	5806	5843	5880	5917	37
D	5362	5399	5436	5473	5510	5547	5584	5621	37
E	5705	5685	5665	5645	5885	5905	5925	5945	20
F	5740	5760	5780	5800	5820	5840	5860	5880	20

Εικόνα 3-8: Διαθέσιμα κανάλια στην περιοχή των 5.8GHz.

Μπορεί η χρήση αναλογικού συστήματος να μην είναι τόσο ποιοτική συγκριτικά με το ψηφιακό, όσον αφορά την ανάλυση και την ύπαρξη θορύβων στο σήμα, όμως παραμένει ένα αρκετά αξιόπιστο, οικονομικό και με χαμηλή καθυστέρηση σύστημα [19]. Στην Ελλάδα με βάση τους περιορισμούς που ισχύουν για τα drone, η συχνότητα των 5.8GHz μπορεί να εκπέμπει μέχρι 25mW, ενώ στην συχνότητα των 2.4GHz η ισχύς εξόδου μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 100mW [20], [42], [43].

B. Δέκτης (Video Receiver - VRX)

Πλέον τα σήματα που εκπέμπουν οι πομποί μέσω ραδιοσυχνοτήτων, βρίσκονται ελεύθερα στον αέρα, επομένως για την λήψη τους θα χρησιμοποιηθούν αντίστοιχες συσκευές που μπορούν να τα συλλέξουν. Οι συσκευές αυτές ονομάζονται δέκτες. Δέκτης ή Video Receiver, VRX χαρακτηρίζεται μια συσκευή η οποία μπορεί να λαμβάνει τα σήματα RF που προέρχονται από έναν πομπό VTX. Η συχνότητα λειτουργίας ενός δέκτη πρέπει να ταιριάζει με αυτή του πομπού,

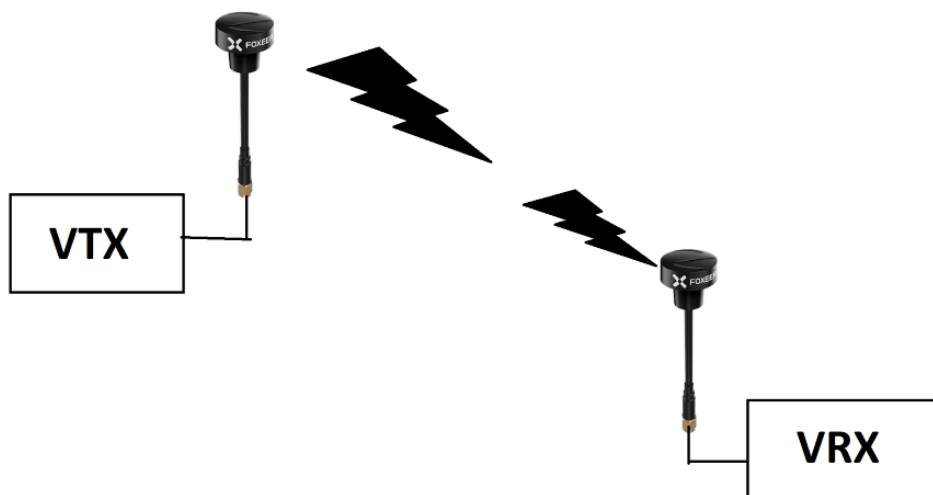
να είναι δηλαδή αντίστοιχες για να μπορούν να έχουν επικοινωνία μεταξύ τους. Επομένως, ο δέκτης (VRX) λειτουργεί σαν γέφυρα μεταξύ του πομπού και του σταθμού βάσης που διαχειρίζεται τη ροή [22].

Οι δέκτες όπως αντίστοιχα και οι πομποί μπορούν να λειτουργήσουν σε διάφορες συχνότητες όπως για παράδειγμα τα 1.2GHz, τα 2.4GHz και τα 5.8GHz, με καθεμία από αυτές τις συχνότητες να έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Συνήθως η επιλογή της συχνότητας καθορίζει την απόσταση της επικοινωνίας και τον ρυθμό μετάδοσης. Στη συγκεκριμένη υλοποίηση, η περιοχή λειτουργίας των δεκτών είναι τα 5.8GHz με περισσότερα από 40 κανάλια, τα οποία χωρίζονται σε ζώνες των 8 καναλιών το καθένα [21]. Σε αντίθεση με τον πομπό, ένας δέκτης επειδή δεν εκπέμπει ισχύ δεν αντιμετωπίζει προβλήματα υπερθέρμανσης κατά την λειτουργία του.

Γ. Κεραίες

Ένα σύστημα πομπού-δεκτή μπορεί να “απογειωθεί” ή να χάσει τις ικανότητές του εξαιτίας της κεραίας που χρησιμοποιεί. Η κεραία είναι από τα σημαντικότερα εξαρτήματα σε ένα σύστημα FPV και αυτό διότι έχει όλο το βάρος τού να επιτευχθεί η επικοινωνία μεταξύ πομπού και δέκτη. Συγκεκριμένα, η κεραία συλλέγει το σήμα από τον πομπό και στην συνέχεια το μεταδίδει ασύρματα μέχρι την κεραία του δέκτη για να ολοκληρωθεί ένας κύκλος επικοινωνίας του συστήματος. Ο χρόνος που συμβαίνει αυτό είναι τόσο μικρός (40msec) που ξεπερνά και το ανοιγοκλείσιμο των ματιών του ανθρώπου (150msec) [23].

Η κεραία που βρίσκεται στην πλευρά του πομπού λαμβάνει το ηλεκτρικό σήμα και το μετατρέπει σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, δηλαδή RF. Από την άλλη πλευρά, η κεραία του δέκτη ακολουθεί την αντίστροφη διαδικασία.



Εικόνα 3-9: Επικοινωνία κεραιών πομπού και δέκτη⁸.

⁸ Πηγή: Κεραίες πομπού – Δέκτη. <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/10/fpv-antenna-transmitter-receiver.png>

Οι κεραίες μπορούν να χωριστούν σε δυο βασικούς τύπους: την πανκατευθυντική και την κατευθυντική κεραία.

- Κατευθυντική: Μεταδίδει ραδιοκύματα σε μια πιο στενή δέσμη (φτάνει περίπου μέχρι 120°) [23].
- Πανκατευθυντική: Εκπέμπει σήμα προς όλες τις κατευθύνσεις (360°).



Omnidirectional Antenna



Bidirectional Antenna

Εικόνα 3-10: Omnidirectional & Bidirectional antennas⁹.

Δυο πολύ γνωστές κατηγορίες κατευθυντικών κεραιών είναι η ελικοειδής και η κεραία patch που φαίνονται στην Εικόνα 3-11. Συνήθως οι ελικοειδής χρησιμοποιούνται για μεγάλες αποστάσεις όπου υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη κατευθυντικότητα, σε αντίθεση με τις patch όπου η εμβέλεια τους είναι περίπου 120°.



Helical Antenna



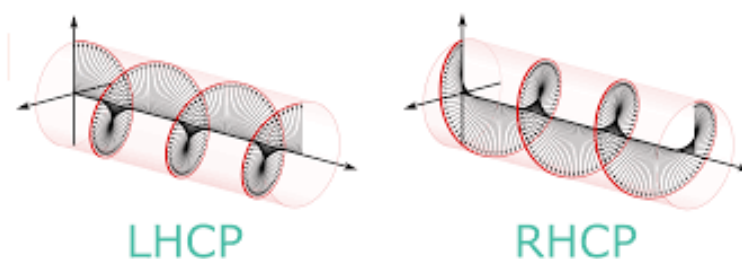
Patch Antenna

Εικόνα 3-11: Helical & Patch antennas¹⁰.

⁹ Πηγή: <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/10/fpv-antenna-types.jpg>

¹⁰ Πηγή: <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/10/types-of-antenna-fpv-sma-rp-sma.jpg>

Τα είδη πόλωσης χωρίζονται και αυτά σε δυο κατηγορίες, τη γραμμική και την κυκλική πόλωση. Η γραμμική πόλωση μεταδίδει κύματα μόνο σε ένα επίπεδο, είτε οριζόντια, είτε κάθετα. Έχει μεγάλη εμβέλεια καθώς εκπέμπει προς συγκεκριμένη κατεύθυνση. Ωστόσο, αν χαθεί ο προσανατολισμός μεταξύ των κεραιών, χάνεται και η επικοινωνία. Από την άλλη πλευρά οι κυκλικά πολωμένες κεραιές εκπέμπουν και προς τα δυο επίπεδα, συνεπώς αυτό οδηγεί σε μικρότερη εμβέλεια, εξαιτίας μικρών απωλειών ισχύος (Εικόνα 3-12).



Εικόνα 3-12: Κυκλική πόλωση κεραιών (Right-Hand Circular Polarization (RHCP) and Left-Hand Circular Polarization (LHCP))¹¹.

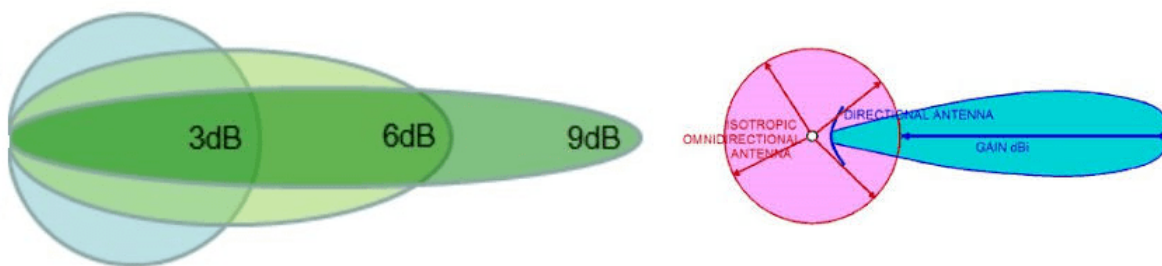
Γενικά ισχύει ο κανόνας της χρήσης πανκατευθυντικών κεραιών όταν είναι απαραίτητη η καλή ποιότητα για κοντινές αποστάσεις και της χρήσης κατευθυντικών κεραιών όταν απαιτείται μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις.

Από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά μιας κεραιάς είναι η συχνότητα λειτουργίας, το εύρος συχνοτήτων, δηλαδή, που έχει κατασκευαστεί και ρυθμίζεται για να λειτουργεί αποδοτικά. Συνήθως, τα συστήματα FPV χρησιμοποιούν κεραιές που λειτουργούν στα 2.4GHz και 5.8GHz. Κατά γενικό κανόνα οι πανκατευθυντικές κεραιές χρησιμοποιούνται στην περιοχή συχνοτήτων των 5.8GHz και δεν είναι διαθέσιμες για μικρότερες συχνότητες όπως 2.4GHz και 1.2GHz [14].

Το κέρδος της κεραιάς (gain) είναι ένας αριθμός που καθορίζει την ηλεκτρική απόδοση μιας κεραιάς, δηλαδή το πόσο καλά μπορεί να μετατρέπει το σήμα σε ραδιοκύματα προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Όσο μεγαλύτερο είναι το κέρδος σε μια κεραιά, τόσο πιο πολύ αυτή τείνει να είναι κατευθυντική. Για αυτό τον λόγο οι κατευθυντικές έχουν πάνω από 14db¹², ενώ οι πανκατευθυντικές δεν ξεπερνούν ποτέ τα 5db [23].

¹¹ Πηγή: <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/10/Antenna-polarization-fpv.png>

¹² Η τιμή db (decibels) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της τιμής της ισχύος του σήματος, του κέρδους της κεραιάς αλλά και της ισχύος εξόδου του πομπού. Μπορεί να βοηθήσει στην εκτίμηση της απόστασης της μέγιστης εμβέλειας. Μια βασική αρχή είναι πως αυξάνοντας την ισχύ εξόδου 4x (ή 6db), διπλασιάζεται η μέγιστη εμβέλεια.



Εικόνα 3-13: Κέρδος κεραίας¹³.

Ως γενικός κανόνας ισχύει πως όσο το σήμα ταξιδεύει στον αέρα και η απόσταση μεγαλώνει αυτό εξασθενεί και συνεπώς τα db μειώνονται. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ ισχύος (mW) και decibels.

Πίνακας 3-1: Συσχέτιση mW και db.

mW	dBm	mW	dBm
1	0	400	26.02
10	10	500	26.99
25	13.98	600	27.78
50	16.99	800	29.03
100	20	1000 (1W)	30
200	23.01	1500 (1.5W)	31.76
300	24.77	2000 (2W)	33.01

Ο Πίνακας 3-1, δείχνει πως η αύξηση κατά 3db διπλασιάζει την ισχύ του σήματος, αλλά για να διπλασιαστεί η εμβέλεια χρειάζεται αύξηση κατά 6db.

Η ευαισθησία του δέκτη καθορίζει την ελάχιστη ισχύ που μπορεί να ανιχνεύσει ο δέκτης. Όσο πιο ευαίσθητος είναι, τόσο μικρότερο είναι το σήμα που μπορεί να ανιχνεύσει και άρα η τιμή db θα είναι πιο αρνητική [24].

3.1.3 Σύνδεση στο διαδίκτυο

Μπορεί το διαδίκτυο να φαντάζει μια βασική ανάγκη στις σημερινές γενιές, όμως υπάρχουν ακόμα περιοχές εκτός της εμβέλειας των παραδοσιακών ενσύρματων ευρυζωνικών συνδέσεων, που δεν έχουν αξιόπιστη ή σταθερή πρόσβαση σε αυτό. Έτσι τα τελευταία χρόνια στον χώρο του Internet έχει κάνει την είσοδο της, η αμερικανική εταιρεία SpaceX με το γνωστό σε όλους πλέον μοντέλο Starlink. Η SpaceX διαθέτει δορυφόρους χαμηλής τροχιάς (LEO) τους οποίους χρησιμοποιεί για την παροχή διαδικτύου στους πελάτες της. Το δορυφορικό Internet υψηλής απόδοσης που προσφέρει αποτελεί ευκαιρία για όλους τους χρήστες που θέλουν μια γρήγορη, ασφαλή και αξιόπιστη σύνδεση σε όποιο μέρος και αν βρίσκονται. Έτσι, με την αγορά του εξοπλισμού (κεραίας και δρομολογητή) και μια μηνιαία συνδρομή, οι χρήστες μπορούν να

¹³ Πηγή: <https://dronenodes.com/wp-content/uploads/2019/10/antenna-gain.png>

απολαμβάνουν υψηλές ταχύτητες ίντερνετ, καθώς η επικοινωνία μεταξύ του δορυφόρου και της επίγειας ειδικής κεραίας επιτυγχάνεται μέσω την χρήση laser με ταχύτητες φωτός, δίχως να υπάρχει ανάγκη χρήσης επίγειων υποδομών όπως καλώδια χαλκού ή οπτικές ίνες [25] [59].

3.1.4 Προορισμός Ροής

Την υποδομή συμπληρώνουν τα υπόλοιπα στοιχεία που βρίσκονται στον σταθμό βάσης και βοηθούν στην ομαλή λειτουργία ολοκλήρου του συστήματος, Ξεκινώντας από τον Η/Υ ο οποίος έχει και την κεντρική διαχείριση του live streaming. Πάνω του συνδέονται και οι δέκτες 5.8GHz και τρέχει το λογισμικό OBS που θα αναφερθεί στην συνέχεια. Επειδή στο σύστημα ένας δέκτης διαθέτει μόνο αναλογική έξοδο γεγονός που εμποδίζει την αναγνώριση των δεδομένων από τον υπολογιστή, για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιείται μια συσκευή που καλείται video capture card. Ο ρόλος της στο σύστημα είναι η μετατροπή του αναλογικού σήματος που βγάζει σαν έξοδο ο δέκτης σε ψηφιακή μορφή, δηλαδή σε μορφή κατανοητή για τον υπολογιστή. Ακόμη, κατά την διάρκεια του αγώνα χρησιμοποιείται και ένα drone FPV για να παρέχει εναέρια πλάνα της πίστας.

3.2 Τεχνολογίες

Στο πλαίσιο της υλοποίησης ενός ολοκληρωμένου συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής, η επιλογή κατάλληλων τεχνολογιών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχημένη λειτουργία του συστήματος. Η χρήση οποιασδήποτε τεχνολογίας μπορεί να διαμορφώσει τον τρόπο μετάδοσης του βίντεο, τη διασύνδεση μεταξύ των χρηστών αλλά και την επεξεργασία που δέχονται τα δεδομένα. Σε αυτό το υποκεφάλαιο, ακολουθεί μια αναλυτική περιγραφή των πρωτοκόλλων επικοινωνίας που μελετήθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν και οι διαθέσιμες κωδικοποιήσεις βίντεο που εξετάστηκαν και υιοθετήθηκαν. Πραγματοποιείται σύγκριση διαφορετικών πλατφορμών και εργαλείων που οδηγούν στην επιλογή της Wowza και του αντίστοιχου video player για την αναπαραγωγή βίντεο που διαθέτει. Κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες διαθέτει διαφορετικά χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα, που μπορούν να επηρεάζουν την ποιότητα, την ταχύτητα και τη σταθερότητα της μετάδοσης, εξασφαλίζοντας χαμηλή καθυστέρηση.

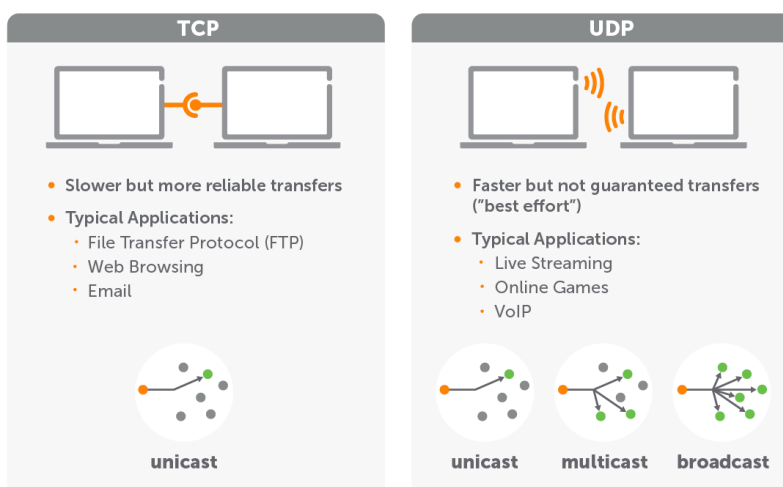
3.2.1 Πρωτόκολλα Επικοινωνίας

Ένα πρωτόκολλο είναι ουσιαστικά ένα σύνολο κανόνων που καθορίζουν τον τρόπο επικοινωνίας μεταξύ των συσκευών, αλλά και το πώς τα δεδομένα ταξιδεύουν από τη μια πλευρά στην άλλη. Η επιλογή ενός πρωτοκόλλου ροής είναι δύσκολη διαδικασία και εξαρτάται από την πληροφορία που πρέπει να μεταδοθεί. Συνήθως, χρησιμοποιείται η μέθοδος της διάσπασης των δεδομένων σε μικρότερα κομμάτια που ονομάζονται πακέτα πριν την μετάδοσή τους και στην συνέχεια ακολουθεί η επανασύνδεσή τους για την τελική προβολή του περιεχομένου στο άλλο άκρο. Ωστόσο, όταν πρόκειται για δεδομένα ζωντανής ροής υπάρχουν επιπλέον προκλήσεις: όπως η κλιμάκωση, η ασφάλεια, η αξιοπιστία και η ποιότητα. Απαραίτητη προϋπόθεση στη ζωντανή μετάδοση, αποτελεί η γρήγορη επανασύνδεση των πακέτων για αναπαραγωγή χωρίς καθυστερήσεις [26]. Κάθε φορά που κάποιος χρήστης παρακολουθεί ένα

βίντεο ζωντανής ροής, πίσω από την προβολή της εικόνας χρησιμοποιούνται πρωτόκολλα που βρίσκονται σε ένα από τα τρία υψηλότερα επίπεδα του μοντέλου OSI: Εφαρμογής, Παρουσίασης και Συνόδου [27].

Τα πρωτόκολλα ροής βίντεο (Video Streaming Protocols), βασίζουν τη λειτουργία τους σε ένα ή στον συνδυασμό των δυο πρωτοκόλλων TCP και UDP που βρίσκονται στο επίπεδο μεταφοράς [26]:

- *TCP (Transmission Control Protocol)*: Το TCP είναι ένα αξιόπιστο πρωτόκολλο, που έχει την ικανότητα χειρισμού διπλών πακέτων και πακέτων που βρίσκονται εκτός σειράς, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της τριπλής χειραψίας για να εγκαταστήσει σύνδεση μεταξύ των 2 άκρων.
- *UDP (User datagram Protocol)*: Το UDP χάνει την αξιοπιστία του κυρίως εστιάζοντας περισσότερο στην ταχύτητα καθιστώντας το εξαιρετική επιλογή για ζωντανή ροή. Για παράδειγμα το UDP δεν υποστηρίζει επαναμεταδόσεις χαμένων πακέτων ή έλεγχο σφαλμάτων.



Εικόνα 3-14: Πρωτόκολλα TCP και UDP¹⁴.

Η επιλογή ενός πρωτοκόλλου ροής ξεκινά με τον καθορισμό των απαιτήσεων της υλοποίησης. Η χαμηλή καθυστέρηση είναι απαραίτητη σε εφαρμογές όπου κρίνονται στιγμιαία αποτελέσματα, όπως για παράδειγμα η προβολή παιχνιδιών ή αγώνων. Ακόμη, η ασφάλεια πρέπει να αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένων χρηστών στο σύστημα. Ο μεγάλος και ακατέργαστος όγκος δεδομένων δεν αποτελεί καλή τακτική για μετάδοση βίντεο, καθώς καταναλώνεται μεγάλο εύρος ζώνης και οι συσκευές των τελικών χρηστών δεν μπορούν να το διαχειριστούν. Έτσι, είναι απαραίτητη η μετακωδικοποίηση των δεδομένων σε διαφορετικές μορφές και ρυθμούς μετάδοσης. Τελευταίοι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν για την επιλογή κατάλληλου πρωτοκόλλου ζωντανής ροής είναι η

¹⁴ Πηγή: <https://microchipdeveloper.com/tcpip:tcp-vs-udp>

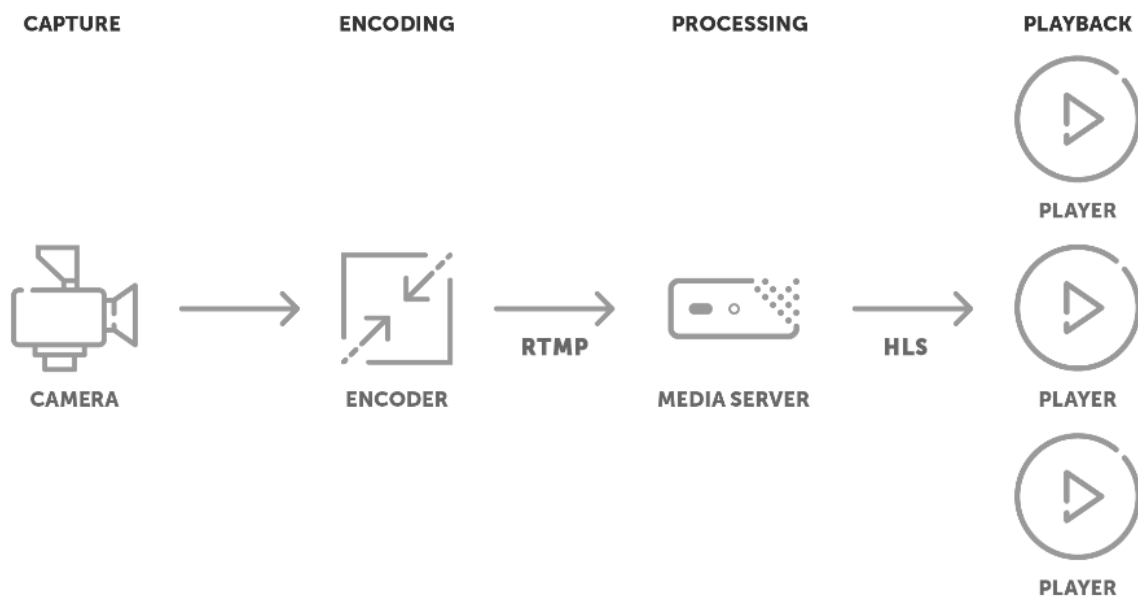
παροχή ποιότητας υπηρεσιών, η επεκτασιμότητα και η δυνατότητα αναπαραγωγής του βίντεο σε μια πληθώρα συσκευών που χρησιμοποιούνται από τους χρήστες.

Η παράδοση βίντεο μέσω διαδικτύου (online video delivery), χρησιμοποιεί πρωτόκολλα ροής και πρωτόκολλα που βασίζονται στο HTTP. Υπάρχουν διάφορα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται για την επίτευξη μετάδοσης ζωντανής ροής και ικανοποιούν τις παραπάνω προϋποθέσεις. Τα δημοφιλέστερα που χρησιμοποιούνται μέχρι και σήμερα είναι [28]:

- *Real-Time Messaging Protocol (RTMP)* [29]: Το RTMP είναι ένα πρωτόκολλο που δημιουργήθηκε από την Adobe πριν από περίπου δυο δεκαετίες και βασίζεται στο TCP. Εισάγει καθυστέρηση μικρότερη των 5 δευτερολέπτων και εξακολουθεί να χρησιμοποιείται για μετάδοση βίντεο σε δημοφιλείς πλατφόρμες όπως είναι για παράδειγμα το YouTube και το Twitch, παρόλο που η συντήρησή του έχει σταματήσει εδώ και χρόνια. Υποστηρίζει διάφορες κωδικοποιήσεις τόσο στον ήχο (AAC, AAC-LC, MP3, Opus), όσο και στο video (H.264, VP8, VP9). Κύριος ανταγωνιστής του RTMP έχει γίνει το SRT.
- *Secure Reliable Transport (SRT)* [30]: Το SRT αποτελεί μια εναλλακτική και βελτιωμένη έκδοση του RTMP που σχεδιάστηκε από την Haivision και προωθήθηκε από την SRT Alliance. Συγκεκριμένα, το SRT είναι ένα πολύ γρήγορο και ασφαλές πρωτόκολλο, με την μετάδοση των δεδομένων να μην ξεπερνά τα 3 δευτερόλεπτα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως είναι βασισμένο στο UDP, με τις ιδιότητες διόρθωσης σφαλμάτων του TCP. Είναι αρκετά δημοφιλές καθώς μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιαδήποτε κωδικοποίηση τόσο στον ήχο, όσο και στο βίντεο. Προσφέρει κρυπτογράφηση από άκρο-σε-άκρο με χρήση AES-128, που σημαίνει πως μόνο ένας εξουσιοδοτημένος χρήστης μπορεί να λάβει τη ροή. Το SRT λαμβάνει υπόψη προβλήματα που αφορούν την απώλεια πακέτων, την καθυστέρηση και τις μεταβολές στο εύρος ζώνης για να παρέχει καλύτερη ποιότητα ροής. Όλα τα παραπάνω καθιστούν το SRT ιδανικό για την υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος.
- *HTTP Live Streaming (HLS)* [31]: Το HLS είναι ένα πρωτόκολλο ζωντανής ροής βασισμένο στο HTTP, που αναπτύχθηκε από την Apple. Χρησιμοποιεί βίντεο πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης ώστε να εξυπηρετεί τις διαφορετικές συσκευές των χρηστών ανεξαρτήτως της σύνδεσής τους. Το HLS μοιράζει το βίντεο σε τμήματα των δέκα δευτερολέπτων, τα οποία αποθηκεύει σε έναν διακομιστή HTTP πριν παραδοθούν στον τελικό χρήστη. Η λειτουργία του πρωτοκόλλου περιορίζεται κυρίως στην μεταφορά των δεδομένων από τον διακομιστή πολυμέσων μέχρι και την πλατφόρμα αναπαραγωγής βίντεο. Μπορεί να υποστηρίξει την ρυθμιζόμενη ροή bitrate (adaptive bitrate), έχοντας όμως σημαντική καθυστέρηση που ανέρχεται περίπου στα 30 με 45 δευτερόλεπτα. Χρησιμοποιεί διάφορες κωδικοποιήσεις στον ήχο (AAC-LC, FLAC, HE-AAC + v1 & v2) και στο video (H.264 και H.265).
- *Web Real-Time Communication (WebRTC)* [32]: Το WebRTC θεωρείται η ταχύτερη διαθέσιμη τεχνολογία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για ingest όσο και για egress των δεδομένων και στα δυο άκρα, ενώ σε αντίθεση με πολλά πρωτόκολλα, βασίζεται και στο UDP και στο

TCP. Υπόσχεται μικρές καθυστερήσεις της τάξεως του <500msec και υποστηρίζει κωδικοποιήσεις ήχου (Opus, iSAC και iLBC) και video (H.264, VP8, VP9). Είναι browser based πρωτόκολλο που σημαίνει ότι όλες οι κωδικοποιήσεις και εργασίες γίνονται στον εξυπηρετητή δημιουργώντας peer-to-peer συνδέσεις. Σημαντικό μειονέκτημα είναι πως δεν έχει βελτιστοποιηθεί ακόμα για μεγάλης κλίμακας κοινό. Το WebRTC βρίσκεται στην επιφάνεια περίπου την τελευταία δεκαετία και μέσα σε αυτό το χρονικό διάστημα έχει καταφέρει να καθιερωθεί σαν πρότυπο σε πολλές εφαρμογές. Πρόκειται για ένα framework που συνδυάζει πρωτόκολλα και διεπαφές για να επιτύχει αυτό που υπόσχεται, πραγματικό χρόνο. Όλο αυτό βέβαια τα καταφέρνει μέσα από κάποιο λογισμικό πλοήγησης στο διαδίκτυο.

Συνήθως, πρωτόκολλα ροής όπως το RTMP προσφέρουν μια πιο γρήγορη μετάδοση βίντεο, σε αντίθεση με αυτά που βασίζονται στο HTTP και στοχεύουν στην βελτιστοποίηση της ποιότητας. Αρχικά, τα πρωτόκολλα RTSP και RTMP αποτέλεσαν τις κατάλληλες μεθόδους για προβολή ζωντανής μετάδοσης μέσω του διαδικτύου. Τα πρωτόκολλα αυτά, χαρακτηρίζονται ως stateful διότι χρειάζονται έναν αποκλειστικό διακομιστή ροής (stream). Η ταχύτητα με την οποία μπορούν να μεταδώσουν βίντεο είναι ικανοποιητική, με την καθυστέρηση να ανέρχεται περίπου στα 5 δευτερόλεπτα. Τα πρωτόκολλα αυτά αντιμετωπίζουν πρόβλημα κλιμάκωσης κατά την προβολή, ενώ πλέον όλο και λιγότερες συσκευές αναπαραγωγής τα υποστηρίζουν. Σταδιακά, τα πρωτόκολλα αυτά χρησιμοποιούνται για την μεταφορά δεδομένων μέχρι τον διακομιστή, όπου στην συνέχεια μετακωδικοποιούνται και μεταδίδονται προς τις διάφορες συσκευές, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3-15) [6].



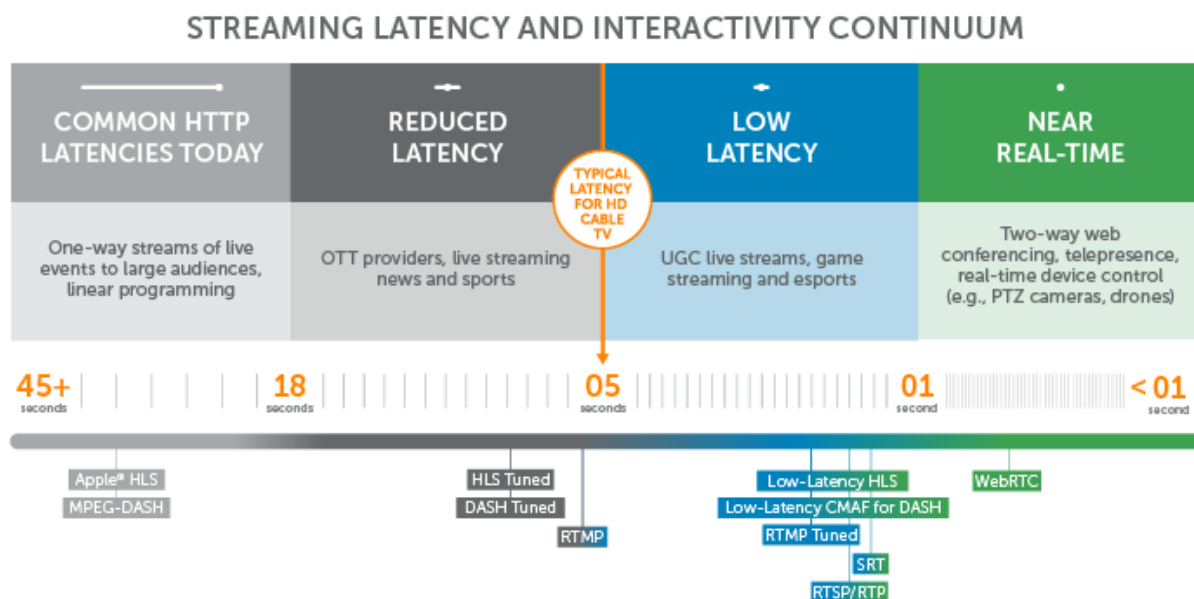
Εικόνα 3-15: Στάδια ροής¹⁵.

¹⁵ Πηγή: <https://www.wowza.com/blog/rtmp-streaming-real-time-messaging-protocol>

Ύστερα, ακολούθησε μια στροφή προς τα πρωτόκολλα που βασίζονταν στο HTTP. Τα πρωτόκολλα αυτά παρείχαν ποιοτικότερη μετάδοση μέσω της χρήσης προσαρμοστικού ρυθμού μετάδοσης (adaptive bitrate) και ήταν ανεξάρτητα από την σύνδεση, ή την συσκευή. Αυτά τα πρωτόκολλα χαρακτηρίζονται ως “stateless” και δυο από τα πιο συνηθισμένα είναι το MPEG-DASH και το HLS που αναπτύχθηκε από την Apple, με την καθυστέρηση να ξεπερνά τα 30 δευτερόλεπτα.

Πλησιάζοντας στην σημερινή εποχή όπου υπάρχουν αυξημένες απαιτήσεις για live streaming, την εμφάνισή τους έχουν κάνει νέα πρωτόκολλα που υποστηρίζουν μετάδοση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο [6]. Τέτοια πρωτόκολλα είναι το SRT και το WebRTC που εστιάζει η συγκεκριμένη εργασία. Για την υλοποίηση του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής σε πραγματικό χρόνο μελετήθηκαν τα πρωτόκολλα RTMP και SRT για την εισροή των δεδομένων μέχρι τον cloud-based server, ενώ αντίστοιχα για την προβολή των δεδομένων στις πλατφόρμες αναπαραγωγής βίντεο χρησιμοποιήθηκαν τα πρωτόκολλα HLS και WebRTC.

Αυτό συμβαίνει διότι στα σημερινά συστήματα δεν απαιτείται η χρήση ενός μόνο πρωτοκόλλου αφού ο κωδικοποιητής (στην συγκεκριμένη περίπτωση το OBS) με τον video player έχουν διαφορετικές ανάγκες. Από την πλευρά του encoder χρησιμοποιείται ένα πρωτόκολλο εισόδου των δεδομένων που φτάνει μέχρι τον διακομιστή πολυμέσων και μετά με ένα άλλο πρωτόκολλο εξόδου η εικόνα φτάνει μέχρι κάποιον video player ώστε να είναι διαθέσιμο προς τους θεατές. Για αυτό τον λόγο χρειάζεται ένας διακομιστής πολυμέσων που θα εκτελεί την εναλλαγή των πρωτοκόλλων καθώς επίσης και θα μετακωδικοποιεί τα δεδομένα για να εξυπηρετεί τις διαφορετικές ανάγκες.



Εικόνα 3-16: Καθυστερήσεις πρωτοκόλλων¹⁶.

¹⁶ Πηγή: <https://www.wowza.com/wp-content/uploads/latency-continuum-2021-with-protocols-700x300-1.webp>

3.2.2 Κωδικοποιήσεις Βίντεο

Η κωδικοποίηση του βίντεο παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαδικασία της μετάδοσης και της αποθήκευσης των δεδομένων. Είναι πρακτικά ανούσιο να μεταδίδεται μέσω του διαδικτύου ένας τεράστιος όγκος δεδομένων καταναλώνοντας περισσότερο bandwidth, δίχως οι τελικοί χρήστες να είναι σε θέση να αναπαράγουν τα δεδομένα. Η κωδικοποίηση προσφέρει σημαντική μείωση του μεταδιδόμενου όγκου δεδομένων, χωρίς απώλειες σήματος [6]. Στο πλαίσιο της μελέτης και ανάπτυξης του προτεινόμενου συστήματος ζωντανής μετάδοσης, μελετήθηκαν αρκετές σύγχρονες κωδικοποιήσεις όπως οι H.264, H.265, VP8 και VP9. Κάθε κωδικοποίηση προσφέρει διαφορετικά πλεονεκτήματα, ως προς την βελτιστοποίηση της ποιότητας μετάδοσης, την εξοικονόμηση bandwidth και την υποστήριξη από διαφορετικές πλατφόρμες.

- *H.264* [12], [33]: Μία από τις πιο διαδεδομένες μορφές συμπίεσης βίντεο είναι η κωδικοποίηση H.264, γνωστή και ως AVC (Advanced Video Coding). Αποτελεί το παλαιότερο και ευρέως χρησιμοποιούμενο πρότυπο συμπίεσης. Βασικό πλεονέκτημα είναι η αποτελεσματική συμπίεση διατηρώντας την ποιότητα του βίντεο σε υψηλά επίπεδα, ενώ παράλληλα μειώνει σημαντικά το μέγεθος των αρχείων. Η κωδικοποίηση H.264 χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως το streaming, η εγγραφή και η μετάδοση υψηλής ποιότητας βίντεο, καθώς είναι συμβατή με τις περισσότερες συσκευές και πλατφόρμες. Προσφέρει εξαιρετική ισορροπία μεταξύ ποιότητας και εύρους ζώνης, διευκολύνοντας τη μετάδοση στα διάφορα δίκτυα.
- *H.265* [13], [34]: Εξέλιξη του H.264 αποτελεί η κωδικοποίηση H.265, γνωστή και ως HEVC (High Efficiency Video Coding). Σε σύγκριση με το H.264, το H.265 προσφέρει ακόμη μεγαλύτερη αποδοτικότητα στη συμπίεση βίντεο και συγκεκριμένα μπορεί να μειώσει το μέγεθος των αρχείων βίντεο σχεδόν στο μισό, διατηρώντας την ποιότητά του υψηλή. Αυτό την καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμη σε βίντεο υψηλής ανάλυσης. Το H.265 μπορεί να μην υποστηρίζεται από αρκετές συσκευές όπως το H.264, όμως κερδίζει έδαφος σε εφαρμογές όπου απαιτούνται αποδοτικότητα και ποιότητα.
- *VP8* [13]: Το VP8 αναπτύχθηκε από την Google και είναι μια κωδικοποίηση βίντεο ανοιχτού κώδικα. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές web, όπου απαιτείται real-time επικοινωνία από διάφορες πλατφόρμες streaming. Προσφέρει καλή ποιότητα και αποδοτική συμπίεση καθιστώντας τη συγκεκριμένη κωδικοποίηση δημοφιλή σε περιπτώσεις που απαιτείται χαμηλή καθυστέρηση, όπως το live streaming. Το VP8 υποστηρίζεται από προγράμματα περιήγησης και η χρήση του δεν απαιτεί αδειοδότηση, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό.
- *VP9* [13], [34]: Το VP9 αποτελεί εξέλιξη του VP8 και αναπτύχθηκε επίσης από την Google ως κωδικοποίηση ανοιχτού κώδικα. Το VP9 μπορεί να προσφέρει παρόμοια επίπεδα συμπίεσης με το H.265 και μειώνει σημαντικά το εύρος ζώνης που απαιτείται για την αποστολή βίντεο υψηλής ανάλυσης. Χρησιμοποιείται αρκετά στο YouTube και σε άλλες πλατφόρμες ροής,

λόγω της υψηλής απόδοσης που προσφέρει. Το VP9 δεν είναι τόσο διαδεδομένο όσο το H.264, όμως είναι ιδανικό για εφαρμογές όπου υπάρχουν απαιτήσεις ποιότητας με ελάχιστο διαθέσιμο εύρος ζώνης.

3.2.3 Cloud-Based πλατφόρμα

Η πλατφόρμα χαρακτηρίζεται ως η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την λήψη των δεδομένων από τον σταθμό βάσης μέσω ενός πρωτοκόλλου, την επεξεργασία αυτών και τελικά την προώθηση σε έναν video player για αναπαραγωγή [4]. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν τρεις πλατφόρμες live streaming, με στόχο τη επιλογή της καταλληλότερης για το σύστημα. Συγκεκριμένα ο Πίνακας 3-2 που ακολουθεί, αποτυπώνει τα αποτελέσματα της σύγκρισης μεταξύ του Wowza, του YouTube και του WPStream. Με βάση τα κριτήρια του κόστους, της υποστήριξης πρωτοκόλλων, το video hosting, της καταγραφής βίντεο, και της καθυστέρησης που αναλύθηκαν, η πλατφόρμα Wowza επιλέχθηκε ως η καλύτερη λύση. Ο βασικός λόγος ήταν η προηγμένη υποστήριξη πρωτοκόλλων χαμηλής καθυστέρησης, η αξιοπιστία και η ανταπόκριση στις απαιτήσεις του συστήματος.

Πίνακας 3-2: Σύγκριση πλατφορμών

Χαρακτηριστικό	YouTube	Wowza	WPStream
Κόστος	Δωρεάν	Pay as you go + Pro plan	Pro plan
Υποστήριξη Πρωτοκόλλων	RTMP, HLS	RTMP, HLS, SRT, WebRTC	RTMP, HLS
Video hosting	Απεριόριστος Χώρος	Περιορισμένος με βάση το plan	Περιορισμένος με βάση το plan
Recording	Ταυτόχρονα με το live	Ταυτόχρονα με το live	Ταυτόχρονα με το live
Καθυστερήση	> 11 Sec	~2 – 3 Sec (Εξαρτάται το πρωτόκολλο)	> 25 Sec

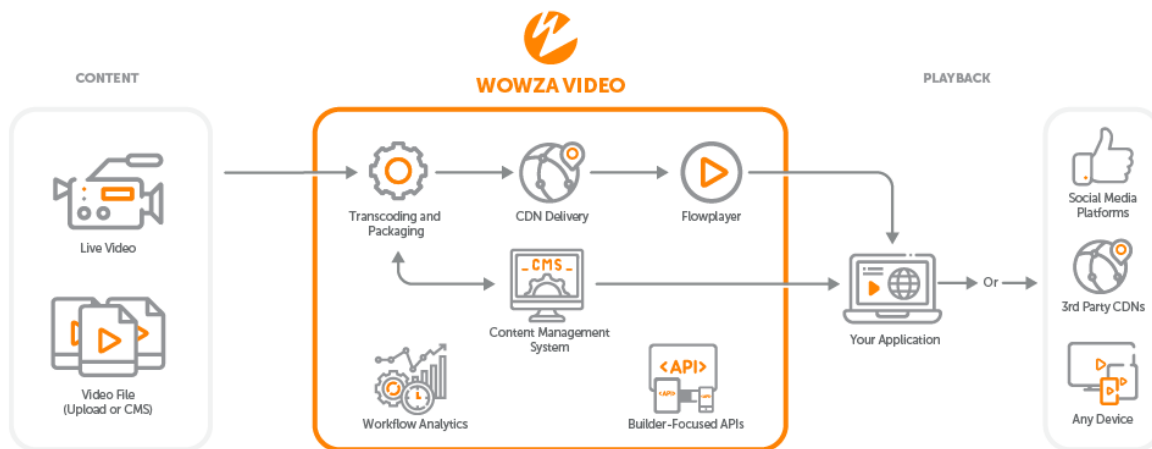
Wowza Video:

Το Wowza είναι μια πλατφόρμα βίντεο στο cloud, που μπορεί να προσφέρει ολοκληρωμένες υπηρεσίες ζωντανής μετάδοσης και αναπαραγωγής βίντεο για πληθώρα εφαρμογών. Είναι γνωστή για τις αξιόπιστες, κλιμακούμενες, ασφαλείς και ολοκληρωμένες

υπηρεσίες που προσφέρει, δημιουργώντας ένα ιδανικό περιβάλλον για πεδία όπως η εκπαίδευση, τα σεμινάρια και οι ζωντανές συνδέσεις [28], [4]. Το Wowza επιτρέπει την διαχείριση ορισμένων παραμέτρων στην πλατφόρμα με στόχο την μείωση της καθυστέρησης ανάλογα τις απαιτήσεις των χρηστών. Ορισμένες από αυτές τις παραμέτρους είναι [28]:

- Λειτουργία μετακωδικοποίησης του βίντεο σε διάφορες μορφές, αναλύσεις και bit rate.
- Λειτουργία ροής χαμηλής καθυστέρησης για την μείωση του χρόνου μεταξύ της στιγμής που μεταδίδεται το βίντεο και της στιγμής που το βλέπουν οι θεατές.
- Λειτουργία επιλογής πολλαπλών ρυθμών μετάδοσης για προβολή σε διαφορετικά επίπεδα ποιότητας στους θεατές.
- Λειτουργία VOD (Video On Demand)
- Λειτουργία υποστήριξης πολλαπλών συσκευών (π.χ. κινητό, tablet, laptop)

Η πλατφόρμα χρησιμοποιεί κρυπτογράφηση SSL και διαθέτει πληθώρα πακέτων ανάλογα τις ανάγκες των χρηστών. Υπάρχει ακόμα η δυνατότητα της επιλογής “pay as you go”, που σημαίνει ότι ο χρήστης πληρώνει την πλατφόρμα ανάλογα την χρήση που κάνει [35]. Ακόμη, η πλατφόρμα προσφέρει ανάλυση στατιστικών κατά την από άκρο σε άκρο μετάδοση, δηλαδή παρακολουθεί την ροή των δεδομένων, τα δεδομένα που καταναλώνονται (πόρους) και πολλά άλλα σε πραγματικό χρόνο μέσα από έναν πίνακα διαχείρισης (dashboard). Δεδομένου ότι η ροή των δεδομένων γίνεται σε πραγματικό χρόνο για μεγάλης κλίμακας κοινό χωρίς να θυσιάζεται η ποιότητα της μετάδοσης, το Wowza προσφέρει ροή μεγάλης κλίμακας χρησιμοποιώντας πρωτόκολλα όπως το WebRTC για την βέλτιστη εμπειρία των θεατών, ρυθμίζοντας την ποιότητα του βίντεο με βάση τους διαθέσιμους πόρους των τελικών χρηστών, χωρίς να υπάρχει επιπρόσθετη επιβάρυνση της ροής της ζωντανής μετάδοσης [28].



Εικόνα 3-17: Διάγραμμα ροής Wowza video¹⁷.

¹⁷ Πηγή: <https://www.wowza.com/video>

3.2.4 Αναπαραγωγή Βίντεο

Το video player επιτρέπει την διανομή του περιεχομένου προς το ευρύ κοινό. Η επιλογή του πρέπει να γίνεται με βάση τις απαιτήσεις του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικούς παράγοντες όπως η συμβατότητα με τα πρωτόκολλα και η υποστήριξη των διαθέσιμων κωδικοποιήσεων, με στόχο να εξασφαλισθεί η μέγιστη απόδοση που θα βελτιώσει την εμπειρία του χρήστη [40]. Σύγχρονα video players όπως αυτό που προσφέρει η πλατφόρμα της Wowza, επιτρέπουν τη μετάδοση βίντεο σε πραγματικό χρόνο, ανεξαρτήτως της συσκευής που χρησιμοποιούν, αξιοποιώντας το πρωτόκολλο WebRTC. Η συμβατότητα με τις διάφορες συσκευές και η απλότητα της διεπαφής (interface), καθιστούν το συγκεκριμένο video player ιδανικό για εφαρμογές live streaming. Μοναδικός περιορισμός αποτελεί το όριο των 300 ατόμων που μπορούν να παρακολουθούν ταυτόχρονα το βίντεο από την πλατφόρμα, περιορισμό που θέτει το ίδιο το πρωτόκολλο [41].

3.3 Λογισμικά

Τελευταίο βήμα στην ανάπτυξη του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής αποτελεί η επιλογή και η χρήση κατάλληλου λογισμικού που θα βοηθήσει στην οργάνωση όλου του συστήματος. Αν και τελευταίο, το βήμα αυτό είναι ίσως το πιο κρίσιμο για την λειτουργία και την αποδοτικότητα ολόκληρης της σύνθεσης. Ουσιαστικά, το λογισμικό που επιλέχθηκε λειτουργεί ως ενδιάμεσος της διαθέσιμης υποδομής και των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται. Πρακτικά, συνδέει το υλικό με την πλατφόρμα και τους τελικούς χρήστες. Μπορεί να διαχειριστεί κατάλληλα τα δεδομένα που φτάνουν στον σταθμό βάσης από τις κάμερες και να τα προωθήσει στην Cloud-Based πλατφόρμα, αφού πρώτα τα κωδικοποιήσει. Η επιλογή κατάλληλου λογισμικού συμβάλλει στην ομαλή ροή των δεδομένων και την επικοινωνία μεταξύ των διαφορετικών στοιχείων του συστήματος. Συνεπώς, ο ρόλος του δεν είναι μόνο να λειτουργεί ως κωδικοποιητής (Encoder) αλλά σαν κεντρικός διαχειριστής.

Κατά την μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας εξετάστηκαν τα λογισμικά Open Broadcaster Software (OBS), Restream, Xsplit Broadcaster και Wirecast, που διαθέτουν διαφορετικές δυνατότητες και χαρακτηριστικά. Καθένα από αυτά έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στον τρόπο λειτουργίας του. Έτσι, στην συγκεκριμένη υποενότητα γίνεται μια σύγκριση μεταξύ τεσσάρων λογισμικών διαχείρισης live streaming σε επιφανειακό επίπεδο και εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε και χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό OBS έναντι των υπολοίπων. Παράλληλα, παρουσιάζονται και τα υπόλοιπα λογισμικά που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη υλοποίηση, όπως το Google Earth σε συνδυασμό με το radioFresnel για την εύρεση οπτικής επαφής (LOS) μεταξύ κάθε ζεύγους πομπού-δέκτη, αλλά και του δωρεάν λογισμικού των Windows 3D Paint και του Photoshop, που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία και επεξεργασία custom γραφικών κατά την προβολή της ζωντανής μετάδοσης.

A. Σύγκριση μεταξύ προγραμμάτων ροής

Ο Πίνακας 3-3 που ακολουθεί, παρουσιάζει τις συγκρίσεις και τις διαφορές των τεσσάρων λογισμικών που εξετάστηκαν, με βάση τα κριτήρια του κόστους, της υποστήριξης πλήθους καμερών, της ποιότητας προβολής, τις δυνατότητες και το support, πριν το OBS επιλεγεί ως το καταλληλότερο εργαλείο για την διαχείριση του συστήματος [36].

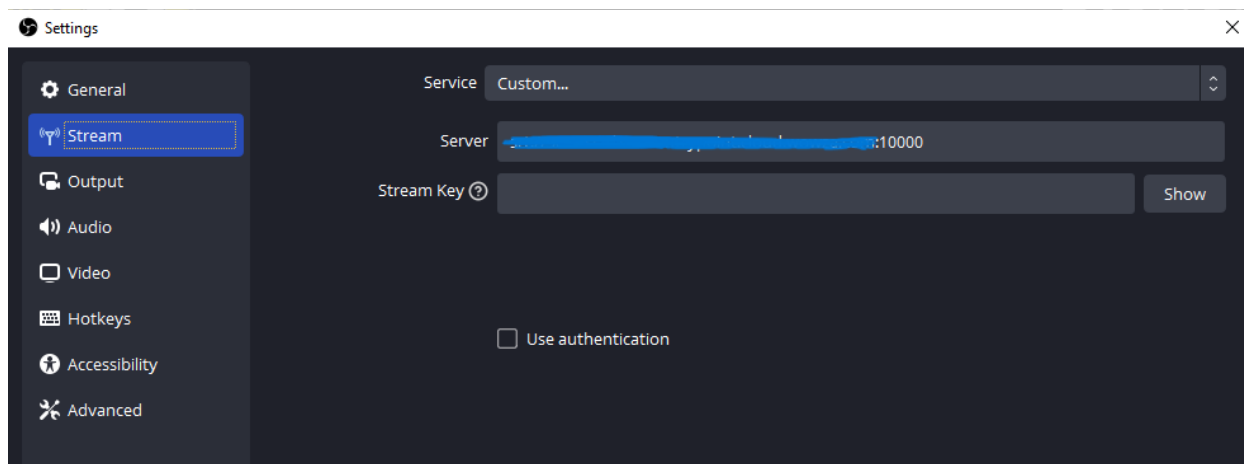
Πίνακας 3-3: Σύγκριση Λογισμικών Ροής.

Χαρακτηριστικό	OBS	Restream	XSplit Broadcaster	Wirecast
Κόστος	Δωρεάν	Δωρεάν + Pro plan	Δωρεάν + Pro plan	Pro plan
Πλατφόρμες Υποστήριξης	Windows macOS Linux	Browser	Windows	Windows macOS
Υποστήριξη πολλαπλών καμερών	Ναι	Όχι	Ναι	Ναι
Ποιότητα Streaming	Υποστηρίζει 4K	Υποστηρίζει έως 1080p	Υποστηρίζει 4K	Υποστηρίζει 4K
Υποστήριξη	Όχι	Ναι	Ναι	Ναι
Επεξεργασία Βίντεο	Βασική καταγραφή	Όχι	Προηγμένη καταγραφή και επεξεργασία	Προηγμένη καταγραφή και επεξεργασία
Επιλογές εξαγωγής	Καταγραφή τοπικά ή live stream	Live stream	Καταγραφή τοπικά ή live stream	Καταγραφή τοπικά ή live stream



Εικόνα 3-19: Χρήση γραφικών στοιχείων στο OBS.

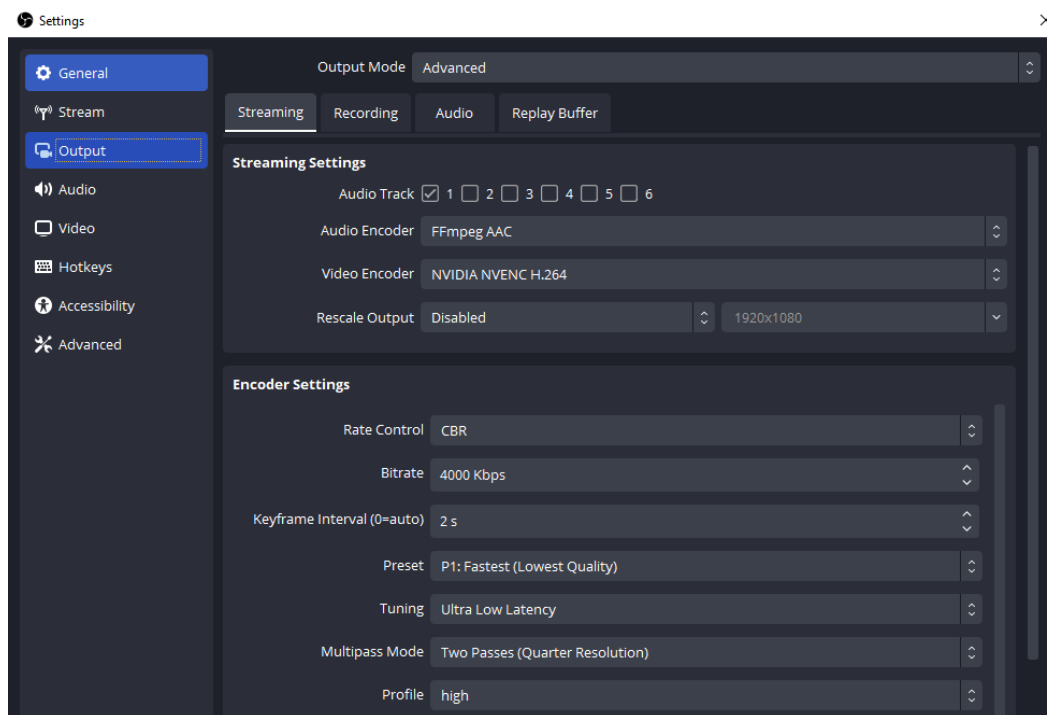
Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-20 και Εικόνα 3-21), παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις των ρυθμίσεων του λογισμικού, με σκοπό την προετοιμασία του για τη ζωντανή μετάδοση του event. Η Εικόνα 3-20 αποτυπώνει την διαδικασία σύνδεσης με τον custom server της πλατφόρμας Wowza που τροποποιείται στο Παράρτημα Β. Στο πεδίο “Server” εισάγεται η διεύθυνση του primary server και ακολουθεί η host port, ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή σύνδεση για τη μετάδοση.



Εικόνα 3-20: Σύνδεση με τον custom SRT server της πλατφόρμας Wowza.

Από την άλλη πλευρά, η Εικόνα 3-21, εμφανίζει τις επιλογές που χρησιμοποιήθηκαν από το μενού ρυθμίσεων για προχωρημένους πριν την διεξαγωγή του Live. Συγκεκριμένα, διακρίνεται η χρήση της κάρτας γραφικών ως encoder με σκοπό να μειωθεί ο φόρτος εργασίας της CPU. Το Bitrate, ρυθμίστηκε ως σταθερό (CBR) και συγκεκριμένα έλαβε την τιμή 4000kbps

που ήταν μια αρκετά ικανοποιητική τιμή για την διαθέσιμη ταχύτητα διαδικτύου μέσω Starlink. Το keyframe interval αφορά μια παράμετρο κωδικοποίησης που καθορίζει πόσο συχνά ολόκληρη η εικόνα θα μεταδίδεται. Ενώ, τέλος, ακολούθησαν και άλλες ρυθμίσεις (tuning) για την βελτιστοποίηση των καθυστερήσεων.

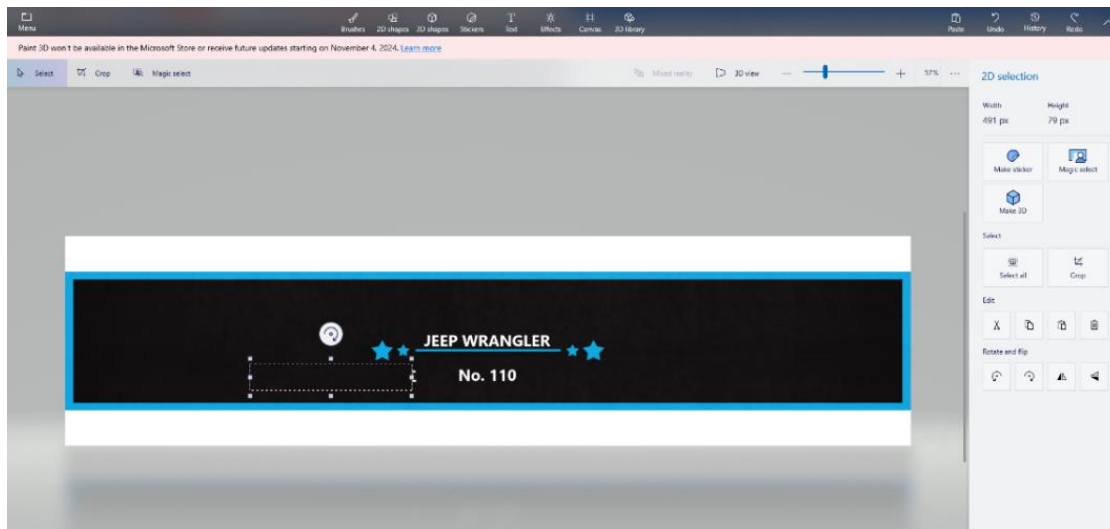


Εικόνα 3-21: Παράθυρο ρυθμίσεων OBS.

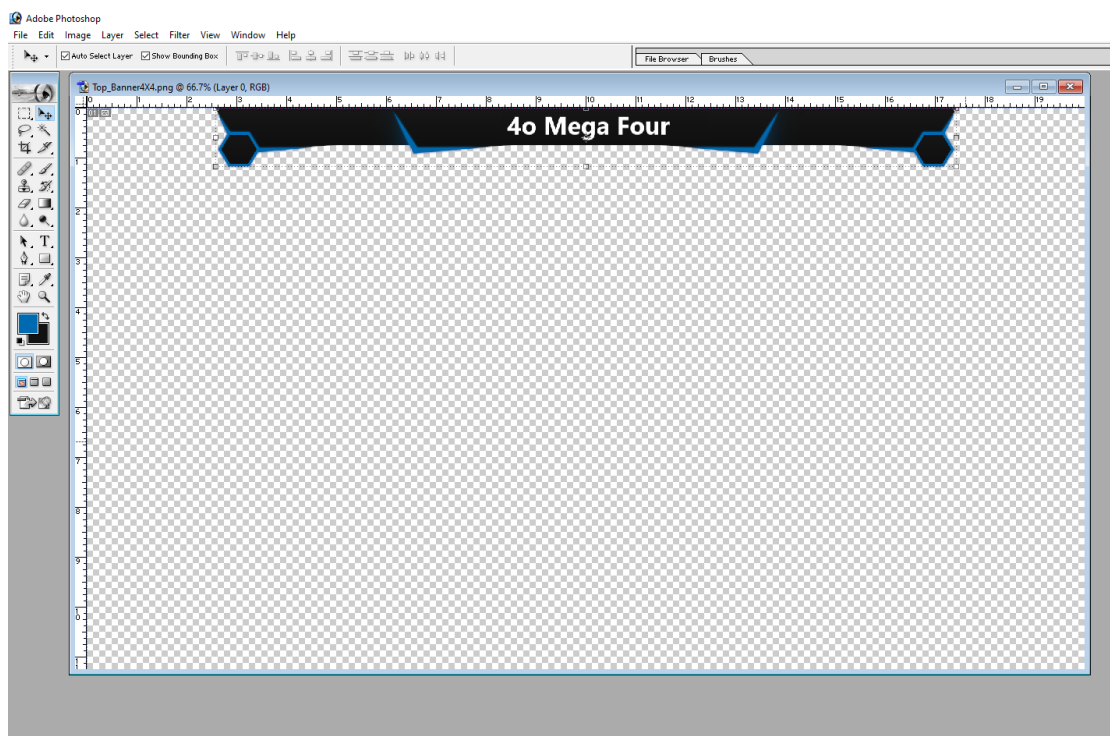
Γ. Λογισμικό Επεξεργασίας Γραφικών

Αν και γενικά δεν αποτελεί κανόνα, η οπτική διαρρύθμιση μπορεί να καθορίσει την ατμόσφαιρα κατά την μετάδοση του live. Η οπτικοποίηση των δεδομένων παίζει καθοριστικό ρόλο στην εμφάνιση της εικόνας κατά την προβολή. Ακόμα και μικρές λεπτομέρειες μπορούν να κάνουν την διαφορά. Η χρήση γραφικών δεν είναι απαραίτητη, όμως μπορεί να δώσει μια άλλη νότα κατά την προβολή από τον θεατή [12]. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του αγώνα αυτοκινήτων είναι σημαντικό ο θεατής να γνωρίζει ποιος αγωνιζόμενος είναι έτοιμος να εκκινήσει, αν υπάρχει διακοπή ή αν η ροή έχει ολοκληρωθεί. Ενδεχομένως τα γραφικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως διαφημίσεις αν ζητηθεί, προσθέτοντας έναν τόνο επαγγελματισμού. Έτσι μπορεί να περνάει από την οθόνη κάθε λίγα λεπτά μια κινούμενη εικόνα ή λεζάντα παρουσιάζοντας πληροφορίες. Για να επιτευχθεί η δημιουργία οπτικών στοιχείων, απαιτούνται τα κατάλληλα λογισμικά επεξεργασίας εικόνων. Τέτοια εργαλεία είναι το δωρεάν πρόγραμμα των Windows 3D Paint και το Photoshop. Και τα δυο λογισμικά, δίνουν τη δυνατότητα επεξεργασίας και δημιουργίας εικόνων, βοηθώντας την αποτελεσματική απεικόνιση αυτών και προσθέτοντας μια δόση επαγγελματισμού στο τελικό αποτέλεσμα.

Ακόμη, στο διαδίκτυο διατίθεται μια πληθώρα έτοιμων templates, που επιτρέπουν στον διαχειριστή να δημιουργήσει γραφικά στοιχεία χωρίς να ξεκινήσει από την αρχή. Στην Εικόνα 3-22 και στην Εικόνα 3-23 που ακολουθούν, παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας γραφικών για τον αγώνα που μελετάται η συγκεκριμένη έρευνα.



Εικόνα 3-22: Επεξεργασία Γραφικών από 3D Paint.



Εικόνα 3-23: Επεξεργασία Γραφικών από το Photoshop.

Ακολουθούν δυο γραφικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την διάρκεια της μετάδοσης ζωντανής ροής. Το πρώτο αφορά μια ειδοποίηση που εμφανίστηκε στην οθόνη των

θεατών όταν σταμάτησε ο αγώνας λόγω ατυχήματος (Εικόνα 3-24), ενώ το δεύτερο αφορά την ενημέρωση των θεατών πως ο αγώνας ολοκληρώθηκε και πως σύντομα ακολουθεί η διακοπή της ζωντανής μετάδοσης (Εικόνα 3-25).



Εικόνα 3-24: Alert.



Εικόνα 3-25: Γραφικό ολοκλήρωσης αγώνα.

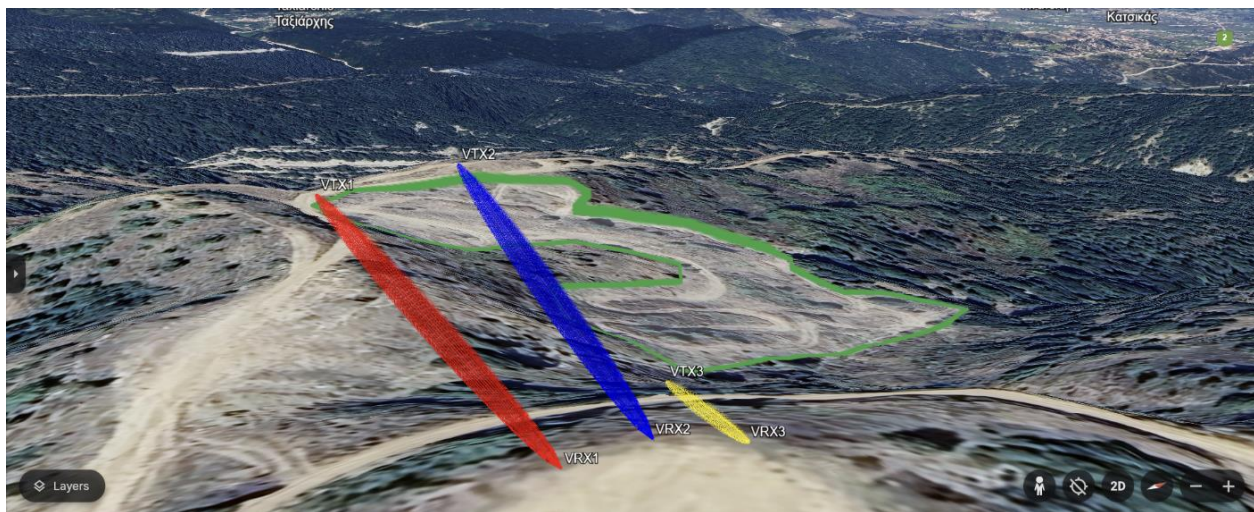
Δ. Λογισμικό Αναζήτησης Line Of Sight (LOS) με χρήση του Google Earth

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, για την αξιόπιστη και αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος είναι απαραίτητο, κάθε ζεύγος πομπού-δέκτη να έχει οπτική επαφή μεταξύ του. Επιτυγχάνοντας οπτική επαφή, ουσιαστικά μειώνεται ο κίνδυνος παρεμβολών ή απώλεια σήματος. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση για την ανάλυση του LOS μεταξύ πομπών και δεκτών χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο γεωγραφικής απεικόνισης της Google, το Google Earth. Το Google Earth προσφέρει δυνατότητες χαρτογράφησης μέσω της τρισδιάστατης απεικόνισης του πλανήτη, προσφέροντας ακριβή δεδομένα τοπογραφίας και φυσικών εμποδίων. Έτσι, η 3D έκδοση του χάρτη βοηθάει στην αξιολόγηση της διαδρομής και στον εντοπισμό εμποδίων που μπορούν να επηρεάσουν ή ακόμα και να διακόψουν την μετάδοση σήματος [32]. Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 3-26 και Εικόνα 3-27) παρουσιάζονται γραφικά με μπλε, κόκκινο και κίτρινο χρώμα τα Line Of Sight μεταξύ κάθε ζεύγους πομπού-δέκτη. Στην δεύτερη εικόνα (Εικόνα 3-27) το LOS υπολογίστηκε με την βοήθεια του online εργαλείου radioFresnel¹⁸.

¹⁸ Πηγή: <https://www.radiofresnel.com/about/>



Εικόνα 3-26: Εύρεση LOS με Google Earth.



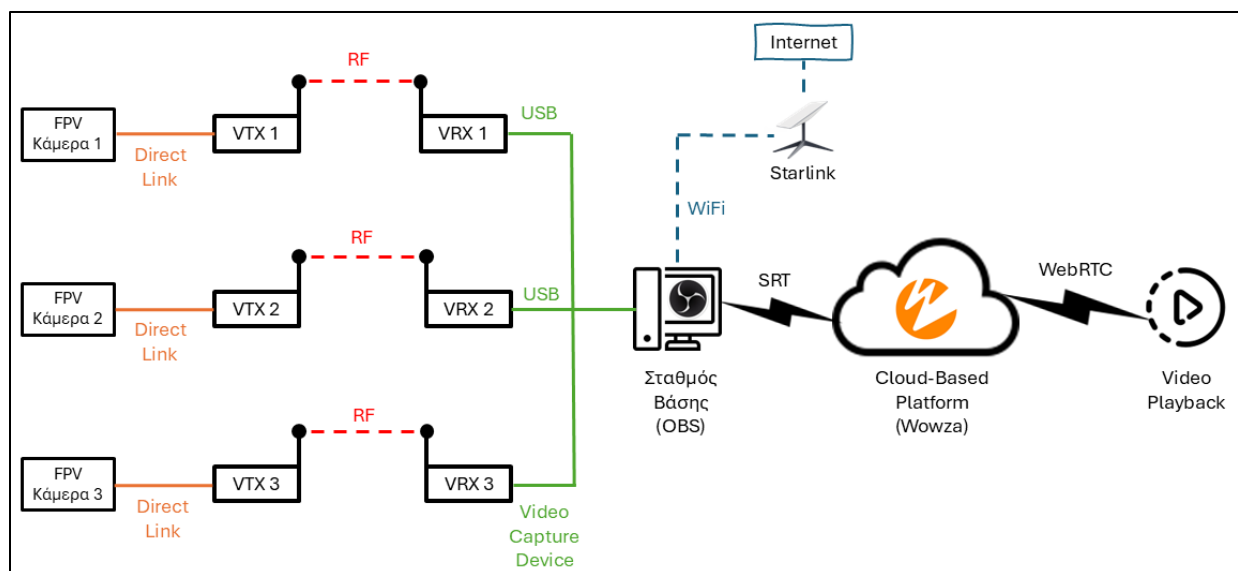
Εικόνα 3-27: Οπτικοποίηση LOS με το online εργαλείο radioFresnel.

4 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΖΩΝΤΑΝΗΣ ΜΕΤΑΔΩΣΗΣ

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο παρουσιάζεται η υλοποίηση του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής βίντεο. Ειδικότερα, αναδεικνύεται η συνδεσμολογία και η συνεργασία των επιμέρους στοιχείων της διάταξης του συστήματος που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α, προκειμένου να διασφαλιστεί η ορθή λειτουργία τους. Επιπλέον, γίνεται αναφορά σε προηγούμενες προσεγγίσεις που μελετήθηκαν αλλά και στο πώς αυτές οδήγησαν στην δημιουργία του συγκεκριμένου συστήματος. Ακολουθεί, η παρουσίαση και η ανάλυση των μετρήσεων που λήφθηκαν κατά την λειτουργία του με σκοπό την αξιολόγηση της απόδοσής του. Τέλος, εξετάζονται οι περιορισμοί που προέκυψαν κατά την εφαρμογή του συστήματος, ενώ προτείνονται πιθανές βελτιώσεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε μια μελλοντική εξέλιξή του.

4.1 Υλοποίηση Συστήματος

Το υποκεφάλαιο αυτό πραγματεύεται την υλοποίηση συστήματος live streaming μέσω εφήμερων υποδομών. Συγκεκριμένα, περιγράφεται η υλοποίηση του προτεινόμενου συστήματος όπως χρησιμοποιήθηκε στις 21-22 Σεπτεμβρίου το 2024, στο χωριό Ελληνικό Ιωαννίνων, για τη ζωντανή μετάδοση ενός αγώνα αυτοκινήτων 4Χ4. Η υλοποίηση αυτή, ήταν επακόλουθο πολλών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν και είχε ως στόχο τον έλεγχο της λειτουργικότητας και της αποδοτικότητας του συστήματος μετάδοσης σε πραγματικό χρόνο. Δεδομένου ότι στα προηγούμενα κεφάλαια εξετάστηκαν οι απαιτήσεις του συστήματος, οι ανάγκες με βάση την τοποθεσία που θα πραγματοποιηθεί το event, η υποδομή και οι τεχνολογίες που δύναται να χρησιμοποιηθούν, είναι ώρα για εφαρμογή των γνώσεων στην πράξη. Ακολουθεί η περιγραφή του τρόπου λειτουργίας των επιμέρους στοιχείων του συστήματος και το πως αυτά συνεργάζονται μεταξύ τους, με σκοπό να διασφαλιστεί η ομαλή και συνεχής ροή δεδομένων από άκρο σε άκρο προσφέροντας ασφαλή και αξιόπιστη παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο. Στην Εικόνα 4-1 που ακολουθεί, αποτυπώνεται λεπτομερώς η ροή των δεδομένων, καθώς και τα διαφορετικά στάδια που εκτυλίσσονται από την λήψη του βίντεο, μέχρι και την προβολή στους θεατές. Το συγκεκριμένο διάγραμμα ροής, αποτελεί μια πλήρη έκδοση του απλουστευμένου διαγράμματος που παρουσιάστηκε στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας (Εικόνα 2-1).



Εικόνα 4-1: Διάγραμμα ροής Συστήματος.

Η λειτουργία του συγκεκριμένου συστήματος βασίστηκε στην συνεργασία πολλαπλών τεχνολογιών, ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Κάθε στοιχείο του συστήματος έχει ξεχωριστό και μοναδικό ρόλο στη συλλογή, επεξεργασία, μετάδοση και προβολή των δεδομένων. Με βάση την ανάλυση που έγινε στο Κεφάλαιο 3, επιλέχθηκε ο κατάλληλος εξοπλισμός για κάθε δομική μονάδα του. Οι πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζουν αναλυτικά τον εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε δομική μονάδα, και συγκεκριμένα α) στους επίγειους σταθμούς (Πίνακας 4-1), β) στον σταθμό βάσης (Πίνακας 4-2) και γ) το Drone (Πίνακας 4-3).

Πίνακας 4-1: Επίγειοι σταθμοί.

Ποσότητα	Είδος	Προϊόν
3x	FPV Αναλογική Κάμερα	Phoenix 2 Camera Special Edition V2 By Runcam
2x	4G Ψηφιακή Κάμερα	Reolink Go Plus
3x	Σύστημα VTX	iFlight BLITZ 5.8GHz VTX
3x	Τροφοδοσία	Μπαταρίες UPS 12v
6x	Τρίποδες	-

Πίνακας 4-2: Σταθμός βάσης.

Ποσότητα	Είδος	Προϊόν
1x	PC	Επεξεργαστής: Ryzen 5 3.6GHz 6 πυρήνων Μνήμη RAM: 16 GB 3200MHz DDR4
3x	Σύστημα VRX	EWRF UVC OTG 5.8G VRX / RC832 Boscam FPV 5.8G VRX
1x	Capture Card	Anga PS-C240
1x	Σύνδεση με Διαδίκτυο	Starlink
2x	Τροφοδοσία	Γεννήτρια / Μπαταρία UPS 12v

Πίνακας 4-3: Μη επανδρωμένο αεροσκάφος.

Ποσότητα	Είδος	Περιγραφή
1x	FPV Drone	Εσωτερική επικοινωνία με κινητό. VDO.ninja για καταγραφή ζωντανής εικόνας από OBS.

Ακόμη, οι πίνακες περιέχουν τις ψηφιακές κάμερες 4G και ένα μη επανδρωμένο αεροσκάφος (Unmanned Aerial Vehicle - UAV) που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη υλοποίηση. Όπως εύκολα γίνεται αντιληπτό από την Εικόνα 4-1, το σύστημα χωρίζεται στα εξής υποσυστήματα:

Υποσύστημα 1^ο: Καταγραφή Βίντεο

Για την καταγραφή του βίντεο επιλέχθηκαν οι FPV κάμερες “Phoenix 2 Camera Special Edition V2” της εταιρείας Runcam. Η επιλογή τους βασίστηκε στις προδιαγραφές του προϊόντος [44] που παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα Α (Πίνακας Α-1). Χρησιμοποιήθηκαν τρεις τέτοιες κάμερες FPV, οι οποίες τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά σημεία της πίστας. Πριν την τοποθέτησή τους, μελετήθηκαν οι πιθανές θέσεις τους με βάση την οπτική επαφή των πομπών και των δεκτών χρησιμοποιώντας μετρήσεις στο Google Earth. Οι κάμερες αυτές ήταν απευθείας συνδεδεμένες με τους πομπούς “iFlight BLITZ” που λειτουργούσαν στην περιοχή των 5.8GHz [45].

Τόσο οι κάμερες, όσο και οι πομποί ήταν κλεισμένοι σε μια ειδικά διαμορφωμένη κατασκευή που παρείχε αδιάβροχη προστασία στο σύστημα. Η κατασκευή αυτή, ήταν τοποθετημένη πάνω σε ένα τρίποδο για να παρέχει μέγιστη εμβέλεια χωρίς παρεμβολές από εμπόδια. Η τροφοδοσία κάθε επίγειου σταθμού έγινε με την χρήση μπαταριών UPS 12V, ενώ παράλληλα από την κάτω μεριά της κατασκευής τοποθετήθηκε ένα ανεμιστηράκι για την

απαραίτητη ψύξη του συστήματος. Η κατασκευή αυτή φαίνεται στην Εικόνα 4-2. Αντίθετα με τις FPV κάμερες, οι ψηφιακές 4G κάμερες της Reolink [46] τοποθετήθηκαν σε σημεία όπου υπήρχε διαθέσιμο δίκτυο 4G για να στέλνουν αδιάκοπα δεδομένα προς την client εφαρμογή. Οι συγκεκριμένες κάμερες δεν είχαν απαιτήσεις για τροφοδοσία, καθώς ήταν αυτόνομες και αυτό τροφοδοτούμενες με τη βοήθεια του ηλιακού panel που διέθεταν.



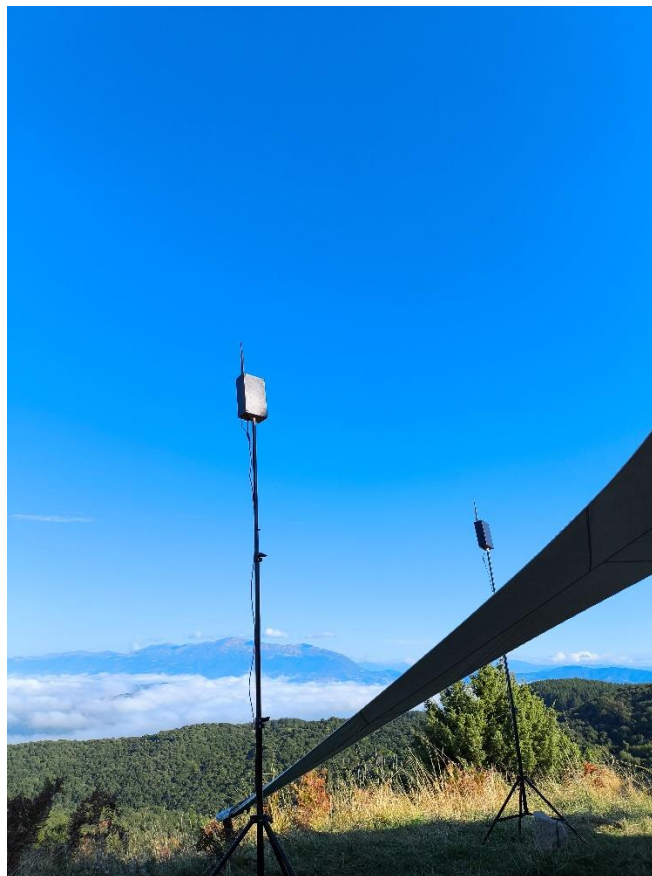
Εικόνα 4-2: Κατασκευή πομπού 5.8GHz.

Υποσύστημα 2ο: Αποστολή δεδομένων με την χρήση μικροκυματικών ζεύξεων στον σταθμό Βάσης

Οι τρεις πομποί που τοποθετήθηκαν σε διαφορετικά σημεία της πίστας είχαν οπτική επαφή (Line Of Sight) με τον σταθμό βάσης, όπου βρίσκονταν και οι αντίστοιχοι δέκτες. Για το συγκεκριμένο σύστημα μετάδοσης επιλέχθηκαν δέκτες δυο κατηγοριών: α) ο δέκτης EWRF UVC OTG 5.8G [47], με ψηφιακή έξοδο που αναγνώριζε ο υπολογιστής που βρισκόταν στον σταθμό βάσης και β) ο δέκτης RC832 FPV 5.8G της εταιρείας Boscama [48] που είχε αναλογική έξοδο με αποτέλεσμα να ήταν απαραίτητη η μετατροπή μέσω κάποια συσκευής καταγραφής. Οι πομποί μετέδιδαν τα δεδομένα ασύρματα μέσω της χρήσης ραδιοσυχνοτήτων (RF), τα οποία λάμβαναν οι δέκτες που ήταν εγκατεστημένοι στον σταθμό βάσης. Για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ

των σημάτων, κάθε ζεύγος πομπού-δέκτη ρυθμίστηκε σε διαφορετικές συχνότητες και κανάλια. Τα σήματα λαμβάνονταν από τους αντίστοιχους δέκτες, εκ των οποίων, δυο από τους τρεις ήταν συνδεδεμένοι στον υπολογιστή του σταθμού βάσης μέσω USB. Ο τρίτος δέκτης χρειάστηκε το Anga PS-C240 [49], μια οικονομική συσκευή ψηφιοποίησης αναλογικών σημάτων βίντεο για να μετατρέψει το αναλογικό σήμα σε ψηφιακό και συνεπώς σε μορφή κατανοητή για τον υπολογιστή.

Κατά τη διάρκεια του αγώνα χρησιμοποιήθηκε και ένα drone FPV για να παρέχει εναέρια πλάνα της πίστας. Το drone επικοινωνούσε απευθείας με το κινητό του χειριστή μέσω direct link, με σκοπό να μην παρεμβάλει στις συχνότητες που χρησιμοποιούνταν από τα υπόλοιπα συστήματα των 5.8GHz. Για τη λήψη της εικόνας από το drone, το κινητό του χειριστή συνδέθηκε σε ένα laptop και από εκεί μέσω του VDO.ninja¹⁹ μπορούσε να στείλει απευθείας εικόνα στο OBS του σταθμού βάσης χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο WebRTC. Στην εικόνα που ακολουθεί (Εικόνα 4-3), φαίνεται η διάταξη των δεκτών κοντά στον σταθμό βάσης. Έτσι, έχοντας στον υπολογιστή εικόνα και από τις τρεις FPV κάμερες, η επόμενη φάση περιελάμβανε την κωδικοποίηση του σήματος.



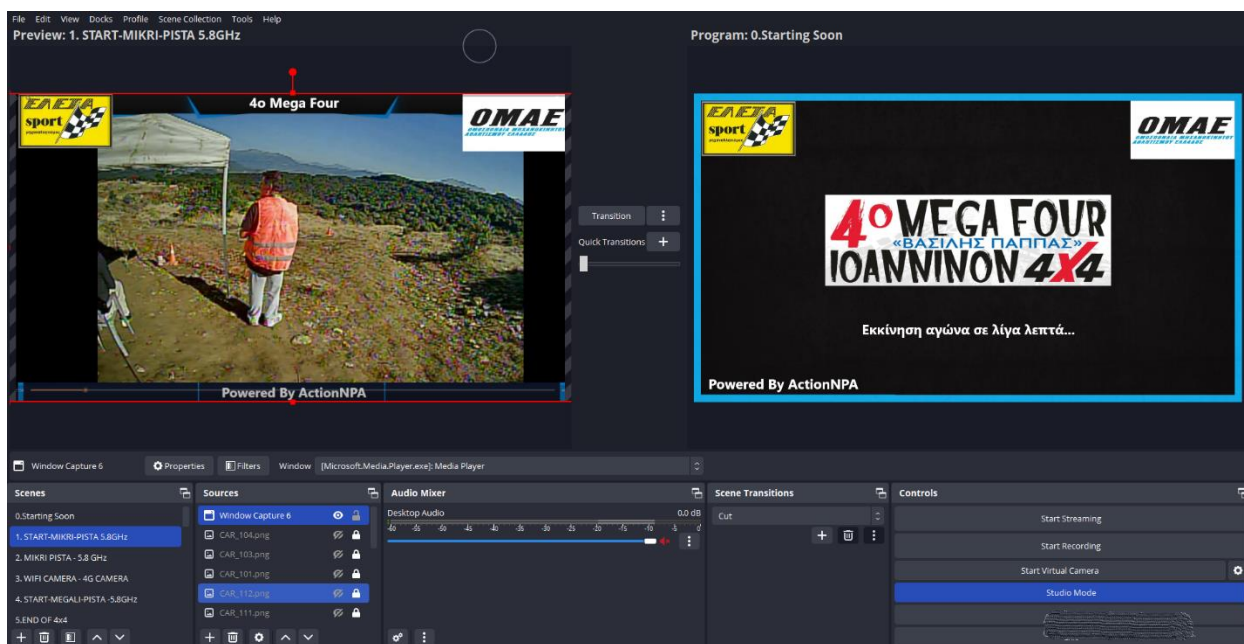
Εικόνα 4-3: Η τοποθέτηση των δεκτών 5.8GHz πάνω σε κατάλληλες κατασκευές.

¹⁹ Το VDO.ninja είναι ένα εργαλείο ανοιχτού κώδικα που επιτρέπει την μετάδοση ήχου και βίντεο μέσω web, παρέχοντας δυνατότητα ζωντανής ροής με χαμηλή καθυστέρηση [50].

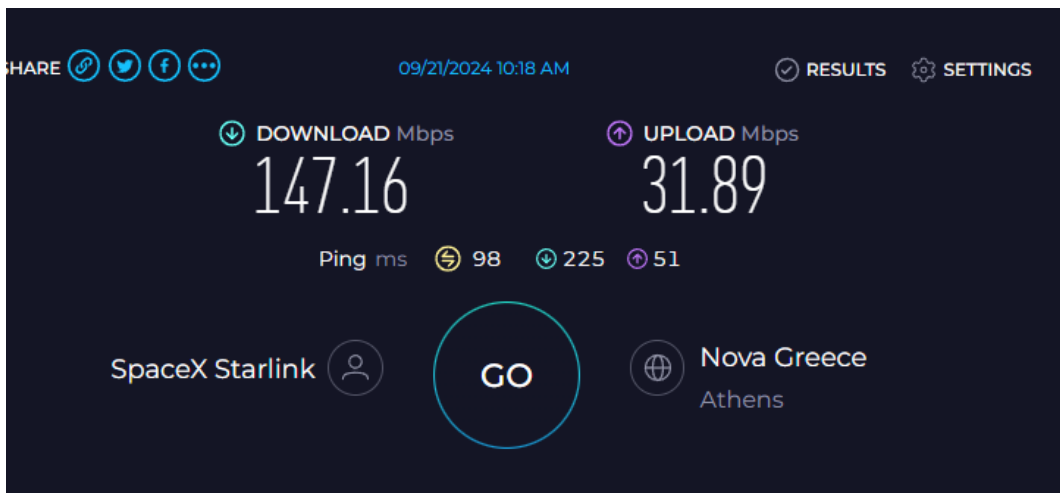
Υποσύστημα 3ο: Σταθμός βάσης και Κωδικοποίηση δεδομένων με το λογισμικό OBS

Τα κύρια στοιχεία που αποτελούσαν το σταθμό βάσης ήταν δυο: α) ο κεντρικός υπολογιστής, ο οποίος ανέλαβε τον φόρτο και την διαχείριση της ζωντανής σύνδεσης και β) το Starlink, που εξυπηρετούσε αρκετές από τις προϋποθέσεις που τέθηκαν, όπως είναι για παράδειγμα η παροχή διαδικτύου σε τοποθεσίες μακριά από τον αστικό ιστό, με εφήμερες εγκαταστάσεις, συνδυάζοντας παράλληλα ταχύτητα, αξιοπιστία και χαμηλή καθυστέρηση [51]. Ο Η/Υ που χρησιμοποιήθηκε διέθετε επεξεργαστή Ryzen 5, 6 πυρήνων με συχνότητα 3.6GHz και μνήμη RAM 16 GB 3200MHz, εξασφαλίζοντας υψηλή απόδοση κατά τη διάρκεια λειτουργίας. Ακόμη, η κάρτα γραφικών GTX 1660 της Gigabyte που διέθετε, χρησιμοποιήθηκε για την κωδικοποίηση των δεδομένων κατά την διάρκεια της ζωντανής μετάδοσης, αποφορτίζοντας από την πίεση το υπόλοιπο σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα, στον υπολογιστή που χρησιμοποιήθηκε, εγκαταστάθηκε το δωρεάν λογισμικό OBS για τη διαχείριση του live streaming. Μέσα από το OBS πραγματοποιήθηκε η εναλλαγή των καμερών και η χρήση γραφικών στοιχείων. Το OBS, χάρη στις πολλαπλές δυνατότητες που προσφέρει, χρησιμοποιήθηκε σαν encoder για την κωδικοποίηση των δεδομένων πριν την αποστολή τους στο διαδίκτυο. Συγκεκριμένα, το OBS χειρίστηκε την μετάδοση των δεδομένων προς το cloud, καθώς συνδέθηκε με έναν custom SRT server για την πραγματοποίηση της ζωντανής μετάδοσης. Η επικοινωνία μεταξύ της πλατφόρμας και του OBS πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του πρωτοκόλλου SRT. Η παραμετροποίησή του παρουσιάζεται στο Παράρτημα Β. Στην Εικόνα 4-4 φαίνεται ο χειρισμός του live stream μέσα από το λογισμικό του OBS και ακολουθεί η Εικόνα 4-5 με τη στιγμιαία μέτρηση της ταχύτητας της σύνδεσης μέσω Starlink.



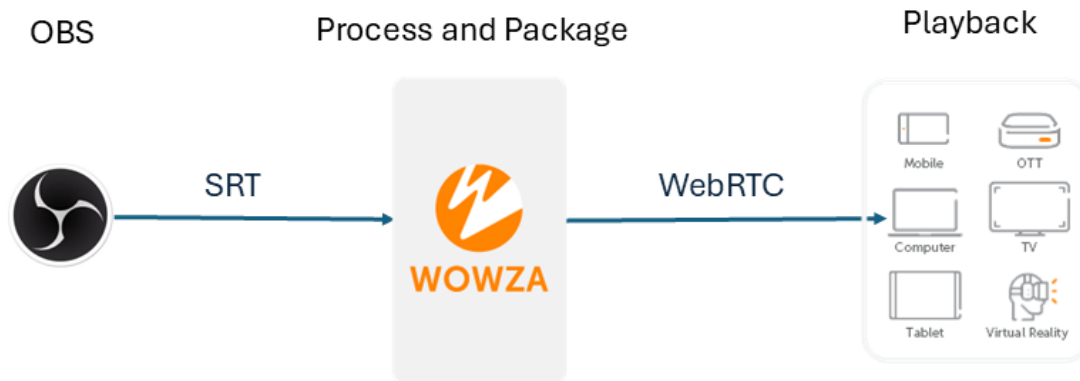
Εικόνα 4-4: Χειρισμός live μέσω εικόνων.



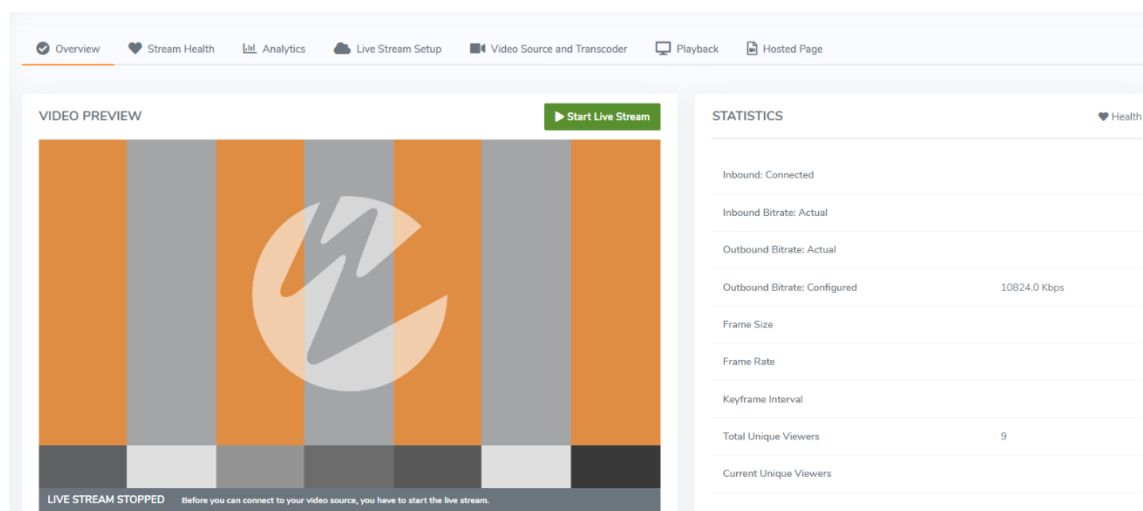
Εικόνα 4-5: Μέτρηση ταχύτητας σύνδεσης.

Υποσύστημα 4ο: Διαμόρφωση της Cloud-Based πλατφόρμας Wowza

Για την υλοποίηση του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής, χρησιμοποιήθηκε το Wowza Video, που είναι μια πλήρως εξοπλισμένη πλατφόρμα streaming στο cloud. Η επιλογή αυτή έγινε καθώς δεν απαιτείται η ύπαρξη φυσικού server και η εγκατάσταση λογισμικών αλλά αντιθέτως προσφέρει μια πιο ευέλικτη, απλή και οικονομική λύση βασιζόμενη στο cloud για τέτοιου είδους εκδηλώσεις. Η πλατφόρμα λειτουργεί ως ενδιάμεσος κόμβος, μεταξύ του σταθμού βάσης και της αναπαραγωγής βίντεο από κάποιο player. Αυτό το βήμα είναι ίσως και το πιο σημαντικό καθώς εδώ πραγματοποιείται η τελική επεξεργασία των δεδομένων πριν αυτά γίνουν διαθέσιμα στους χρήστες. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-6, η κωδικοποιημένη ροή φτάνει στην πλατφόρμα χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο SRT σαν είσοδο (Ingest). Από εκεί ξεκινάει μια σειρά διαδικασιών με στόχο τη βελτιστοποίηση της εμπειρίας του χρήστη κατά την προβολή σε μια ποικιλία συσκευών και ταχυτήτων σύνδεσης. Η περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων αφορά την μετακωδικοποίησή (transcoding) του, την μείωση της ουράς (buffer) και την δημιουργία διαφορετικών αναλύσεων video για πληθώρα συσκευών. Προκειμένου να επιτύχει το σύστημα μετάδοσης χαμηλής καθυστέρησης και αδιάκοπης λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιείται ένα διαφορετικό πρωτόκολλο κατά την έξοδο (egress) των δεδομένων, το WebRTC.



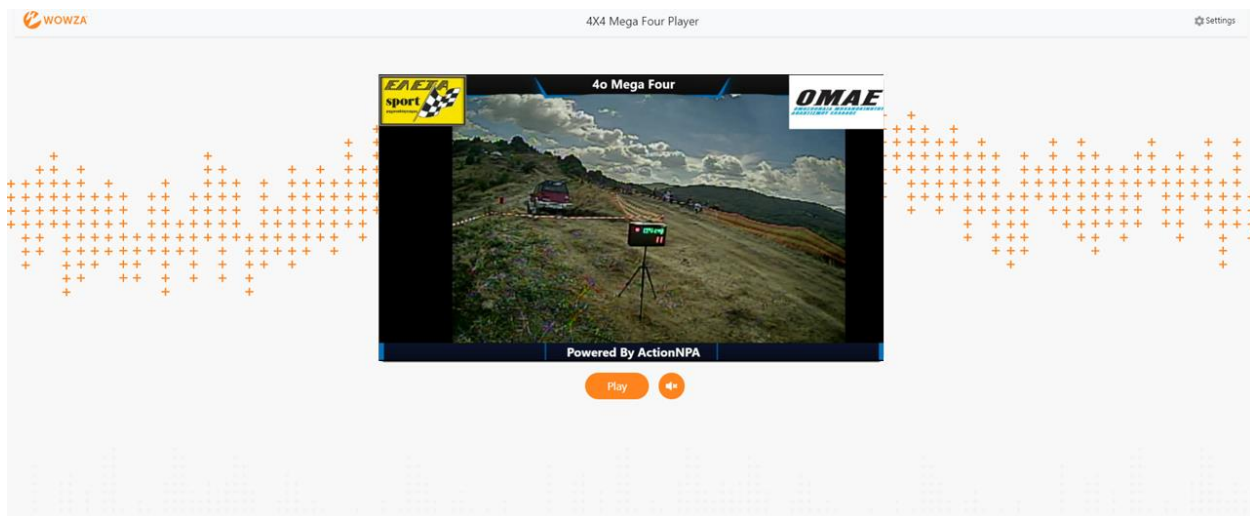
Εικόνα 4-6: Wowza transmuxing.



Εικόνα 4-7: Διεπαφή Wowza.

Υποσύστημα 5ο: Προβολή βίντεο (Video Playback)

Τελευταίο βήμα για το προτεινόμενο σύστημα είναι η χρήση online video player για την αναπαραγωγή βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Η αναπαραγωγή του βίντεο πραγματοποιείται στην πλατφόρμα Wowza και συγκεκριμένα στο WebRTC player που προσφέρει. Η διαμόρφωση του Wowza WebRTC player γίνεται με την επεξεργασία ορισμένων παραμέτρων (credentials) μέσα από την ίδια την πλατφόρμα που αφορούν την κωδικοποίηση και το πρωτόκολλο επικοινωνίας. Με την ολοκλήρωση της διαμόρφωσης δημιουργείται ένα μοναδικό URL link το οποίο και διαμοιράζεται στους χρήστες για την προβολή του βίντεο. Η επεξεργασία των συγκεκριμένων παραμέτρων διασφαλίζει την αδιάκοπη, ασφαλή και με χαμηλή καθυστέρηση παρακολούθηση βίντεο. Στη συνέχεια, ακολουθεί ένα στιγμιότυπο (Εικόνα 4-8) από την αναπαραγωγή του βίντεο της ζωντανής μετάδοσης μέσα από το Wowza WebRTC Player.



Εικόνα 4-8: Στιγμιότυπο από την αναπαραγωγή του βίντεο στο Wowza WebRTC Player.

4.2 Έλεγχος λειτουργικότητας συστήματος

Σε προηγούμενες δοκιμές για την ανάπτυξη του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής, εξετάστηκαν διαφορετικές προσεγγίσεις και δοκιμάστηκαν ορισμένα από τα πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα επικοινωνίας, όπως και σύγχρονες πλατφόρμες που υποστηρίζουν την ζωντανή ροή, με σκοπό την αξιολόγηση της λειτουργικότητας και την ποιότητα της μετάδοσης. Αρχικά, η επιλογή των πρωτοκόλλων RTMP και HLS φάνηκε η εύκολη λύση για τη μεταφορά των δεδομένων από και προς τις διάφορες πλατφόρμες όπως το YouTube και το WPStream. Ωστόσο, παρά την ευκολία χρήσης και την υποστήριξη από πολλαπλές πλατφόρμες και συσκευές τελικών χρηστών, παρατηρήθηκαν μεγάλες καθυστερήσεις στον χρόνο μετάδοσης των δεδομένων, που δεν ικανοποιούσαν τις απαιτήσεις του συστήματος για ζωντανή ροή σε πραγματικό χρόνο. Αυτό οφείλονταν κυρίως στους μεγάλους buffer που χρησιμοποιούσαν τα πρωτόκολλα για σταθερή μετάδοση, αλλά και στο ότι οι πλατφόρμες διαχειρίζονταν τα δεδομένα πριν αυτά προβληθούν στους τελικούς χρήστες. Ακόμη, η αρχική επιλογή καμερών 4G, που βασίζονταν στο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας παρουσίασε ορισμένους περιορισμούς, σε περιοχές με ασθενές σήμα, αυξημένη κινητικότητα ή υπερφόρτωση δικτύου λόγω μεγάλου αριθμού χρηστών. Οι περιορισμοί αυτοί είχαν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ποιότητας μετάδοσης και τις συχνές απώλειες σύνδεσης.

Έχοντας λάβει γνώση των παραπάνω, η σχεδίαση και υλοποίηση του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής πραγματοποιήθηκε με γνώμονα την χαμηλή καθυστέρηση, αξιόπιστη και συνεχή μετάδοση δεδομένων από και προς την πλατφόρμα. Η επιλογή του πρωτοκόλλου SRT για μετάδοση χαμηλής καθυστέρησης και η παραμετροποίηση της πλατφόρμας Cloud Wowza για προβολή στους τελικούς χρήστες μέσω του video player που προσφέρει, σε συνδυασμό με την χρήση μικροκυματικών ζεύξεων για την μεταφορά των δεδομένων από τις κάμερες μέχρι τον σταθμό βάσης, αποτέλεσε την καλύτερη επιλογή για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου συστήματος live streaming χαμηλού κόστους και χαμηλής καθυστέρησης.

4.3 Αξιολόγηση Συστήματος

Για να πραγματοποιηθεί η αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής, είναι απαραίτητο να ληφθούν ορισμένες μετρήσεις κατά την λειτουργία του υπό κανονικές συνθήκες ή υπό συνθήκες υψηλού φόρτου. Οι μετρικές που χρησιμοποιούνται είναι ποσοτικές μετρήσεις που αξιολογούνται για την εκτίμηση και την παρακολούθηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του συστήματος. Συνήθως, παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τη συμπεριφορά του συστήματος, ως προς την ταχύτητα, την καθυστέρηση και το εύρος ζώνης [52]. Η διαδικασία της αξιολόγησης περιλαμβάνει τα αποτελέσματα των μετρήσεων που συλλέχθηκαν κατά τη λειτουργία του συστήματος. Σκοπός της ανάλυσης είναι η αξιολόγηση του συστήματος και η διερεύνηση των δυνατοτήτων και ορίων του. Οι μετρήσεις μπορούν να προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες που θα βοηθήσουν στην βελτιστοποίηση του συστήματος και σε μελλοντικές αναβαθμίσεις.

4.3.1 Μετρικές

Για την αξιολόγηση του συστήματος μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μετρικές που αφορούν την απόδοσή του. Οι μετρικές που ακολουθούν εκφράζουν την ποιότητα του βίντεο.

- *Καθυστέρηση (Latency)*: Υποδεικνύει τον χρόνο που απαιτείται για να μεταδοθούν τα δεδομένα από ένα σημείο σε ένα άλλο [53].
- *Εύρος Ζώνης (Bandwidth)*: Το εύρος ζώνης εκφράζει τη μέγιστη ποσότητα δεδομένων που μπορούν να μεταδοθούν μέσα από μια σύνδεση μια δεδομένη χρονική στιγμή. Συνήθως αναφέρεται στον αριθμό των bits, Kbits, Mbits, ή Gbits που μπορούν να μεταδοθούν σε ένα δευτερόλεπτο. Δηλαδή, εκφράζει τη μέγιστη χωρητικότητα του καναλιού μετάδοσης [55].
- *Throughput*: Αναφέρεται στον πραγματικό όγκο δεδομένων που περνούν μέσω της σύνδεσης από τον κόμβο Α στον κόμβο Β μια δεδομένη χρονική στιγμή. Απλούστερα, μπορεί να χαρακτηριστεί ως ο ρυθμός μεταφοράς με τον οποίο ταξιδεύουν τα δεδομένα από ένα σημείο σε ένα άλλο και μετράται σε kbps [52].
- *Stream Health*: Χρησιμοποιείται για παρακολούθηση (monitoring) της υγείας της ροής στην πλατφόρμα Wowza. Περιλαμβάνει τις ακόλουθες επιμέρους μετρικές:
 - *Inbound Bitrate*: Ο πραγματικός ρυθμός της ροής καθώς ταξιδεύει από τον κωδικοποιητή μέχρι την πλατφόρμα.
 - *Outbound Bitrate*: Ο πραγματικός ρυθμός μετάδοσης της ροής από την πλατφόρμα προς τους χρήστες.
 - *Frame Rate*: Ο ρυθμός ανανέωσης βίντεο, καρέ ανά δευτερόλεπτο.
 - *Keyframe Interval*: Ο αριθμός των καρέ βίντεο που συμπίεζονται σε μια ομάδα εικόνων στον μετακωδικοποιητή.

4.3.2 Αποτελέσματα Μετρήσεων

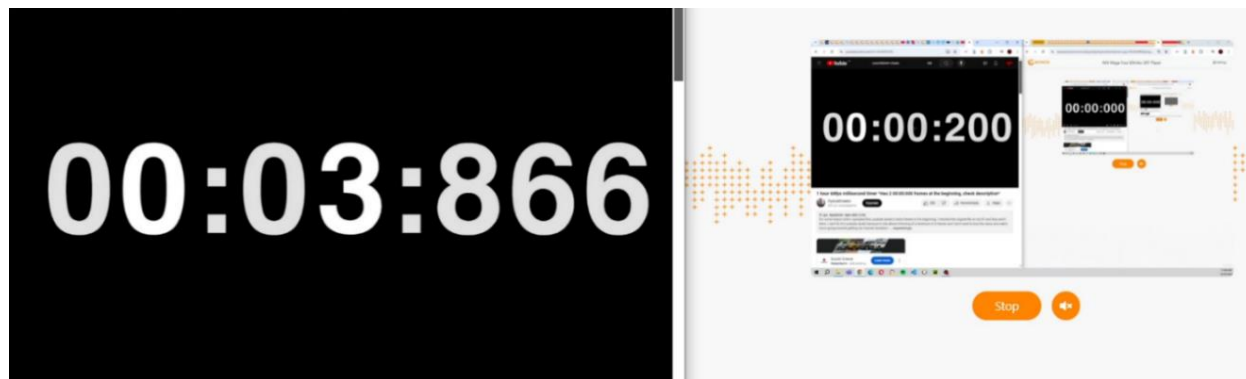
Υπενθυμίζεται ότι για την υλοποίηση του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής χρησιμοποιήθηκε το Wowza Cloud το οποίο διαθέτει την ικανότητα συλλογής μετρήσεων στην πλατφόρμα του. Ακόμη, τονίζεται η χρήση της H.264 κωδικοποίησης βίντεο και η χρήση των πρωτοκόλλων SRT ως ingest και WebRTC ως egress των δεδομένων από και προς την πλατφόρμα αντίστοιχα. Εκτός από τη συλλογή στατιστικών με τη βοήθεια της πλατφόρμας Wowza, εφαρμόζονται και άλλοι μηχανισμοί για το σκοπό αυτό.

Παρακάτω ακολουθούν οι μετρικές που επιλέχθηκαν για την αξιολόγηση του συστήματος. Η επιλογή τους έγινε ώστε να παρέχουν μια πιο σαφή εικόνα της λειτουργίας του συστήματος κάτω από διαφορετικές συνθήκες που θα συζητηθούν στη συνέχεια.

A. Καθυστέρηση

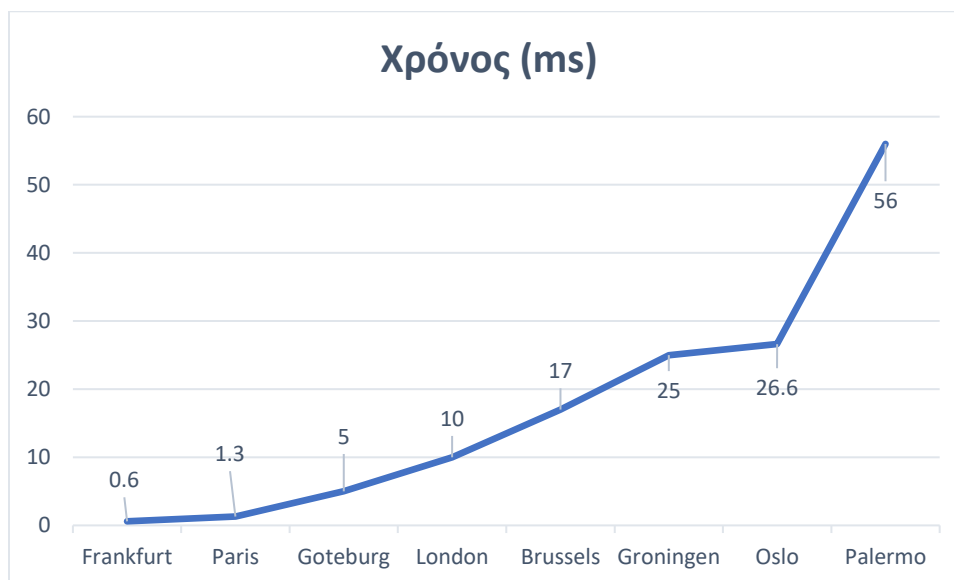
Υπάρχουν δυο τρόποι όπου μετράται η καθυστέρηση στην συγκεκριμένη υλοποίηση. Ο πρώτος τρόπος αφορά την καθυστέρηση από άκρο-σε-άκρο (end-to-end delay) και πραγματοποιείται με την βοήθεια ρολογιού οθόνης [54], ενώ ο δεύτερος τρόπος αφορά την μέτρηση της καθυστέρησης από την πλατφόρμα μέχρι τους τελικούς χρήστες (platform-to-end-user delay) και πραγματοποιείται με τη χρήση του εργαλείου ring.

Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη μέθοδος μετρά την καθυστέρηση από την προβολή της εικόνας στο λογισμικό OBS που χρησιμοποιείται ως κωδικοποιητής, μέχρι την ζωντανή προβολή στην πλατφόρμα αναπαραγωγής. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της καθυστέρησης και τη λήψη τυχαίων στιγμιότυπων κατά τη διάρκεια της ζωντανής σύνδεσης όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-9. Συγκεκριμένα, κάθε στιγμιότυπο διέθετε ένα χρονόμετρο με αύξουσα τιμή (αριστερή πλευρά) και την πλατφόρμα αναπαραγωγής του βίντεο (δεξιά πλευρά). Έπειτα γινόταν η αφαίρεση των δυο τιμών και το αποτέλεσμα προστίθονταν με τις υπόλοιπες τιμές [54]. Το συνολικό νούμερο, διαιρούταν δια το πλήθος των τιμών των τυχαίων στιγμιότυπων και έτσι υπολογίστηκε η μέση καθυστέρηση ~ 3.5 δευτερόλεπτα. Η μέτρηση της καθυστέρησης πραγματοποιήθηκε με Buffer 1 sec.



Εικόνα 4-9:Υπολογισμός καθυστέρησης με καταγραφή ρολογιού οθόνης.

Η δεύτερη μέθοδος αφορούσε τη μέτρηση της καθυστέρησης με τη χρήση του online εργαλείου ITRS uptrends²⁰. Το συγκεκριμένο εργαλείο έκανε ping στο video player που υποστηρίζει η πλατφόρμα από διαφορετικές ευρωπαϊκές πόλεις με σκοπό να αναδειχθούν οι μέγιστες και ελάχιστες καθυστερήσεις στις διαφορετικές περιοχές. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-10 που ακολουθεί, η πόλη της Φρανκφούρτης είχε τον μικρότερο χρόνο απόκρισης, ενώ στο Παλέρμο παρατηρείται ο υψηλότερος χρόνος απόκρισης.



Εικόνα 4-10: Εκτίμηση μέσης καθυστέρησης για διάφορες ευρωπαϊκές πόλεις.

B. Χρόνος Επεξεργασίας (Processing Time)

Ο χρόνος επεξεργασίας εκφράζει τον χρόνο μετακωδικοποίησης της ροής στην πλατφόρμα [56]. Στην Εικόνα 4-11 που ακολουθεί φαίνεται η συνολική διάρκεια της ζωντανής ροής σε 6 διαφορετικές χρονικές στιγμές. Οι πρώτες δυο γραμμές αφορούν δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατά την διαμόρφωση της πλατφόρμας, ενώ οι τρεις τελευταίες παρουσιάζουν τον χρόνο μετακωδικοποίησης που πραγματοποιήθηκε το διήμερο του αγώνα.

²⁰ Το ITRS uptrends είναι ένα διαδικτυακό εργαλείο που βοηθά στον έλεγχο και την βελτιστοποίηση της απόδοσης των ιστοσελίδων, ενώ ακόμη παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την συμπεριφορά των χρηστών μέσα σε αυτές [57].

STREAM PROCESSING TIME

Start Time	End Time	Hours Used
20 September 2024 12:06 PM EEST by Thodoris Rizos	20 September 2024 03:13 PM EEST by Thodoris Rizos	3h 6m 38s
20 September 2024 10:48 PM EEST by Thodoris Rizos	20 September 2024 11:17 PM EEST by System Idle Timeout	29m 14s
21 September 2024 10:20 AM EEST by Thodoris Rizos	21 September 2024 10:30 AM EEST by Thodoris Rizos	10m 9s
21 September 2024 10:30 AM EEST by Thodoris Rizos	21 September 2024 05:36 PM EEST by Thodoris Rizos	7h 6m 10s
22 September 2024 09:58 AM EEST by Thodoris Rizos	22 September 2024 02:38 PM EEST by Thodoris Rizos	4h 39m 35s
Total Stream Processing Time:		15h 31m 46s

Εικόνα 4-11: Χρόνος Επεξεργασίας .

Γ. Bitrate

Το Video bitrate αναφέρεται στην ποσότητα των βίντεο δεδομένων που μεταφέρεται μέσα από μια σύνδεση μια δεδομένη χρονική στιγμή. Συνήθως, όσο μεγαλύτερο είναι το bitrate, τόσο καλύτερη είναι και η ποιότητα του βίντεο. Ωστόσο, για να μπορέσει να υποστηριχθεί η υψηλή ποιότητα, είναι απαραίτητη μια ικανοποιητική ταχύτητα σύνδεσης στο διαδίκτυο. Η μονάδα μέτρησης του bitrate είναι τα bits per second (bps) και συχνά αναφέρεται ως η ταχύτητα μετάδοσης των δεδομένων κάθε δευτερόλεπτο.

Στην εργασία τόσο ο κωδικοποιητής, όσο και η πλατφόρμα διαχείρισης της ζωντανής ροής (Wowza video), ρυθμίστηκαν με το ίδιο bitrate. Αυτό συνέβη για να επιτευχθεί μια σταθερή και αξιόπιστη σύνδεση μεταξύ των δύο, περιορίζοντας το ενδεχόμενο μειωμένης απόδοσης ή συχνών διακοπών της ροής. Ένα υψηλό bitrate δεν είναι πάντα η λύση. Ο ρυθμός bitrate επιλέγεται με βάση: α) την ταχύτητα σύνδεσης, β) τα frames per second (fps), γ) την ανάλυση προβολής και δ) τον κωδικοποιητή [58]. Στην παρακάτω Εικόνα 4-12 παρουσιάζονται οι προτεινόμενες ρυθμίσεις κωδικοποιητή στο Wowza video, ενώ ακολουθεί και ο Πίνακας 4-4²¹ με 4 διαφορετικούς ρυθμούς, όπου αντιστοιχεί το throughput κάθε περίπτωσης. Ακόμη φαίνεται και η καθυστέρηση μέσης περίπτωσης που είναι 3.62 δευτερόλεπτα, ενώ στην Εικόνα 4-13 παρουσιάζεται το throughput για την εξερχόμενη και εισερχόμενη ροή δεδομένων από και προς την πλατφόρμα Wowza.

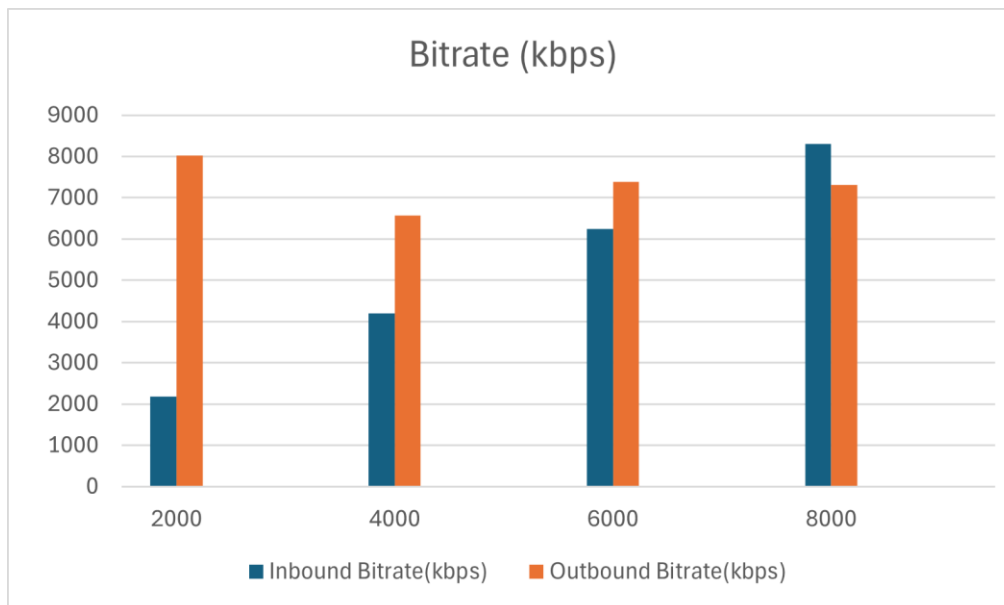
²¹ Το bitrate που ορίζεται στο OBS αφορά το μέσο όρο των εισερχόμενων δεδομένων στην πλατφόρμα. Στη πράξη, το εισερχόμενο bitrate μεταβάλλεται ως προς τις διάφορες παραμέτρους όπως το overhead των πρωτοκόλλων, το keyframe και το buffering.

Video Resolution (pixels)	Video Frame (frames per second)	Recommend Video Bitrate (kilobytes per second)	Recommended Upload Speed (megabytes per second)
720p	30-50 fps	1,024-1,600 kbps	Not Specified
1080p	30-60 fps	2,640-12,000 kbps	Not Specified

Εικόνα 4-12: Προτεινόμενες ρυθμίσεις κωδικοποιητή Wowza video.

Πίνακας 4-4: Πίνακας Bitrate.

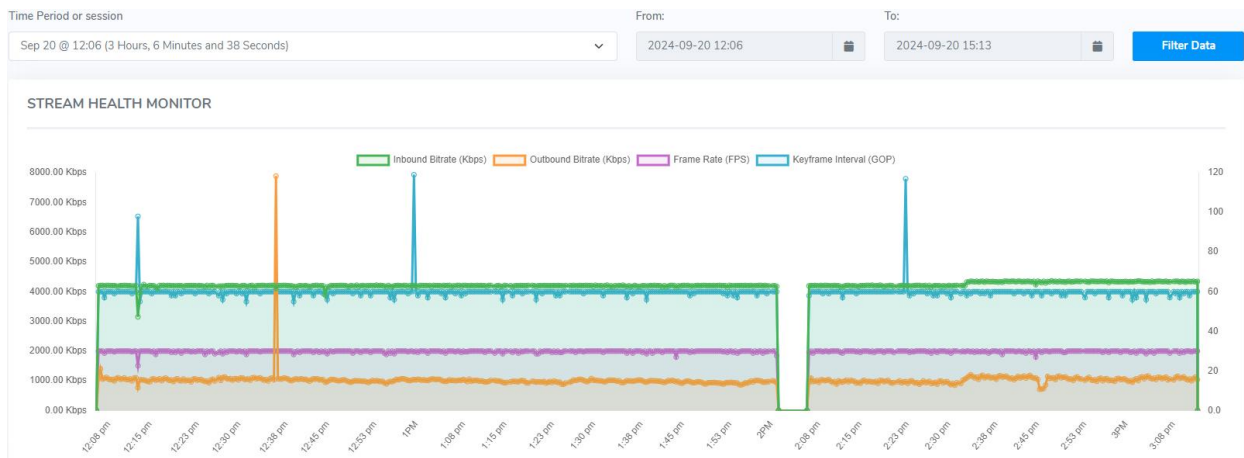
Bitrate	Καθυστέρηση	Throughput
2000kbps	3.6 sec	Inbound Bitrate: 2176.9 kbps Outbound Bitrate: 8024.8 kbps
4000kbps	3.72 sec	Inbound Bitrate: 4197.6 kbps Outbound Bitrate: 6571.6 kbps
6000kbps	3.56 sec	Inbound Bitrate: 6240.8 kbps Outbound Bitrate: 7379.2 kbps
8000kbps	3.6 sec	Inbound Bitrate: 8296.6 kbps Outbound Bitrate: 7314.6 kbps



Εικόνα 4-13: Throughput για τις διάφορες τιμές bitrate.

Δ. Stream Health με ένα χρήστη

Το stream health χρησιμοποιείται για παρακολούθηση της υγείας της ροής με σκοπό την ανάδειξη της σταθερότητας και της αποτελεσματικότητας του συστήματος υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Στις μετρήσεις που ακολουθούν παρουσιάζεται το γράφημα Stream Health (Εικόνα 4-14) που απεικονίζει την ροή των δεδομένων από και προς την πλατφόρμα όταν την ζωντανή ροή παρακολουθούσε μόνο ένας χρήστης.



Εικόνα 4-14: Stream Health ενός χρήστη.

Με πράσινο χρώμα φαίνεται η ροή των δεδομένων που εισέρχεται στην πλατφόρμα της Wowza να είναι σταθερή και λίγο μεγαλύτερη από τα 4.000kbps, σε αντίθεση με τον ρυθμό των δεδομένων εξόδου που βρίσκεται γύρω στα 1.000kbps και παρουσιάζεται με πορτοκαλί χρώμα. Κατά την χρονική στιγμή 2pm με 2:08pm ο υπολογιστής του συστήματος βγήκε εκτός λειτουργίας με αποτέλεσμα να διακοπεί η ζωντανή μετάδοση όπως φαίνεται και στο κενό που υπάρχει στην γραφική παράσταση. Αυτό συμβαίνει διότι με την αποσύνδεση του κωδικοποιητή από την πλατφόρμα οι τιμές του Wowza που ανανεώνεται κάθε 20 δευτερόλεπτα εμφανίζονταν ως μηδενικές. Ακόμη, κατά τη χρονική περίοδο που φαίνεται στην παραπάνω εικόνα, παρουσιάζονται οι τιμές των Frames Per Second (FPS) και keyframe interval. Τα FPS δηλώνουν τον αριθμό των καρέ βίντεο που μεταδίδονται ανά δευτερόλεπτο, ενώ το keyframe interval καθορίζει τον αριθμό των καρέ που συμπίεζονται σε μια ομάδα εικόνων (GOP) στον μετακωδικοποιητή. Καθ' όλη τη διάρκεια της ροής, οι τιμές των δυο παραμέτρων παραμένουν σταθερές και ίσες με τις αντίστοιχες τιμές που έχουν οριστεί στον κωδικοποιητή. Στην Εικόνα 4-15 που ακολουθεί παρουσιάζεται το συνολικό ποσό δεδομένων εξόδου που μεταδόθηκαν από την πλατφόρμα με προορισμό το video player του χρήστη. Η συνολική κατανάλωση για συνθήκες χαμηλής κινητικότητας φτάνουν τα 7.92GB.

EGRESS

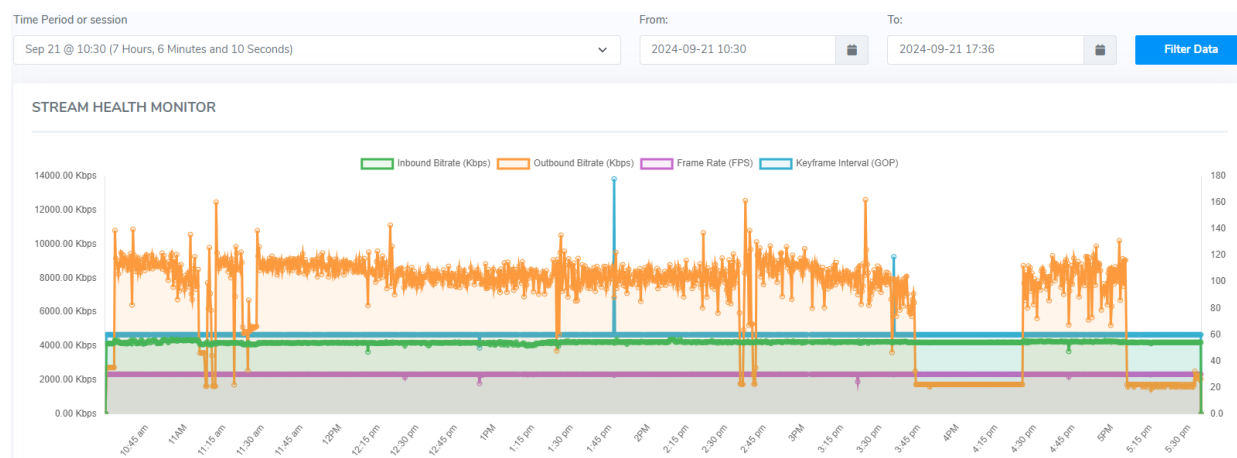
Start Time	End Time	Amount Used
20 September 2024 12:06 PM EEST	20 September 2024 03:13 PM EEST	7.57 GB
20 September 2024 10:48 PM EEST	20 September 2024 11:17 PM EEST	0.34 GB
Total Egress:		7.92 GB

Εικόνα 4-15: Κατανάλωση δεδομένων ενός χρήστη.

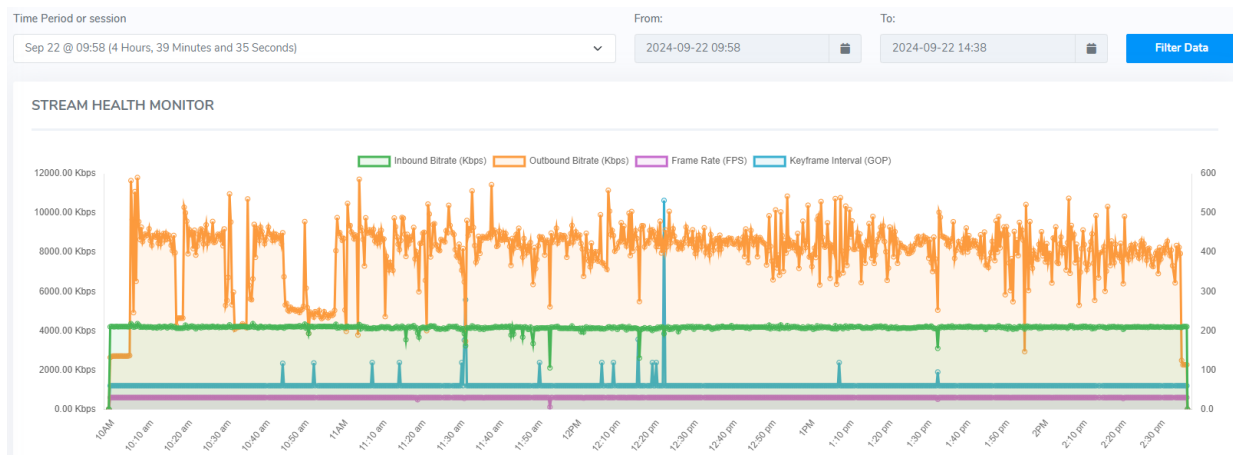
E. Stream Health με πολλαπλούς χρήστες

Με την αύξηση των χρηστών που παρακολουθούσαν τη ζωντανή μετάδοση, οι απαιτήσεις για περισσότερους πόρους και επεξεργασία αυξήθηκαν σημαντικά κατά την λειτουργία του συστήματος. Το στάδιο αυτό αφορά τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του αγώνα. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στα γραφήματα Stream Health και από τις δυο ημέρες του αγώνα. Επίσης, παρουσιάζεται και το συνολικό ποσό των δεδομένων που μεταδόθηκαν από την πλατφόρμα με τελικό προορισμό τους χρήστες.

Στις εικόνες που ακολουθούν (Εικόνα 4-16 και Εικόνα 4-17), με πορτοκαλί χρώμα παρουσιάζεται η ροή των δεδομένων που στάλθηκαν από την πλατφόρμα με προορισμό τον Wowza WebRTC video player. Από τα αποτελέσματα της δεύτερης ημέρας παρατηρείται ότι το bitrate εξόδου ξεπέρασε στιγμιαία τα 12.000kbps (Εικόνα 4-18). Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως ο όγκος των χρηστών που παρακολουθούσε, ήταν μεγαλύτερος την δεύτερη ημέρα. Διακρίνεται ακόμη, πως τόσο τα FPS (μοβ χρώμα), όσο και το bitrate εισόδου (Εικόνα 4-19) (πράσινο χρώμα) διατηρήθηκαν σταθερά και τις δυο ημέρες, εξαιτίας των ρυθμίσεων του κωδικοποιητή που χρησιμοποιήθηκε στο συγκεκριμένο σύστημα.



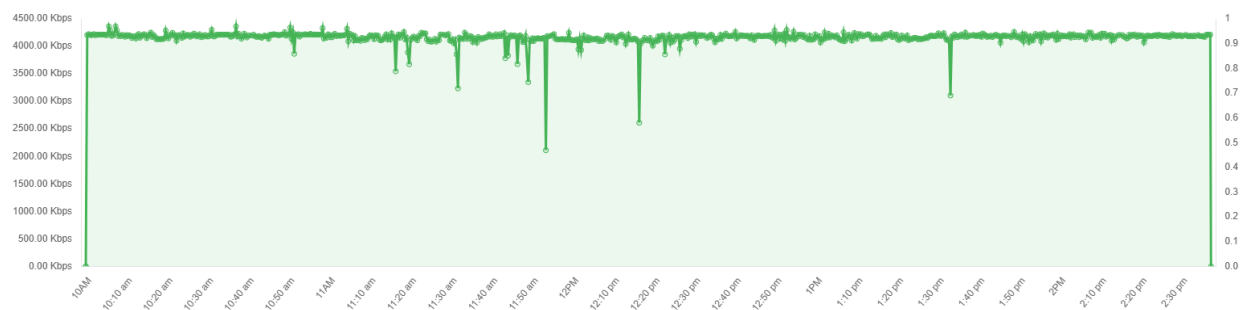
Εικόνα 4-16: Stream Health Αγώνα 1ης ημέρας.



Εικόνα 4-17: Stream Health Αγώνα 2ης ημέρας.



Εικόνα 4-18: Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων από την πλατφόρμα για το διάστημα 10:30 με 11:45.



Εικόνα 4-19: Ρυθμός μεταφοράς δεδομένων προς την πλατφόρμα για το διάστημα 10:00 με 14:45.

Στην Εικόνα 4-20 παρουσιάζεται το συνολικό ποσό δεδομένων εξόδου που έφυγαν από την πλατφόρμα με προορισμό το video player που παρακολουθούσε κάθε χρήστη. Η συνολική κατανάλωση και για τις δυο μέρες του αγώνα για συνθήκες υψηλού φόρτου έφτασαν την κατανάλωση στα 116.7GB.

EGRESS

Start Time	End Time	Amount Used
21 September 2024 10:20 AM EEST	21 September 2024 10:30 AM EEST	0.15 GB
21 September 2024 10:30 AM EEST	21 September 2024 05:36 PM EEST	65.29 GB
22 September 2024 09:58 AM EEST	22 September 2024 02:38 PM EEST	51.25 GB
Total Egress:		116.69 GB

Εικόνα 4-20: Egress υψηλού φόρτου.

4.4 Συζήτηση

Η υλοποίηση του συγκεκριμένου ολοκληρωμένου συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής βίντεο, αν και προσφέρει καλές συνολικές επιδόσεις, δεν στοχεύει στην αντικατάσταση του υπάρχοντος μοντέλου live streaming. Αντιθέτως, το προτεινόμενο σύστημα που παρουσιάζεται στην συγκεκριμένη εργασία, προσφέρει μια εναλλακτική λύση που μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορες καταστάσεις όπου δεν είναι δυνατή η εφαρμογή του κλασικού μοντέλου. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός τέτοιου συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής βίντεο μεγάλης κλίμακας, ανέδειξε την πολυπλοκότητα στη λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με την επιλογή κατάλληλων τεχνολογιών (υλικών και λογισμικών), καθώς επίσης και των λειτουργικών και μη λειτουργικών απαιτήσεων της εφαρμογής.

Στην παρούσα μελέτη, η εμπειρική δοκιμή επικύρωσε τη σημασία της επιλογής απαραίτητης υποδομής, των κατάλληλων πρωτοκόλλων και κωδικοποιήσεων, όπως επίσης και τη χρήση κεντρικής πλατφόρμας διαχείρισης αλλά και κατάλληλων λογισμικών για χαμηλή καθυστέρηση, που καθορίζουν την σταθερότητα και την αποτελεσματικότητα του συστήματος. Ακόμη, ανέδειξε περιορισμούς, στη διαχείριση των ενεργειακών αναγκών του συστήματος και την εξάρτησή του από τεχνολογικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους. Όλα τα παραπάνω, συμβάλουν στην κατανόηση του τρόπου λειτουργίας των συστημάτων ζωντανής ροής και δημιουργούν προοπτικές για περαιτέρω έρευνα.

4.4.1 Διαπιστώσεις

Η συνολική επίδοση του συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής, κρίθηκε με επιτυχία. Ο εξοπλισμός αλλά και οι τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν επέτρεψαν την αποδοτική και απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος, ενισχύοντας τη δυνατότητα αξιόπιστης μετάδοσης βίντεο σε πραγματικό χρόνο. Οι προδιαγραφές για χαμηλή καθυστέρηση και σταθερότητα καθ' όλη τη διάρκεια της παρατεταμένης λειτουργίας του συστήματος, εξασφάλισαν μια ευχάριστη εμπειρία στους χρήστες, καθώς επίσης διατήρησαν και την ποιότητα ροής στα επιθυμητά επίπεδα. Το σύστημα αυτό θέτει τις βάσεις για μελλοντικές βελτιώσεις, ενσωματώνοντας νέες τεχνολογίες που θα οδηγήσουν στην εξυπηρέτηση επιπλέον θεατών αξιοποιώντας τα νέα αλλά και διαθέσιμα δίκτυα.

4.4.2 Περιορισμοί

Το εγχείρημα της υλοποίησης ολοκληρωμένων συστημάτων μετάδοσης ζωντανής ροής, ενέχει πολλές προκλήσεις οι οποίες με μελέτη και σωστό σχεδιασμό μπορούν να αντιμετωπιστούν σε μεγάλο βαθμό. Ωστόσο, παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένοι περιορισμοί που προέκυψαν κατά την διάρκεια της λειτουργίας του προτεινόμενου συστήματος. Παρά την επιτυχημένη ανάπτυξη και λειτουργία κατά την μετάδοση, το σύστημα αντιμετώπισε ορισμένες προκλήσεις που αφορούσαν τεχνολογικά, λειτουργικά και περιβαλλοντικά ζητήματα.

A. Τεχνολογικοί Περιορισμοί

- *Ποιότητα σήματος:* Η εξασφάλιση οπτικής επαφής (LOS) μεταξύ κάθε ζεύγους πομπού-δέκτη είναι κρίσιμη για την διασφάλιση της ποιότητας του βίντεο. Η τοποθέτηση των συσκευών (VTX-VRX) όπου δεν υπάρχει οπτική επαφή μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποβάθμιση της ποιότητας.

B. Περιβαλλοντικοί Περιορισμοί

- *Καιρικές συνθήκες:* Κατά τη μελέτη και στον σχεδιασμό συστημάτων είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη διάφορες περιπτώσεις καιρικών συνθηκών, όπως οι υψηλές θερμοκρασίες και η βροχή. Ωστόσο, απρόβλεπτοι παράγοντες όπως οι ισχυροί άνεμοι μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την σταθερότητα και την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος.

Γ. Λειτουργικοί Περιορισμοί

- *Απουσία ήχου και VOD:* Η έλλειψη ήχου κατά την προβολή της ζωντανής μετάδοσης και η δυνατότητα προβολής Video on Demand (VOD) περιορίζει την αλληλεπίδραση με το ενδιαφερόμενο κοινό.
- *Περιορισμένος αριθμός καμερών:* Ο αριθμός των FPV καμερών είναι περιοριζόμενος αφού η χρήση περισσότερων συστημάτων μετάδοσης με λειτουργία στα 5.8GHz έχει ως αποτέλεσμα παρεμβολές από γειτονικά σήματα.
- *Τροφοδοσία:* Σημαντικό περιορισμό αποτελεί η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας UPS που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία των ασύρματων συστημάτων.
- *Επεκτασιμότητα:* Η επεκτασιμότητα αφορά κυρίως τον αριθμό των θεατών που παρακολουθούν ταυτόχρονα την ζωντανή ροή από τον WebRTC Player της Wowza. Ο αριθμός αυτός περιορίζεται στα 300 άτομα και αφορά κυρίως την υποστήριξη από τον Wowza WebRTC Player.

4.4.3 Μελλοντική Εργασία

Παρά την πετυχημένη υλοποίηση του συστήματος, υπάρχουν ακόμα περιθώρια για βελτίωση και αρκετές δυνατότητες για αναβάθμιση και προσαρμογή στις νέες τεχνολογικές εξελίξεις. Οι βελτιώσεις μπορεί να αφορούν την επεκτασιμότητα του συστήματος, την χρήση εναλλακτικών τεχνολογιών, την βελτίωση των τεχνολογικών περιορισμών καθώς και την προσαρμογή στις νέες ανάγκες.

A. Βελτίωση Τεχνολογικών Περιορισμών

Επόμενο βήμα για την βελτίωση του συστήματος αποτελεί η αναβάθμιση σε ψηφιακά μέσα και συγκεκριμένα στη χρήση ψηφιακών FPV καμερών. Με αυτό τον τρόπο η ποιότητα της εικόνας κατά την μετάδοση θα βελτιωθεί σημαντικά και έτσι το σύστημα θα γίνει πιο ελκυστικό στο ευρύ κοινό.

B. Επέκταση του Συστήματος

Η υποστήριξη περισσότερων καμερών και χρηστών αποτελεί το επόμενο βήμα για το προτεινόμενο σύστημα. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερο πλήθος καμερών συνεπάγεται περισσότερη κάλυψη από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Στόχος όμως μπορεί να χαρακτηριστεί και η προβολή της ζωντανής σύνδεσης σε περισσότερα από 300 άτομα ταυτόχρονα μέσω κατάλληλου video player. Ακόμη η διερεύνηση της απόδοσης του συστήματος επικοινωνίας μεταξύ UAV και του σταθμού βάσης όπου λειτουργεί το λογισμικό OBS αποτελεί τομέα μελλοντικής διερεύνησης [60].

Γ. Εναλλακτικές Τεχνολογίες

Η αξιοποίηση διαθέσιμων ασύρματων δικτύων νέας γενιάς 4G και 5G αποτελεί μια εναλλακτική, η οποία μπορεί να επιτρέψει την ζωντανή μετάδοση χωρίς προβλήματα και παρεμβολές

Δ. Προσαρμογή σε νέες ανάγκες

Το σύστημα μπορεί να προσαρμοστεί σε ποικίλες εφαρμογές, όπως η διοργάνωση συνεδρίων, η απομακρυσμένη εργασία ή η εκπαίδευση, λαμβάνοντας υπόψιν τις απαιτήσεις που μπορούν να προκύψουν στην εκάστοτε εφαρμογή, παρέχοντας τη καλύτερη δυνατή ποιότητα εμπειρίας (QoE) στους χρήστες [61].

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ζωντανή μετάδοση δραστηριοτήτων και εκδηλώσεων μέσω του διαδικτύου τα τελευταία χρόνια αποκτά όλο και περισσότερη δημοφιλία λόγω της αμεσότητας και αυθεντικότητας που προσδίδει στο κοινό που παρακολουθεί. Η συνεχής εξέλιξη των τεχνολογιών δικτύωσης σε επίπεδο υλικού και λογισμικού βοήθησε στην αύξηση της ζήτησης για μετάδοση ζωντανής ροής και την ανάγκη κάλυψης γεγονότων ακόμη και μέσω εφήμερων υποδομών. Οι απαιτήσεις για μετάδοση βίντεο με χαμηλή καθυστέρηση και σε υψηλή ποιότητα αποτελούν απαραίτητο στοιχείο για την εξέλιξη του συστήματος, σηματοδοτώντας ένα πρωτοποριακό σύνολο που συνδυάζει νέες τεχνολογίες για την επίτευξη των στόχων του.

Η εργασία εστιάζει στην μελέτη, σχεδίαση και δημιουργία ενός καινοτόμου συστήματος μετάδοσης ζωντανής ροής βίντεο, για την κάλυψη και προβολή ενός αγώνα αυτοκινήτων, σε εξωτερικό περιβάλλον χρησιμοποιώντας εφήμερες υποδομές. Συγκεκριμένα, διερευνώνται τα βασικά (δομικά) στοιχεία όπως το υλικό και το λογισμικό, που χρησιμοποιούνται σήμερα από τους περισσότερους αρχάριους ή επαγγελματίες του χώρου, για την υλοποίηση συστημάτων live streaming. Το σύστημα συνδυάζει αναλογικές FPV κάμερες με πομπούς και δέκτες μικροκυματικών ζεύξεων για την καταγραφή και μεταφορά της εικόνας μέχρι τον σταθμό βάσης. Χρησιμοποιεί πρωτόκολλα χαμηλής καθυστέρησης για επικοινωνία μεταξύ του λογισμικού OBS και της πλατφόρμας Wowza για την διαχείριση και προβολή της ζωντανής ροής σε πραγματικό χρόνο μέσα από το Wowza WebRTC Player.

Η υλοποίηση του συστήματος αποτέλεσε μια πολύπλοκη διαδικασία που περιελάμβανε την επιλογή κατάλληλου εξοπλισμού, τη διασύνδεση των υποσυστημάτων μεταξύ τους και τη διεξαγωγή δοκιμών για την λειτουργικότητα του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες. Παρά την αδιάκοπη και αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος, υπήρξαν ωστόσο ορισμένες προκλήσεις που αποτελούν περιοριστικό παράγοντα σε μελλοντικές εφαρμογές και χρήζουν αξίες αντιμετώπισης. Οι παράγοντες αυτοί αφορούν ορισμένους τεχνολογικούς, περιβαλλοντικούς ή λειτουργικούς περιορισμούς.

Κατά την λειτουργία του συστήματος επιβεβαιώθηκαν στην πράξη οι βιβλιογραφικές αναφορές, πως η χρήση αναλογικών μέσων μπορεί να προσφέρει αποδοτικές και αξιόπιστες λύσεις στον χώρο του live streaming, με τους αντίστοιχους ωστόσο περιορισμούς. Με την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων μέτρησης επιβεβαιώθηκε η χαμηλή καθυστέρηση κατά την μετάδοση του βίντεο από άκρο-σε-άκρο του συστήματος, όπως και η απρόσκοπτη μετάδοση με οποιοδήποτε ρυθμό (bitrate), από και προς την πλατφόρμα, εφόσον υπήρχε σταθερή σύνδεση στο διαδίκτυο.

Η επιτυχημένη υλοποίηση του συστήματος, επιτρέπει την επέκτασή του, πέρα από την κάλυψη αθλητικών γεγονότων, όπως οι αγώνες αυτοκινήτων και σε περαιτέρω εφαρμογές όπως η εκπαίδευση, η απομακρυσμένη εργασία και η τηλεδιάσκεψη. Απαραίτητα βήματα που θα βοηθήσουν στην εξέλιξή του για την βελτιστοποίηση της απόδοσής του είναι η ενσωμάτωση

σύγχρονων τεχνολογιών όπως το 5G, η χρήση ψηφιακών μέσων και η σταδιακή κλιμάκωσή του, καθώς επίσης και η αξιολόγηση της εμπειρίας χρήσης από τους θεατές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Foy C. (2024). 24 Noteworthy Video Consumption Statistics for 2024. Ανακτήθηκε από: <https://twicsy.com/blog/video-consumption-statistics>
- [2] Connell A. (2024). 34 Live Streaming Statistics (2024 Guide). Ανακτήθηκε από: <https://adamconnell.me/live-streaming-statistics>
- [3] Giertz, J., Weiger, W. H., Töhrönen, M., & Hamari, J. (2020). Understanding the what and how of successful social live streaming.
- [4] Ahmed, A. (2023). Live streaming for individuals and Businesses; Case study of E-sports as a game platform.
- [5] Grand View Research. (χ.χ.). Live Streaming Market Size & Trends. Ανακτήθηκε από: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/live-streaming-market-report>
- [6] Ruether T. (2021). The Complete Guide to Live Streaming. Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/blog/complete-guide-to-live-streamings>
- [7] Zayo. (2024). Connecting the Unconnected: Strategies for Carriers to Expand Networks in Rural Areas. Ανακτήθηκε από: <https://www.zayo.com/resources/connecting-the-unconnected-strategies-for-carriers-to-expand-networks-in-rural-areas>
- [8] Usifo D. (2024). Learn the Difference Between Functional and Non-Functional Requirements. Ανακτήθηκε από: <https://deeprojectmanager.com/functional-vs-non-functional-requirements>
- [9] Χαραλαμπίδης Γ. Απαιτήσεις λογισμικού. Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Ανακτήθηκε από: https://www.icsd.aegean.gr/website_files/proptyxiako/736332428.pdf
- [10] Puzhevich V. (2021). Functional vs Non-Functional Requirements: The Definitive Guide. Ανακτήθηκε από: <https://scand.com/company/blog/functional-vs-non-functional-requirements>
- [11] Stemmler K. (2022). Non-Functional Requirements (with Examples). Ανακτήθηκε από: <https://khalilstemmler.com/articles/object-oriented/analysis/non-functional-requirements>
- [12] Haaraoja, A. (2022). Fundamentals of streaming: how to setup a virtual event system.
- [13] Tunturipuro, I. M. (2015). Building a low-cost streaming system: Streaming and camera operating system for live internet productions.
- [14] Babcock, R. (2017). Cloud Live Video Transfer.
- [15] Drone Nodes. (2023). What is FPV? Introduction to First Person View with Drones. Ανακτήθηκε από: <https://dronenodes.com/what-is-fpv-first-person-view-drone>
- [16] Drone Nodes. (2023). FPV Camera for Drone | Key Factors and Recommendations. Ανακτήθηκε από: <https://dronenodes.com/fpv-camera-for-drone>
- [17] Security Tech. (χ.χ.). Τα πλεονεκτήματα μιας 4g κάμερας και μιας κάμερας με ηλιακό πάνελ. Ανακτήθηκε από: <https://securitytech.gr/pleonektimata-4g-kameras-kai-solar>
- [18] Drone Nodes. (2023). How to choose VTx | FPV Video Transmitter. Ανακτήθηκε από: <https://dronenodes.com/best-vtx-fpv-video-transmitter>

- [19] Liang O. (2024). Choosing the Best VTX (Video Transmitter) for FPV Drones – The Ultimate Beginner Guide. Ανακτήθηκε από: <https://oscarliang.com/video-transmitter>
- [20] ΕΕΤΤ. (χ.χ.). Πληροφορίες. Ανακτήθηκε από: <https://www.eett.gr/docs/sychnes-erotiseis-gia-katanalotes/chrisi-fasmatos-paremvoles/plirofories-chrisi-fasmatos-paremvoles>
- [21] Drone Nodes. (2023). FPV Video Receivers. Ανακτήθηκε από: <https://dronenodes.com/fpv-video-receivers>
- [22] Mokhtar, M. I. M., Sultan, M. T. H., Shahar, F. S., Nayak, S. Y., Łukaszewicz, A., Nowakowski, M., ... & Holovatyy, A. (2023). Image Processing Systems for Unmanned Aerial Vehicle: State-of-the-art.
- [23] Drone Nodes. (2023). FPV Antenna Fundamentals. Ανακτήθηκε από: <https://dronenodes.com/fpv-antenna-for-drone>
- [24] Liang O. (2023). Maximizing Range and Penetration: Understanding Decibels (dB) and Optimizing FPV Drone Setup. Ανακτήθηκε από: <https://oscarliang.com/calculate-fpv-range>
- [25] Lombardo J. (χ.χ.). Livestreaming With Starlink: Why Resi Makes Sense. Ανακτήθηκε από: <https://resi.io/blog/live-streaming-with-starlink>
- [26] Rathee K. (χ.χ.). Comparing video streaming protocols: A comprehensive analysis. Ανακτήθηκε από: <https://sendbird.com/developer/tutorials/comparing-video-streaming-protocols-a-comprehensive-analysis>
- [27] Ruether T. (2022). Streaming Protocols: Everything You Need to Know. Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/blog/streaming-protocols>
- [28] Wowza. (χ.χ.). Wowza Video The fully featured video platform that scales with your needs. Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/video>
- [29] Ruether T. (2022). RTMP Streaming: The Real-Time Messaging Protocol Explained. Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/blog/rtmp-streaming-real-time-messaging-protocol>
- [30] Wowza. (χ.χ.). SRT Secure Reliable Transport. Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/low-latency/SRT-secure-reliable-transport>
- [31] Ruether T. (2022). What Is HLS (HTTP Live Streaming)? Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/blog/hls-streaming-protocol>
- [32] Ruether T. (2021). 5 Common WebRTC Workflows. Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/blog/common-webrtc-workflows>
- [33] Bienik, J., Uhrina, M., Kuba, M., & Vaculik, M. (2016, September). Performance of H. 264, H. 265, VP8 and VP9 compression standards for high resolutions. In *2016 19th International Conference on Network-Based Information Systems (NBiS)* (pp. 246-252). IEEE.
- [34] Red5 Team. (2024). 6 Points of Comparison for VP9, H.265, or H.264. Ανακτήθηκε από: <https://www.red5.net/blog/6-points-of-comparison-for-vp9-or-h265>

- [35] Vishwas A. (2023). Wowza: Everything you need to know. Ανακτήθηκε από: <https://www.linkedin.com/pulse/wowza-everything-you-need-know-vishwas-acharya-wknpf>
- [36] SourceForce. (χ.χ.). OBS vs. Restream vs. Wirecast vs. XSplit Broadcaster Comparison Chart. Ανακτήθηκε από: <https://sourceforge.net/software/compare/OBS-vs-Restream-vs-Wirecast-vs-XSplit-Broadcaster>
- [37] Open Broadcaster Software. (χ.χ.). OBS Studio. Ανακτήθηκε από: <https://obsproject.com>
- [38] Richards, P. W. (2021). The unofficial guide to open broadcaster software. *The Unofficial Guide to OBS*.
- [39] Starting point. (2008). What is Google Earth? Ανακτήθηκε από: https://serc.carleton.edu/introgeo/google_earth/what.html
- [40] Wowza. (χ.χ.). WebRTC Live Streaming. Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/low-latency/webrtc>
- [41] Wowza. (2024). Deliver WebRTC streams to viewers using Wowza Video Legacy. Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/docs/deliver-webrtc-streams-to-viewers-using-wowza-video>
- [42] Liang O. (2021). 5.8GHz FPV Channels & Frequency Chart (Analogue & Digital). Ανακτήθηκε από: <https://oscarliang.com/fpv-channels>
- [43] EETT. (χ.χ.). Ποια είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς εκπομπής για εφαρμογές ασύρματων δικτύων στις ζώνες 2,4GHz και 5GHz; Ανακτήθηκε από: <https://www.eett.gr/docs/sychnes-erotiseis-gia-parochoys/fasma-radiosychnotiton/wifi>
- [44] Drone-FPV-Racer. (χ.χ.). Phoenix 2 Camera Special Edition V2 By Runcam. Ανακτήθηκε από: <https://www.drone-fpv-racer.com/en/phoenix-2-camera-special-edition-v2-by-runcam-12044.html>
- [45] Aries. (χ.χ.). iFlight BLITZ 5.8GHz PIT/25mW/400mW/1000mW/2500mW MMCX VTX. Ανακτήθηκε από: <https://www.ariesrc.gr/en/video-txrx/22073-iflight-blitz-58ghz-pit25mw400mw1000mw2500mw-mmcx-vtx.html>
- [46] Reolink. (χ.χ.). Reolink Go Plus. Ανακτήθηκε από: <https://reolink.com/product/reolink-go-plus>
- [47] Aries. (χ.χ.). EWRF UVC OTG 5.8G 48ch 720*480 Diversity Audio FPV Receiver for Android Tablet Smartphone. Ανακτήθηκε από: <https://www.ariesrc.gr/en/video-txrx/20762-ewrf-uvc-otg-58g-48ch-720480-diversity-audio-fpv-receiver-for-android-tablet-smartphone.html>
- [48] Aries. (χ.χ.). RC832 Boscam FPV 5.8G 32CH Wireless AV Receiver for RC Drones. Ανακτήθηκε από: <https://www.ariesrc.gr/en/video-txrx/15247-rc832-boscam-fpv-58g-32ch-wireless-av-receiver-for-rc-drones.html>
- [49] Skroutz. (χ.χ.). Anga PS-C240 Video Capture για Laptop / PC και σύνδεση USB-A. Ανακτήθηκε από: <https://www.skroutz.gr/s/29645118/Anga-PS-C240-Video-Capture-gia-Laptop-PC-kai-syndesi-USB-A.html>

- [50] QuickLink. (χ.χ.). Introduce a remote camera source using VDO.Ninja. Ανακτήθηκε από: <https://support.quicklink.tv/hc/en-us/articles/5251769836433-Introduce-a-remote-camera-source-using-VDO-Ninja>
- [51] Michel, F., Trevisan, M., Giordano, D., & Bonaventure, O. (2022, October). A first look at starlink performance. In *Proceedings of the 22nd ACM Internet Measurement Conference* (pp. 130-136).
- [52] Lamberti A. (2023). 19 Network Metrics: How to Measure Network Performance. Ανακτήθηκε από: <https://obkio.com/blog/how-to-measure-network-performance-metrics/#network-metric-6-bandwidth>
- [53] CloudFlare. (χ.χ.). What is latency? | How to fix latency. Ανακτήθηκε από: <https://www.cloudflare.com/learning/performance/glossary/what-is-latency>
- [54] Uitto, M., & Heikkinen, A. (2021, June). Evaluation of live video streaming performance for low latency use cases in 5g. In *2021 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)* (pp. 431-436). IEEE.
- [55] Froehlich A. (2021). bandwidth (network bandwidth). Ανακτήθηκε από: <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/bandwidth>
- [56] Wowza. (2024). Usage Details page in Wowza Video Legacy. Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/docs/usage-details-page-in-wowza-video>
- [57] ITRS. (2024). Elevate performance with website and API monitoring. Ανακτήθηκε από: <https://www.itrsgroup.com/platform/uptrends>
- [58] Sydney R. W. (2022). What Is Video Bitrate (And What Bitrate Should You Use)? Ανακτήθηκε από: <https://www.wowza.com/blog/what-is-video-bitrate-and-what-bitrate-should-you-use>
- [59] Izhikevich, L., Enghardt, R., Huang, T. Y., & Teixeira, R. (2024). A Global Perspective on the Past, Present, and Future of Video Streaming over Starlink. *Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems*, 8(3), 1-22.
- [60] Munari, S., Palazzi, C. E., Quadrio, G., & Ronzani, D. (2017, June). Network traffic analysis of a small quadcopter. In *Proceedings of the 3rd Workshop on Micro Aerial Vehicle Networks, Systems, and Applications* (pp. 31-36).
- [61] Bermudez, H. F., Sanchez-Iborra, R., Arciniegas, J. L., Campo, W. Y., & Cano, M. D. (2019). Statistical validation of an LTE emulation tool using live video streaming over reliable transport protocols. *Telecommunication Systems*, 71, 491-504.

Παράρτημα Α: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της υποδομής



Εικόνα Α-1: Phoenix 2 Camera Special Edition V2 By Runcam²².

Πίνακας Α-1: Χαρακτηριστικά αναλογικής κάμερας.

Διαστάσεις	19mm*19mm*22mm (κατηγορία Micro-sized FPV)
Βάρος	8.6g
Αισθητήρας εικόνας	1/2" COMS Sensor
Shutter	Rolling Shutter
Aspect Ratio	4:3 / 16:9 Switchable
Lens	FOV D:160° H:124° V:95°@F 2.4
Ισχύς	DC 5-36V
Signal System	PAL / NTSC Switchable
Ανάλυση	1000TVL
Wide Dynamic Ranging	Global WDR
Mirror/Flip	Available
Sensitivity	10650 mV/Lux-sec
Day/Night	Color/BW/EXT/Auto
Menu Control	Cable Control
Current	200mA@5V / 80mA@12V
Housing Material	ABS

²² Πηγή: <https://www.drone-fpv-racer.com/en/phoenix-2-camera-special-edition-v2-by-runcam-12044.html>



Εικόνα Α-2: Reolink 4G Go Plus²³.

Πίνακας Α-2:Χαρακτηριστικά ψηφιακής κάμερας.

Ανάλυση	2K 4MP Full HD+
Διαθέτει	Μικρόφωνο + Ηχείο
Αυτονομία Φόρτισης	Ηλιακό πάνελ
Λειτουργία νυχτερινής όρασης	Ναι
Διαχείριση	Μέσα από την εφαρμογή Client

²³ Πηγή: <https://reolink.com/product/reolink-go-plus/>



Εικόνα Α-3: iFlight BLITZ 5.8GHz PIT/25mW/400mW/1000mW/2500mW MMCX VTX²⁴.

Πίνακας Α-3: Χαρακτηριστικά πομπού.

Βάρος	32g
Διαστάσεις	50x30x16mm
Βύσμα Κεραίας	MMCX
Ισχύς εξόδου	PIT / 25 mW / 400 mW / 1000 mW / 2500mW
Σύστημα ψύξης	Ναι
Ενσωματωμένο μικρόφωνο	Ναι
IRC Tramp πρωτόκολλο	Ναι

²⁴ Πηγή: <https://www.ariesrc.gr/en/video-txrx/22073-iflight-blitz-58ghz-pit25mw400mw1000mw2500mw-mmcx-vtx.html>



Εικόνα Α-4: EWRF UVC OTG 5.8G 48ch 720*480 Diversity Audio FPV Receiver for Android Tablet Smartphone ²⁵.

Πίνακας Α-4: Χαρακτηριστικά δέκτη.

Διαστάσεις	56x36x10mm
Σύνδεση	USB-Type C, USB
Current	260mA
Κανάλια	48
Ζώνη λειτουργίας	5.8GHz
Εύρεση αυτόματης συχνότητας λειτουργίας	Ναι

²⁵ Πηγή: <https://www.ariesrc.gr/en/video-txrx/20762-ewrf-uv-otg-58g-48ch-720480-diversity-audio-fpv-receiver-for-android-tablet-smartphone.html>



Εικόνα Α-5: RC832 Boscama FPV 5.8G 32CH Wireless AV Receiver for RC Drones²⁶.

Πίνακας Α-5: Χαρακτηριστικά δέκτη.

Βάρος	85g
Διαστάσεις	80x65x15mm
Volt	12V
Ευαισθησία	-90dbm
Current	200mA
Κανάλια	32
Ζώνη λειτουργίας	5.8GHz
Συχνότητες λειτουργίας	FR1: 5865M 5845M 5825M 5805M 5785M 5765M 5745M 5725M FR2: 5733M 5752M 5771M 5790M 5809M 5828M 5847M 5866M FR3: 5705M 5685M 5665M 5645M 5885M 5905M 5925M 5945M FR4: 5740M 5760M 5780M 5800M 5820M 5840M 5860M 5880M

²⁶ Πηγή: <https://www.ariesrc.gr/en/video-txrx/15247-rc832-boscama-fpv-58g-32ch-wireless-av-receiver-for-rc-drones.html>



Εικόνα A-6: Starlink²⁷.



Εικόνα A-7: Anga PS-C240²⁸.

Πίνακας XXX

Πίνακας A-6: Χαρακτηριστικά συσκευής ψηφιοποίησης σήματος.

Πρότυπα εισόδου	RCA και S-Video
Ανάλυση εγγραφής βίντεο	720x576(PAL) ή 720x480(NTSC)
Frames Per Second	30fps

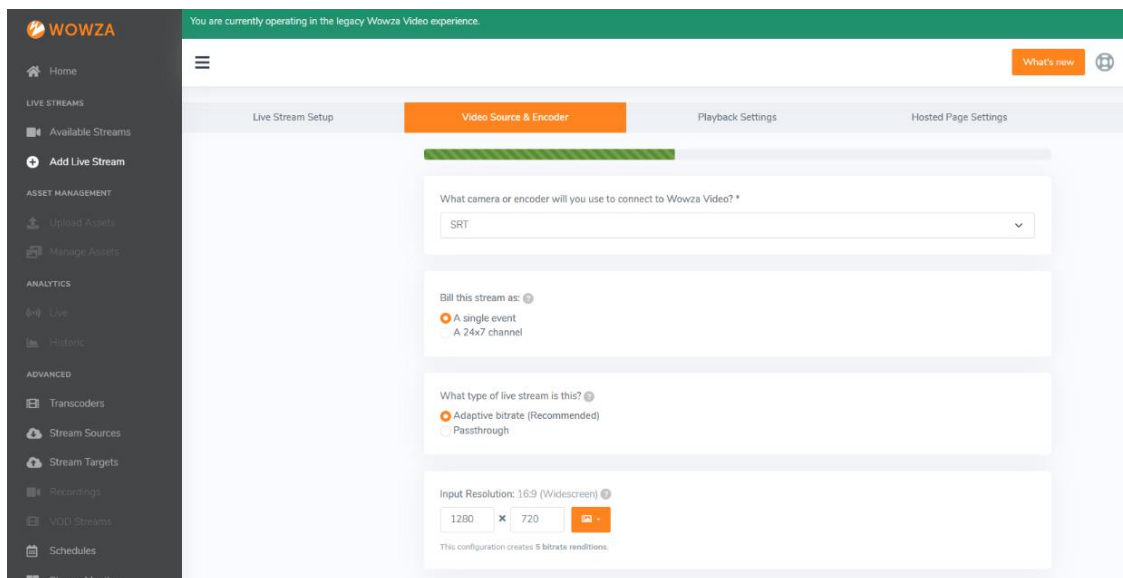
²⁷ Πηγή:<https://techsavvy.co.ke/wp-content/uploads/2024/08/Starlink-in-kenya.png>

²⁸ Πηγή:<https://www.skroutz.gr/s/29645118/Anga-PS-C240-Video-Capture-gia-Laptop-PC-kai-syndesi-USB-A.html#specs>

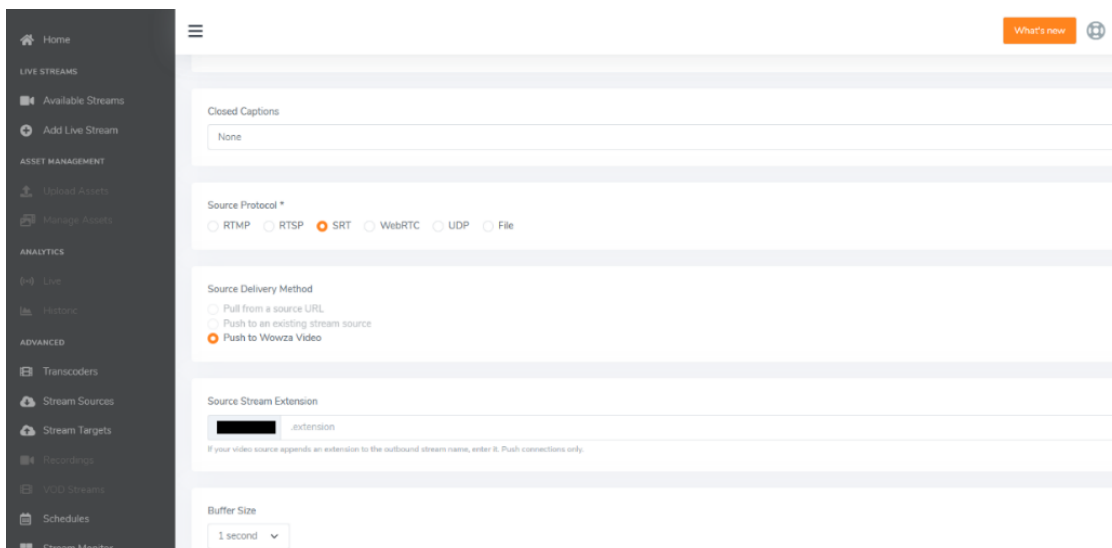
Παράρτημα Β: Παραμετροποίηση της Cloud-Based πλατφόρμας Wowza

Για τη δημιουργία και τη διαμόρφωση της Cloud-Based πλατφόρμας Wowza, που χρησιμοποιήθηκε για την υποστήριξη της ζωντανής ροής του αγώνα πραγματοποιήθηκαν τα παρακάτω στάδια:

- **Στάδιο 1^ο - Δημιουργία ζωντανής ροής:** Ρύθμιση και χρήση του πρωτοκόλλου SRT ως είσοδο δεδομένων στην πλατφόρμα.



- **Στάδιο 2^ο - Προσαρμογή μεγέθους Buffer:** Μείωση του μεγέθους από 5 δευτερόλεπτα σε 1 δευτερόλεπτο για ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης.



- **Στάδιο 3^ο - Διαμόρφωση εξόδου βίντεο:** Δημιουργία νέας εξόδου για τη ζωντανή ροή και αλλαγή της κωδικοποίησης σε H.264, με επιπλέον έλεγχο των υπόλοιπων ρυθμίσεων ώστε να ταιριάζουν με τον κωδικοποιητή (OBS).



Video Codec
☒ H.264
☐ Passthrough
☐ Disable video

Audio Codec
☐ AAC
☒ Opus
☐ Passthrough
☐ Disable audio

Video Bitrate (Kbps) *
4000

Audio Bitrate (Kbps) *
128

H.264 Profile *
High (HD only)

Frame Rate Reduction *
0 (no reduction)

Input Resolution: 16:9 (Widescreen)
1280 x 720 

- **Στάδιο 4^ο - Ρύθμιση HLS segment:** Μείωση της διάρκειας του HLS segment στα 2 δευτερόλεπτα, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης στον HLS video player. Ο HLS video player αποτέλεσε εναλλακτική επιλογή του Wowza WebRTC Player, αν και δεν χρησιμοποιήθηκε τελικά κατά την εφαρμογή του συστήματος.

HLS

Enabled	Name	Value
☐	Access control: allow origin	
☒	HLS segment duration	2
☐	Convert AMF data	☐ True ☐ False

- *Στάδιο 5^ο - Ρύθμιση WebRTC player:* Διαμόρφωση του Wowza WebRTC Player για αναπαραγωγή του βίντεο με μικρή καθυστέρηση χρησιμοποιώντας το πρωτόκολλο WebRTC.

