



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Η ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ ΤΟΥ QUIC: ΤΑΣΕΙΣ, ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΚΑΙ
ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Παρασκευή Γκαρζτώνη

Επιβλέπουσα: Σπυριδούλα Μαργαρίτη

ΕΔΙΠ, Α

Άρτα, Ιούνιος, 2026

THE ADOPTION OF QUIC: TRENDS, CHALLENGES, AND FUTURE PROSPECTS

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Τόπος, Ημερομηνία

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής

Όνομα Επίθετο,

2. Μέλος επιτροπής

Όνομα Επίθετο,

3. Μέλος επιτροπής

Όνομα Επίθετο,

© Επίθετο, Όνομα, έτος.

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.

Γκαρζώνη Παρασκευή

Υπογραφή

Περίληψη

Η συνεχής ανάπτυξη του διαδικτύου και η αυξανόμενη χρήση εφαρμογών που απαιτούν υψηλή απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και ασφαλή μεταφορά δεδομένων έχουν οδηγήσει στην ανάγκη ανάπτυξης νέων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε το πρωτόκολλο QUIC (Quick UDP Internet Connections), το οποίο σχεδιάστηκε για να βελτιώσει την απόδοση των διαδικτυακών επικοινωνιών και να αντιμετωπίσει περιορισμούς των παραδοσιακών πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων. Παράλληλα, το QUIC αποτελεί τη βάση λειτουργίας του HTTP/3.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του πρωτοκόλλου QUIC, η ανάλυση των βασικών χαρακτηριστικών του και η μελέτη της υιοθέτησής του στο σύγχρονο διαδίκτυο. Για την εκπόνηση της εργασίας ακολουθήθηκε η βιβλιογραφική ερευνητική προσέγγιση, η οποία βασίστηκε σε επίσημες τεχνικές προδιαγραφές και σε σύγχρονες επιστημονικές δημοσιεύσεις.

Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα κύρια πρωτόκολλα του διαδικτύου και οι περιορισμοί τους, ενώ στη συνέχεια αναλύονται η αρχιτεκτονική, η λειτουργία και οι μηχανισμοί του QUIC, καθώς και η σχέση του με το HTTP/3. Επιπλέον, εξετάζεται η απόδοση του πρωτοκόλλου σε ποικίλα δικτυακά περιβάλλοντα και παρουσιάζονται στοιχεία σχετικά με την υιοθέτησή του από μεγάλες εταιρείες τεχνολογίας, παρόχους υπηρεσιών και σύγχρονους φυλλομετρητές ιστού.

Από τη μελέτη φαίνεται ότι το QUIC παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα σχετικά με τη μείωση της καθυστέρησης, τη βελτίωση της απόδοσης και την ενίσχυση της ασφάλειας των επικοινωνιών. Επίσης, η αυξανόμενη υποστήριξή του από το σύγχρονο διαδικτυακό οικοσύστημα αναδεικνύει τον σημαντικό του ρόλο στην εξέλιξη των διαδικτυακών επικοινωνιών τα επόμενα χρόνια.

Λέξεις-κλειδιά: QUIC, HTTP/3, TCP, UDP, πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων, απόδοση δικτύων, διαδικτυακές επικοινωνίες.

Abstract

The continuous growth of the Internet and the increasing use of applications that require high performance, low latency, and secure data transmission have led to the need for new communication protocols. In this context, the QUIC (Quick UDP Internet Connections) protocol was developed to improve the performance of Internet communications and address several limitations of traditional transport protocols. In addition, QUIC serves as the foundation of HTTP/3.

The aim of this thesis is to investigate the QUIC protocol, analyze its main characteristics, and examine its adoption in the modern Internet. To achieve this objective, a literature-based research approach was followed, drawing on official technical specifications and contemporary scientific publications.

The thesis first presents the fundamental Internet protocols and their limitations. It then analyzes the architecture, operation, and mechanisms of QUIC, as well as its relationship with HTTP/3. Furthermore, the performance of the protocol in different network environments is examined, while evidence regarding its adoption by major technology companies, service providers, and modern web browsers is discussed.

The findings indicate that QUIC offers significant advantages in terms of latency reduction, performance improvement, and enhanced communication security. At the same time, its increasing support across the modern Internet ecosystem highlights its growing importance and suggests that it is likely to play a key role in the future evolution of Internet communications.

Keywords: QUIC, HTTP/3, TCP, UDP, transport protocols, network performance, Internet communications.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	6
Abstract	7
Πίνακας διαγραμμάτων/εικόνων	10
Πίνακας Συντομογραφιών	Error! Bookmark not defined.
1. Εισαγωγή.....	12
1.1 Σκοπός της εργασίας	12
1.2 Η σημασία του QUIC στο σύγχρονο Διαδίκτυο	13
1.3. Δομή της εργασίας	15
2. Μεθοδολογία	16
2.1 Ερευνητική προσέγγιση	16
2.2 Συλλογή βιβλιογραφικού υλικού	16
2.3 Κριτήρια επιλογής πηγών	17
2.4 Ανάλυση και σύνθεση της βιβλιογραφίας	17
3. Θεωρητικό Υπόβαθρο	18
3.1 Τα βασικά πρωτόκολλα του διαδικτύου	18
3.1.1 Το πρωτόκολλο TCP	19
3.1.2 Το πρωτόκολλο UDP	20
3.1.3 Περιορισμοί του TCP	21
3.1.4 Το πρωτόκολλο TLS (Transport Layer Security)	22
3.2 Το Πρωτόκολλο QUIC	23
3.2.1 Ορισμός και βασικές αρχές του QUIC	23
3.2.2 Αρχιτεκτονική του QUIC	25
3.2.3 Διαδικασία σύνδεσης στο QUIC	27
3.2.4 Πακέτο QUIC	29
3.2.5 Διαδικασία ανάκαμψης στο πρωτόκολλο QUIC	31
3.2.6 Μειονεκτήματα και περιορισμοί του QUIC	33
3.3 Το HTTP/3 και η σχέση του με το QUIC	34
3.3.1 Εξέλιξη των πρωτοκόλλων HTTP	34
3.3.2 Το HTTP/2 και οι περιορισμοί του	36
3.3.3 Το HTTP/3	37
3.3.4 Πώς λειτουργεί το HTTP/3 πάνω στο QUIC	37
3.3.5 Σύγκριση HTTP/2 και HTTP/3	38
3.4 Απόδοση του QUIC	39
3.4.1 Σύγκριση QUIC και TCP	39
3.4.2 Latency και χρόνος απόκρισης	40

3.4.3 Απόδοση σε κινητά δίκτυα.....	41
3.4.4 Απόδοση σε δίκτυα υψηλής καθυστέρησης	42
3.4.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί στην πράξη.....	43
4. Υιοθέτηση του QUIC στο Σύγχρονο Διαδίκτυο	43
4.1 Έννοια της υιοθέτησης πρωτοκόλλων.....	43
4.2 Υιοθέτηση από μεγάλες εταιρείες και CDNs.....	45
4.3 Υιοθέτηση από web browsers και υπηρεσίες	47
4.3.1 Υιοθέτηση από web browsers	47
4.3.2 Υιοθέτηση σε ιστοσελίδες και υπηρεσίες.....	48
4.4. Στατιστικά και τάσεις χρήσης του QUIC.....	50
4.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση του QUIC.....	55
5.1 Προκλήσεις	59
5.2 Περιορισμοί.....	62
5.3 Προτάσεις.....	65
6. Συμπεράσματα	68
Βιβλιογραφία.....	71

Πίνακας διαγραμμάτων/εικόνων

Σχήμα 1. Αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου QUIC σελ. _28_

Σχήμα 2. Πακέτο QUIC σελ. __33

Σχήμα 3. Εξέλιξη της χρήσης του HTTP/3 σε ιστοσελίδες σε παγκόσμιο επίπεδο σελ. __55

Σχήμα 4. Χρήση του HTTP/3 ανά χώρα/περιοχή σε σύγκριση με προηγούμενες εκδόσεις HTTP σελ. 57__

Πίνακας Συντομογραφιών

QUIC: Quick UDP Internet Connections

TCP: Transmission Control Protocol

UDP: User Datagram Protocol

HTTP: Hypertext Transfer Protocol

HTTP/2: Hypertext Transfer Protocol Version 2

HTTP/3: Hypertext Transfer Protocol Version 3

TLS: Transport Layer Security

IETF: Internet Engineering Task Force

CDN: Content Delivery Network

RTT: Round-Trip Time

0-RTT: Zero Round-Trip Time

1-RTT: One Round-Trip Time

HOL: Head-of-Line Blocking

IP: Internet Protocol

DNS: Domain Name System

URL: Uniform Resource Locator

Wi-Fi: Wireless Fidelity

5G: Fifth Generation Mobile Network

RFC: Request for Comments

ACK: Acknowledgement

API: Application Programming Interface

CPU: Central Processing Unit

1. Εισαγωγή

1.1 Σκοπός της εργασίας

Η ραγδαία ανάπτυξη του διαδικτύου και η ολοένα αυξανόμενη χρήση των διαδικτυακών υπηρεσιών έχουν δημιουργήσει την ανάγκη ορισμένων νέων απαιτήσεων για ταχύτητα, αξιοπιστία και ασφάλεια στις επικοινωνίες. Η σημαντική εξάπλωση των εφαρμογών όπως οι υπηρεσίες streaming, οι πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης, οι υπηρεσίες cloud computing και οι εφαρμογές πραγματικού χρόνου μεγενθύνουν τον όγκο της κίνησης στο διαδίκτυο και αναδεικνύουν την ανάγκη για αποτελεσματικότερα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων (Langley et al., 2017). Το TCP αποτέλεσε για πολλές δεκαετίες την κύρια τεχνολογία μεταφοράς δεδομένων στο διαδίκτυο, ωστόσο ορισμένοι περιορισμοί του, όπως η αυξημένη καθυστέρηση εγκατάστασης σύνδεσης και το φαινόμενο Head-of-Line Blocking, είναι ιδιαίτερα εμφανείς στο σύγχρονο περιβάλλον επικοινωνίας (Cook et al., 2017).

Για τους παραπάνω λόγους αναπτύχθηκε το πρωτόκολλο QUIC, το οποίο σχεδιάστηκε με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης των διαδικτυακών επικοινωνιών, τη μείωση της καθυστέρησης και την αποτελεσματικότερη υποστήριξη των σύγχρονων διαδικτυακών εφαρμογών (Iyengar & Thomson, 2021). Το παραπάνω πρωτόκολλο εδράζεται στο UDP και συμπεριλαμβάνει μηχανισμούς ασφάλειας μέσω του TLS 1.3, προκειμένου να παρέχει έναν διαφορετικό τρόπο μεταφοράς δεδομένων συγκριτικά με τα παραδοσιακά πρωτόκολλα (Thomson & Turner, 2021). Επίσης, αποτελεί τη βάση λειτουργίας του HTTP/3, διαδραματίζοντας καθοριστικό ρόλο στη μελλοντική εξέλιξη του Παγκόσμιου Ιστού (Trevisan et al., 2021).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του πρωτοκόλλου QUIC, η ανάλυση των βασικών τεχνικών χαρακτηριστικών του και η μελέτη του ρόλου του στο σύγχρονο διαδίκτυο. Ειδικότερα, εξετάζονται η αρχιτεκτονική και η λειτουργία του πρωτοκόλλου, η σχέση του με το HTTP/3, καθώς και οι μηχανισμοί που χρησιμοποιεί για τη βελτίωση της απόδοσης και της ασφάλειας των επικοινωνιών. Επιπλέον, μελετώνται τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί του QUIC, καθώς και η συμπεριφορά του σε διαφορετικά περιβάλλοντα δικτύου.

Παράλληλα, η εργασία εστιάζει στη διερεύνηση της υιοθέτησης του QUIC από το σύγχρονο οικοσύστημα του διαδικτύου. Για τον σκοπό αυτό εξετάζονται η υποστήριξη

του πρωτοκόλλου από μεγάλες εταιρείες τεχνολογίας, παρόχους υπηρεσιών cloud, δίκτυα διανομής περιεχομένου (CDNs) και σύγχρονους web browsers, καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωσή του. Τέλος, αναλύονται οι σημαντικότερες προκλήσεις, οι περιορισμοί και οι μελλοντικές προοπτικές του πρωτοκόλλου, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμβολή του στη διαμόρφωση της επόμενης γενιάς διαδικτυακών επικοινωνιών.

1.2 Η σημασία του QUIC στο σύγχρονο Διαδίκτυο

Το σύγχρονο διαδίκτυο διακρίνεται για τη διαρκή αύξηση της διαδικτυακής κίνησης καθώς και την ανάπτυξη εφαρμογών οι οποίες προϋποθέτουν υψηλή απόδοση, χαμηλή καθυστέρηση και αυξημένη αξιοπιστία. Η ευρεία χρήση υπηρεσιών cloud computing, εφαρμογών πραγματικού χρόνου, πλατφορμών τηλεδιάσκεψης, διαδικτυακών παιχνιδιών και υπηρεσιών συνεχούς μετάδοσης πολυμέσων (streaming) έχει μεταβάλει σημαντικά τις απαιτήσεις των χρηστών και των παρόχων υπηρεσιών. Ακόμη, η ολοένα και περισσότερο αυξημένη χρήση κινητών συσκευών και ασύρματων δικτύων μεταβάλλει τα δεδομένα της διαχείρισης της δικτυακής κίνησης καθώς και της ποιότητας της παρεχόμενης εμπειρίας (Langley et al., 2017).

Για μεγάλο χρονικό διάστημα το TCP κατείχε την κεντρική θέση στα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων του διαδικτύου, παρέχοντας αξιοπιστία και αποτελεσματικό έλεγχο της ροής της επικοινωνίας. Ωστόσο, η αρχιτεκτονική του σχεδιάστηκε σε μια εποχή στην οποία οι απαιτήσεις των διαδικτυακών εφαρμογών ήταν σημαντικά διαφορετικές από τις σημερινές. Λόγω της αύξησης της χρήσης κρυπτογραφημένων επικοινωνιών, της ανάγκης για ταχύτερη απόκριση των εφαρμογών και της εξυπηρέτηση δισεκατομμυρίων χρηστών σε παγκοσμίο επίπεδο αναδείχθηκαν ορισμένοι περιορισμοί του TCP, όπως η καθυστέρηση κατά την εγκατάσταση μιας σύνδεσης και το φαινόμενο Head-of-Line Blocking (Cook et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021).

Με σκοπό την επίλυση των παραπάνω προκλήσεων αναπτύχθηκε το QUIC. Ειδικότερα, το πρωτόκολλο σχεδιάστηκε με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσης των διαδικτυακών επικοινωνιών μέσω της μείωσης του latency, της αποτελεσματικότερης διαχείρισης των απωλειών πακέτων και της ενσωμάτωσης σύγχρονων μηχανισμών ασφάλειας (Langley et al., 2017). Αντίθετα με τα παραδοσιακά μοντέλα επικοινωνίας,

το QUIC εδράζεται στο UDP και ενσωματώνει εξ αρχής το TLS 1.3, μεγιστοποιώντας την ταχύτητα εγκατάστασης των ασφαλών συνδέσεων καθώς και τη μείωση των ανταλλαγών μηνυμάτων ανάμεσα σε πελάτη και εξυπηρετητή (Thomson & Turner, 2021).

Η σημασία του QUIC γίνεται ιδιαίτερα εμφανής μέσω της στενής του σχέσης με το HTTP/3. Μολονότι το HTTP αποτελεί το κύριο πρωτόκολλο επικοινωνίας του Παγκόσμιου Ιστού, κάθε βελτίωση στη λειτουργία του επιδρά άμεσα σε εκατομμύρια ιστοσελίδες και διαδικτυακές υπηρεσίες. Το HTTP/3 αξιοποιεί τα χαρακτηριστικά του QUIC με σκοπό την αντιμετώπιση προβλημάτων τα οποία παρατηρούνταν σε προηγούμενες εκδόσεις του πρωτοκόλλου και συνεπώς συμβάλλει στη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών και στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων δικτυακών πόρων (Iyengar & Thomson, 2021; Mücke et al., 2025).

Ακόμη, η σταδιακή υιοθέτηση του QUIC από μεγάλους οργανισμούς και παρόχους διαδικτυακών υπηρεσιών και συγκεκριμένα η αρχική ανάπτυξή του από τη Google και η μετέπειτα ενσωμάτωσή του σε δημοφιλείς web browsers, CDNs και cloud πλατφόρμες αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες διάδοσής και καθιέρωσής του ως ενός από τα σημαντικότερα πρωτόκολλα του σύγχρονου διαδικτύου (Langley et al., 2017). Η αυξανόμενη χρήση του HTTP/3 και η συνεχής αύξηση της διαδικτυακής κίνησης που εδράζεται στο QUIC αναδεικνύουν τον σημαντικό ρόλο του πρωτοκόλλου στην εξέλιξη των διαδικτυακών επικοινωνιών (Trevisan et al., 2021).

Επιπλέον, η σημασία του QUIC δε σχετίζεται μόνο με τη βελτίωση της απόδοσης των ιστοσελίδων. Συγκεκριμένα, η αρχιτεκτονική του βοηθά στην αποτελεσματικότερη υποστήριξη εφαρμογών πραγματικού χρόνου, κινητών υπηρεσιών, συστημάτων cloud και περιβαλλόντων 5G, στα οποία καίριοι παράγοντες λειτουργίας είναι η χαμηλή καθυστέρηση και η προσαρμοστικότητα στις μεταβολές του δικτύου (Hasselquist et al., 2023). Κατά συνέπεια, το QUIC θεωρείται από πλήθος ερευνητών τα τελευταία χρόνια ως μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στον χώρο των πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων, καθώς και ως η κύρια βάση διαδικτυακών υπηρεσιών της επόμενης γενιάς (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021).

1.3. Δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια, στα οποία εξετάζονται το θεωρητικό υπόβαθρο, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, η υιοθέτηση και οι προοπτικές του πρωτοκόλλου QUIC.

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται ο σκοπός της παρούσας μελέτης, η σημασία του QUIC στο σύγχρονο διαδίκτυο, καθώς και η συνολική δομή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της έρευνας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η βιβλιογραφική προσέγγιση που υιοθετήθηκε, οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν, τα κριτήρια επιλογής τους και η διαδικασία ανάλυσης και σύνθεσης του σχετικού ερευνητικού υλικού.

Το τρίτο κεφάλαιο αποτελεί το θεωρητικό υπόβαθρο της εργασίας. Αρχικά, παρουσιάζονται τα κύρια πρωτόκολλα του διαδικτύου, με έμφαση στα TCP, UDP και TLS, καθώς και οι περιορισμοί των σύγχρονων διαδικτυακών επικοινωνιών. Στη συνέχεια αναλύεται το πρωτόκολλο QUIC, η αρχιτεκτονική και η λειτουργία του, ενώ εξετάζεται η σχέση του με το HTTP/3 και η συμβολή του στη βελτίωση της απόδοσης των διαδικτυακών υπηρεσιών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται η υιοθέτηση του QUIC στο σύγχρονο διαδίκτυο. Παρουσιάζονται η έννοια της υιοθέτησης πρωτοκόλλων, η ενσωμάτωση του QUIC από μεγάλες εταιρείες τεχνολογίας, παρόχους υπηρεσιών και web browsers, καθώς και στατιστικά στοιχεία και τάσεις που αναδεικνύουν τη σημαντική εξάπλωση του πρωτοκόλλου. Επιπλέον, αναλύονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτησή του και οι συνθήκες που ευνοούν ή περιορίζουν τη διάδοσή του.

Το πέμπτο κεφάλαιο εστιάζει στις προκλήσεις, τους περιορισμούς και τις μελλοντικές προοπτικές του QUIC. Συγκεκριμένα, εξετάζονται ορισμένα τεχνικά και λειτουργικά ζητήματα τα οποία επηρεάζουν την εφαρμογή του πρωτοκόλλου, ενώ διατυπώνονται προτάσεις τεχνικού και επιστημονικού ενδιαφέροντος.

Τέλος, στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα συμπεράσματά της, τα οποία προκύπτουν από τη σύνθεση και αξιολόγηση της βιβλιογραφίας που μελετήθηκε. Μέσω των παραγόμενων συμπερασμάτων επιχειρείται

η συνολική αποτίμηση της συμβολής του QUIC στις σύγχρονες επικοινωνίες του διαδικτύου, καθώς και του μελλοντικού του ρόλου στο διαδίκτυο.

2. Μεθοδολογία

2.1 Ερευνητική προσέγγιση

Η παρούσα εργασία αποτελεί μια βιβλιογραφική ανασκόπηση με σκοπό τη διερεύνηση του πρωτοκόλλου QUIC και της υιοθέτησής του στο σύγχρονο διαδίκτυο. Συγκεκριμένα, το αντικείμενο της μελέτης αφορά την ανάλυση και σύνθεση της υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης σχετικά με τα τεχνικά χαρακτηριστικά, την απόδοση, την ασφάλεια και τη διάδοση του πρωτοκόλλου. Μέσω της συστηματικής μελέτης της σχετικής βιβλιογραφίας επιδιώχθηκε η κατανόηση των κεντρικών αρχών λειτουργίας του QUIC, η διερεύνηση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών του, καθώς και ο βαθμός υιοθέτησής του από το σύγχρονο διαδίκτυο.

2.2 Συλλογή βιβλιογραφικού υλικού

Η συλλογή του βιβλιογραφικού υλικού σχετικά με το πρωτόκολλο QUIC, το HTTP/3 και τις σύγχρονες τεχνολογίες μεταφοράς δεδομένων στο διαδίκτυο βασίστηκε σε επίσημες τεχνικές προδιαγραφές και σύγχρονες επιστημονικές και έγκυρες δημοσιεύσεις οι οποίες εξετάζουν τη σχεδίαση, την απόδοση και την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου.

Ειδικότερα, η συλλογή εστίασε στα επίσημα πρότυπα και έγγραφα της Internet Engineering Task Force (IETF), τα οποία αποτελούν τις κύριες τεχνικές προδιαγραφές του QUIC. Αξιοποιήθηκαν το RFC 9000, στο οποίο παρουσιάζεται η αρχιτεκτονική και η λειτουργία του πρωτοκόλλου QUIC, το RFC 9001 που σχετίζεται με τη χρήση του TLS 1.3 στο QUIC και το RFC 9002 στο οποίο αναλύονται οι μηχανισμοί ανίχνευσης απωλειών και ελέγχου συμφόρησης.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε αναζήτηση επιστημονικών άρθρων μέσω συγκεκριμένων βάσεων δεδομένων και ψηφιακών βιβλιοθηκών, όπως οι IEEE Xplore, ACM Digital Library, SpringerLink, ScienceDirect και MDPI. Μέσω των παραπάνω πηγών εντοπίστηκαν μελέτες οι οποίες αναλύουν ζητήματα σχετικά με την απόδοση, την ασφάλεια, την υιοθέτηση και τη μελλοντική εξέλιξη του QUIC, καθώς και

συγκριτικές αναλύσεις σχετικά με το QUIC και ποικίλα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων.

2.3 Κριτήρια επιλογής πηγών

Με σκοπό τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της συνάφειας του αξιοποιήσιμου υλικού, η επιλογή των βιβλιογραφικών πηγών πραγματοποιήθηκε με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Ειδικότερα, προτιμήθηκαν δημοσιεύσεις προερχόμενες έγκριτα επιστημονικά περιοδικά, διεθνή συνέδρια και επίσημους οργανισμούς τυποποίησης λόγω αξιοπιστίας και επιστημονικής τεκμηρίωσης.

Επιπλέον, μολονότι το QUIC αποτελεί μια σχετικά νέα τεχνολογία η οποία εξελίσσεται διαρκώς, αξιοποιήθηκαν κατά κύριο λόγο μελέτες που δημοσιεύθηκαν μετά την τυποποίηση του πρωτοκόλλου από την IETF, καθώς και πρόσφατες έρευνες που εξετάζουν την υιοθέτηση του HTTP/3 και την πραγματική χρήση του QUIC στο διαδίκτυο.

Τέλος, η συνάφεια των θεμάτων των πηγών συνάδει άμεσα με τους στόχους της εργασίας. Συγκεκριμένα, οι μελέτες που επιλέχθηκαν εξετάζουν την αρχιτεκτονική και τη λειτουργία του QUIC, την απόδοσή του σε ποικίλα περιβάλλοντα δικτύου, τους μηχανισμούς ασφάλειας που χρησιμοποιεί, τη σχέση του με το HTTP/3, καθώς και τους παράγοντες που επιδρούν στην υιοθέτησή του από τους εκάστοτε οργανισμούς και παρόχους διαδικτυακών υπηρεσιών.

2.4 Ανάλυση και σύνθεση της βιβλιογραφίας

Μετά τη συλλογή του σχετικού βιβλιογραφικού υλικού πραγματοποιήθηκε ανάλυση και σύνθεση των πληροφοριών στοχεύοντας στην κατανόηση των κύριων χαρακτηριστικών του πρωτοκόλλου QUIC και της σχέσης του με το HTTP/3. Επίσης, εξετάστηκαν συγκριτικά τα ευρήματα των ποικίλων μελετών σχετικά με την απόδοση, την ασφάλεια και την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου σε σύγχρονα περιβάλλοντα δικτύου. Μέσω της σύνθεσης των αποτελεσμάτων εντοπίστηκαν τα κυριότερα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί και οι μελλοντικές προοπτικές του QUIC.

3. Θεωρητικό Υπόβαθρο

3.1 Τα βασικά πρωτόκολλα του διαδικτύου

Η λειτουργία του σύγχρονου διαδικτύου εδράζεται σε ένα σύνολο πρωτοκόλλων που συμβάλλουν στην επίτευξη της επικοινωνίας διαφορετικών συστημάτων και εφαρμογών μέσω δικτύων υπολογιστών (Kumar, 2020; Dellaverson et al., 2022). Τα εν λόγω πρωτόκολλα οργανώνονται σε ορισμένα επίπεδα ανάλογα με την αρχιτεκτονική των δικτύων, ενώ καθορίζουν τον τρόπο που τα δεδομένα δημιουργούνται, μεταδίδονται και λαμβάνονται από τις εφαρμογές που χρησιμοποιούν το διαδίκτυο (Langley et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Στο επίπεδο μεταφοράς (transport layer) συμπεριλαμβάνονται ορισμένα από τα σημαντικότερα πρωτόκολλα του διαδικτύου, καθώς μέσω αυτών εκτελείται η μεταφορά δεδομένων από μια εφαρμογή σε μια άλλη μέσω του δικτύου (Cook et al., 2017; Kumar, 2020).

Τα δύο πιο διαδεδομένα πρωτόκολλα του συγκεκριμένου επιπέδου είναι το Transmission Control Protocol (TCP) και το User Datagram Protocol (UDP), τα οποία χρησιμοποιούνται σε ποικίλες διαδικτυακές εφαρμογές, όπως στην περιήγηση στον ιστό, στη μεταφορά αρχείων και στις υπηρεσίες πολυμέσων (Gupta & Bartos, 2022). Τα παραπάνω πρωτόκολλα εμφανίζουν ορισμένες διαφορές ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους, καθώς το TCP παρέχει αξιόπιστη και οργανωμένη μεταφορά δεδομένων, ενώ αντίθετα το UDP εστιάζει στην επίτευξη χαμηλής καθυστέρησης και απλότητας στην επικοινωνία (Dellaverson et al., 2019; Cook et al., 2017). Συνεπώς, οι απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής, όπως η αξιοπιστία, η καθυστέρηση μετάδοσης ή η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων καθορίζουν την επιλογή μεταξύ των δύο πρωτοκόλλων (Langley et al., 2017; Kumar, 2020).

Η κατανόηση των κύριων χαρακτηριστικών των πρωτοκόλλων μεταφοράς έχει ιδιαίτερη σημασία στη μελέτη των σύγχρονων διαδικτυακών τεχνολογιών, καθώς ποικίλα προβλήματα απόδοσης των εφαρμογών ιστού σχετίζονται άμεσα με τον τρόπο λειτουργίας τους (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Ειδικότερα, παρά το γεγονός ότι στη σύγχρονη εποχή το TCP αποτελεί το κύριο πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων στο διαδίκτυο, ο σχεδιασμός του παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς. Οι περιορισμοί του επηρεάζουν την απόδοση των σύγχρονων εφαρμογών κυρίως σε

περιβάλλοντα υψηλής καθυστέρησης και απώλειας πακέτων (Langley et al., 2017; Cook et al., 2017).

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά των πρωτοκόλλων TCP και UDP, οι περιορισμοί που εντοπίζονται κατά τη χρήση τους στις σύγχρονες διαδικτυακές εφαρμογές, καθώς και ο ρόλος της ασφάλειας στις επικοινωνίες του διαδικτύου μέσω του ευρέως χρησιμοποιούμενου πρωτοκόλλου Transport Layer Security (TLS) (Dellaverson et al., 2019).

3.1.1 Το πρωτόκολλο TCP

Το TCP είναι ένα σημαντικό πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων στο διαδίκτυο το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπως η περιήγηση στον ιστό, το ηλεκτρονικό ταχυδρομείο και η μεταφορά αρχείων (et al., 2019). Εστιάζει στη σύνδεση (connection-oriented), διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα αποστέλλονται από ένα άκρο επικοινωνίας (π.χ, έναν υπολογιστή) στο άλλο άκρο επικοινωνίας αξιόπιστα και οργανωμένα (Langley et al., 2017; Cook et al., 2017). Για τον παραπάνω σκοπό, το TCP δημιουργεί μια σύνδεση μεταξύ αποστολέα και παραλήπτη πριν την έναρξη της μεταφοράς των δεδομένων (Kumar, 2020; Gupta & Bartos, 2022).

Η δημιουργία της σύνδεσης διεξάγεται μέσω του μηχανισμού three-way handshake, κατά τον οποίο ανταλλάσσονται ειδικά πακέτα ελέγχου ανάμεσα στα δύο συστήματα, με σκοπό την επιβεβαίωση της ανταλλαγής των δεδομένων (Kumar, 2020; Cook et al., 2017). Έτσι, το TCP διασφαλίζει ότι η σύνδεση έχει δημιουργηθεί ορθά πριν τη μετάδοση δεδομένων και επιτυγχάνει μια αξιόπιστη επικοινωνία (Dellaverson et al., 2019; Langley et al., 2017).

Καίριο χαρακτηριστικό του TCP είναι ότι μπορεί να διασφαλίσει την αξιοπιστία της μετάδοσης, μέσω ορισμένων μηχανισμών όπως η αρίθμηση πακέτων, η επιβεβαίωση παραλαβής δεδομένων και η επαναμετάδοση των απολεσθέντων πακέτων (Langley et al., 2017; Kumar, 2020). Με τον παραπάνω τρόπο το TCP εντοπίζει τις απώλειες πακέτων και επαναμεταδίδει τα δεδομένα που δεν μεταφέρθηκαν ορθώς στον προορισμό τους, ενώ εξασφαλίζεται η λήψη πλήρων και ορθά ταξινομημένων δεδομένων (Cook et al., 2017; Dellaverson et al., 2019).

Επιπλέον, το TCP περιλαμβάνει μηχανισμούς ελέγχου συμφόρησης (congestion control) και ελέγχου ροής (flow control), με σκοπό τη ρύθμιση του ρυθμού αποστολής των δεδομένων στο δίκτυο, καθώς και την αποφυγή της υπερφόρτωσης των δικτυακών πόρων (Cook et al., 2017). Οι παραπάνω μηχανισμοί προσαρμόζουν συνεχώς την ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων στις συνθήκες του δικτύου, μειώνουν τον ρυθμό αποστολής σε περιπτώσεις συμφόρησης και τον αυξάνουν ξανά, μόλις το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει μεγαλύτερο όγκο δεδομένων (Kumar, 2020; Gupta & Bartos, 2022).

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα αξιοπιστίας, παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς οι οποίοι επηρεάζουν την απόδοση των σύγχρονων εφαρμογών του διαδικτύου (Langley et al., 2017).

Με σκοπό τη μείωση των περιορισμών, αναπτύσσονται νέα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων, όπως το πρωτόκολλο QUIC, το οποίο σχεδιάστηκε με στόχο την παροχή μεγαλύτερης ταχύτητας και απόδοσης στη διαδικτυακή επικοινωνία (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021).

3.1.2 Το πρωτόκολλο UDP

Το UDP αποτελεί ένα από τα κυριότερα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων στο διαδίκτυο, ενώ διακρίνεται για την απλότητα του σχεδιασμού του και το χαμηλό λειτουργικό κόστος συγκριτικά με άλλα πρωτόκολλα μεταφοράς (Kumar, 2020; Gupta & Bartos, 2022). Αντίθετα με το TCP, το UDP δεν εστιάζει στη σύνδεση και δεν προϋποθέτει τη δημιουργία σύνδεσης πριν από την αποστολή δεδομένων, περιορίζοντας έτσι την καθυστέρηση της επικοινωνίας (Cook et al., 2017; Dellaverson et al., 2019). Ως εκ τούτου, χρησιμοποιείται κυρίως σε εφαρμογές που χρειάζονται ταχεία μετάδοση δεδομένων και χαμηλή καθυστέρηση, όπως υπηρεσίες πολυμέσων, διαδικτυακά παιχνίδια και εφαρμογές πραγματικού χρόνου (Kumar, 2020).

Επίσης, χαρακτηριστικό του UDP είναι ότι η λειτουργία του βασίζεται στην αποστολή ανεξάρτητων πακέτων δεδομένων, τα datagrams, και δεν εξασφαλίζει την αξιόπιστη παράδοσή τους (Dellaverson et al., 2019; Kumar, 2020). Δεν παρέχει μηχανισμούς επιβεβαίωσης παραλαβής, επαναμετάδοσης χαμένων πακέτων ή διατήρησης της σωστής σειράς των δεδομένων. Οι λειτουργίες αυτές διεκπεραιώνονται από τις εφαρμογές που το χρησιμοποιούν (Langley et al., 2017; Cook et al., 2017). Τα

παραπάνω καθιστούν το πρωτόκολλο UDP απλό και αποδοτικό όσον αφορά τους υπολογιστικούς πόρους, ωστόσο ταυτόχρονα μειώνεται η αξιοπιστία της μετάδοσης των δεδομένων (Dellaverson et al., 2019).

Ωστόσο παρά τους περιορισμούς του, το UDP αποτελεί ευρέως τη βάση της ανάπτυξης των νεότερων πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων, λόγω της δυνατότητάς του για υλοποίηση πρόσθετων μηχανισμών στο επίπεδο της εφαρμογής (Langley et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022)

3.1.3 Περιορισμοί του TCP

Το TCP αποτελεί το πιο διαδεδομένο πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων στο διαδίκτυο, ωστόσο ο σχεδιασμός του εμφανίζει ορισμένους περιορισμούς οι οποίοι επιδρούν σημαντικά στην απόδοση των σύγχρονων διαδικτυακών εφαρμογών (Langley et al., 2017; Cook et al., 2017). Το πρωτόκολλο TCP αναπτύχθηκε την εποχή που οι εφαρμογές του διαδικτύου δεν είχαν πολλές απαιτήσεις για τη λειτουργία τους (Gupta & Bartos, 2022).

Ένας πολύ σημαντικός περιορισμός του TCP είναι η καθυστέρηση λόγω της διαδικασίας της δημιουργίας της σύνδεσης. Η διαδικασία three-way handshake αυξάνει τον χρόνο απόκρισης των διαδικτυακών εφαρμογών, καθώς προϋποθέτει ένα τουλάχιστον πλήρες round-trip ανάμεσα στα δύο συστήματα πριν την έναρξη της μεταφοράς των δεδομένων (Cook et al., 2017; Kumar, 2020). Επίσης, μολονότι είναι απαραίτητη η χρήση πρωτοκόλλων ασφάλειας, η διαδικασία ενδέχεται να χρειαστεί περισσότερα round trips πριν την αποστολή των πρώτων δεδομένων της εφαρμογής (Gupta & Bartos, 2022).

Παράλληλα, κύριο περιορισμό του πρωτοκόλλου αποτελεί το φαινόμενο φαινόμενο Head-of-Line blocking, δηλαδή η καθυστέρηση της παράδοσης των επόμενων δεδομένων λόγω της απώλειας ενός πακέτου, ακόμη και αν αυτά ήδη έχουν παραληφθεί από τον παραλήπτη (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Παρατηρείται κυρίως σε εφαρμογές ιστού στις οποίες πολλαπλά αντικείμενα μεταφέρονται ταυτόχρονα μέσω της ίδιας σύνδεσης και η απώλεια ενός πακέτου μπορεί να επηρεάσει τη συνολική απόδοση της εφαρμογής (Langley et al., 2017).

Επιπλέον, η δημιουργία σύνδεσης μέσω του three-way handshake αυξάνει την καθυστέρηση της έναρξης μεταφοράς των δεδομένων και επηρεάζει την απόδοση των εφαρμογών του δικτύου (Langley et al., 2017; Dellaverson et al., 2019).

Όσον αφορά την εξέλιξη του TCP, εμφανίζονται ορισμένοι περιορισμοί μολονότι το στοιχείο του πυρήνα των περισσότερων λειτουργικών συστημάτων καθώς και οποιαδήποτε τροποποίηση χρήζει αλλαγών τόσο σε επίπεδο λειτουργικού συστήματος όσο και υποδομής δικτύου (Cook et al., 2017). Συγκεκριμένα, οι κύριοι περιορισμοί του είναι το φαινόμενο Head-of-Line Blocking (HOL) σε επίπεδο μεταφοράς, η καθυστέρηση που προκύπτει από τη διαδικασία σύνδεσης και κρυπτογράφησης, η περιορισμένη ευελιξία σε αλλαγές δικτύου (π.χ από Wi-Fi σε 5G). Συνεπώς, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ορισμένων εναλλακτικών προσεγγίσεων που υλοποιούν τους μηχανισμούς μεταφοράς δεδομένων κατά την εφαρμογή και καθιστούν δυνατή την ταχύτερη εξέλιξη των πρωτοκόλλων, καθώς και την βέλτιστη προσαρμογή στις ανάγκες του σύγχρονου διαδικτύου (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021).

3.1.4 Το πρωτόκολλο TLS (Transport Layer Security)

Στις μέρες μας ένα μεγάλο μέρος των δεδομένων που μεταφέρονται μέσω του διαδικτύου περιλαμβάνει ευαίσθητες πληροφορίες, όπως προσωπικά δεδομένα, οικονομικές συναλλαγές και ιδιωτικές επικοινωνίες. Ως εκ τούτου, η ασφάλεια αποτελεί κύριο παράγοντα για την ομαλή λειτουργία των σύγχρονων διαδικτυακών εφαρμογών (Gupta & Bartos, 2022; Dellaverson et al., 2019). Για την προστασία των προσωπικών δεδομένων χρησιμοποιείται ευρέως το πρωτόκολλο Transport Layer Security (TLS), το οποίο παρέχει μηχανισμούς κρυπτογράφησης και πιστοποίησης ταυτότητας μεταξύ των συστημάτων που επικοινωνούν (Cook et al., 2017; Kumar, 2020).

Το TLS λειτουργεί ως ένα πρόσθετο επίπεδο ασφάλειας πάνω από τα πρωτόκολλα μεταφοράς, ενώ επιτρέπει την κρυπτογράφηση των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ ενός πελάτη και ενός διακομιστή (Gupta & Bartos, 2022; Dellaverson et al., 2019). Μέσω της διαδικασίας handshake εκτελείται η ανταλλαγή κρυπτογραφικών κλειδιών, καθώς και η επαλήθευση της ταυτότητας των συστημάτων που συμμετέχουν στην επικοινωνία, ενώ εξασφαλίζεται η προστασία από υποκλοπή και τροποποίηση των δεδομένων (Kumar, 2020; Cook et al., 2017).

Ωστόσο παρά την παροχή υψηλών επιπέδων ασφάλειας, η χρήση του μπορεί να καθυστερήσει επιπλέον την επικοινωνία, κυρίως όταν σχετίζεται με τη διαδικασία δημιουργίας σύνδεσης του TCP (Cook et al., 2017; Langley et al., 2017). Συγκεκριμένα, η ανάγκη για πολλαπλά round trips κατά τη δημιουργία μιας ασφαλούς σύνδεσης ήταν η αιτία ανάπτυξης νέων πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων, όπως το QUIC, το οποίο συμπεριλαμβάνει ορισμένους μηχανισμούς κρυπτογράφησης απευθείας στο πρωτόκολλο μεταφοράς, μειώνοντας τον χρόνο εγκατάστασης μιας σύνδεσης (Iyengar & Thomson, 2021).

Καθίσταται φανερό από τα παραπάνω ότι η εμπιστευτικότητα και η ακεραιότητα των δεδομένων αποτελούν καίριες προϋποθέσεις για τη λειτουργία των περισσότερων ψηφιακών υπηρεσιών (Gupta & Bartos, 2022; Dellaverson et al., 2019).

3.2 Το Πρωτόκολλο QUIC

3.2.1 Ορισμός και βασικές αρχές του QUIC

Το QUIC (Quick UDP Internet Connections) αποτελεί ένα σύγχρονο πρωτόκολλο μεταφοράς δεδομένων. Αναπτύχθηκε από την Google με στόχο να βελτιώσει τη απόδοση των διαδικτυακών εφαρμογών και να μειώσει τα επίπεδα καθυστέρησης κατά την επικοινωνία μεταξύ των πελατών και των διακομιστών (Langley et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Σχεδιάστηκε ως λύση έναντι των περιορισμών των παραδοσιακών πρωτοκόλλων μεταφοράς, όπως το TCP το οποίο διακρίνεται για την αξιόπιστη μεταφορά των δεδομένων, αλλά παρουσιάζει καθυστερήσεις και περιορισμούς σε περιβάλλοντα υψηλής κίνησης ή απώλειας πακέτων (Cook et al., 2017; Kumar, 2020).

Το QUIC εδράζεται στο UDP ως υποκείμενο πρωτόκολλο μεταφοράς και καθιστά δυνατή την υλοποίηση μηχανισμών αξιοπιστίας, ελέγχου συμφόρησης και διαχείρισης συνδέσεων στο επίπεδο της εφαρμογής (Dellaverson et al., 2019). Η επιλογή του UDP συμβάλλει στην παράκαμψη ορισμένων περιορισμών από το QUIC οι οποίοι σχετίζονται με την εξέλιξη του TCP, όπως τις συχνές τροποποιήσεις στο λειτουργικό σύστημα και στη δικτυακή υποδομή (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021). Αντίθετα, το QUIC υλοποιείται στο επίπεδο της εφαρμογής, γεγονός που συμβάλλει στην ταχύτερη ανάπτυξη και εξέλιξη του πρωτοκόλλου (Kumar, 2020).

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του QUIC είναι η δυνατότητα δημιουργίας σύνδεσης με σημαντικά μικρότερο χρόνο εγκατάστασης συγκριτικά με τις παραδοσιακές συνδέσεις TCP και TLS (Langley et al., 2017). Συγκεκριμένα, στο TCP η δημιουργία σύνδεσης προϋποθέτει τη διαδικασία three-way handshake, ενώ όταν χρησιμοποιείται και κρυπτογράφηση μέσω TLS πρέπει να γίνονται ορισμένες περαιτέρω ανταλλαγές μηνυμάτων πριν την έναρξη της μεταφοράς των δεδομένων (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Ωστόσο, το QUIC συνδυάζει τις διαδικασίες μεταφοράς και κρυπτογράφησης σε έναν ενιαίο μηχανισμό σύνδεσης, με αποτέλεσμα τη μείωση του συνολικού αριθμού round-trip times πριν την αρχή της επικοινωνίας (Dellaverson et al., 2019).

Επιπλέον, το QUIC υποστηρίζει πολλαπλές και ανεξάρτητες ροές δεδομένων (streams) μέσα σε μία σύνδεση, μεταφέροντας παράλληλα πλήθος δεδομένων δίχως την επίδραση της συνολικής επικοινωνίας από την απώλεια ενός πακέτου (Langley et al., 2017; Liu et al., 2024). Έτσι, επιλύεται σημαντικά το πρόβλημα του Head-of-Line blocking του TCP, δηλαδή της καθυστέρησης της παράδοσης των επόμενων δεδομένων λόγω της απώλειας ενός πακέτου (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022).

Στο QUIC πολύ σημαντική είναι η χρήση ενός μοναδικού Connection ID, το οποίο βοηθά τη συνέχιση μιας σύνδεσης ακόμη και σε περιπτώσεις αλλαγής της διεύθυνσης IP της συσκευής που συμμετέχει στην επικοινωνία (Iyengar & Thomson, 2021; Kumar, 2020). Η παραπάνω δυνατότητα είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε κινητές συσκευές και ασύρματα δίκτυα, καθώς οι αλλαγές σύνδεσης μεταξύ διαφορετικών δικτύων είναι σύνηθες φαινόμενο (Hasselquist et al., 2023).

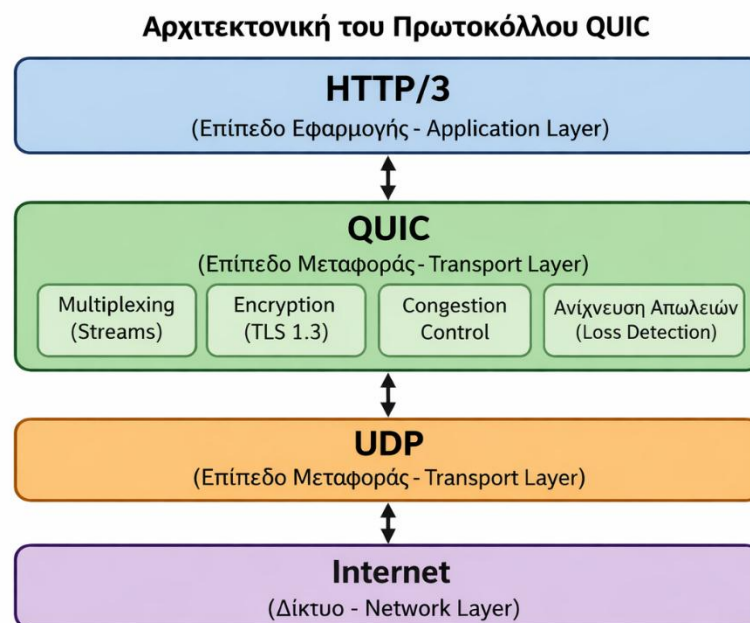
Η αρχιτεκτονική του QUIC περιλαμβάνει μηχανισμούς κρυπτογράφησης, διαχείρισης πακέτων και ελέγχου συμφόρησης, σχεδιασμένους με σκοπό την αποτελεσματική τους λειτουργία σε σύγχρονες διαδικτυακές εφαρμογές υψηλής κίνησης (Iyengar & Swett, 2021; Langley et al., 2017). Η ενσωμάτωση των εν λόγω μηχανισμών στο πρωτόκολλο προσφέρει υψηλότερη απόδοση και μια καλύτερη εμπειρία στον εκάστοτε χρήστη σε σύγκριση με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις που βασίζονται στο TCP (Cook et al., 2017; Liu et al., 2024).

Η ανάπτυξη του QUIC αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη στον τομέα των διαδικτυακών πρωτοκόλλων και συνετέλεσε στη δημιουργία ορισμένων νέων εφαρμογών επιπέδου

εφαρμογής, όπως το HTTP/3, το οποίο αξιοποιεί τις δυνατότητες του QUIC για να βελτιώσει την απόδοση των εφαρμογών ιστού (Gupta & Bartos, 2022; Trevisan et al., 2021). Η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου αυξάνεται συνεχώς τα τελευταία χρόνια, καθώς μεγάλοι οργανισμοί και πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου ενσωματώνουν το QUIC στις υποδομές τους, προκειμένου να βελτιστοποιήσουν την απόδοσης των υπηρεσιών τους (Hasselquist et al., 2023).

3.2.2 Αρχιτεκτονική του QUIC

Η αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου QUIC σχεδιάστηκε στοχεύοντας στη βελτίωση της απόδοσης των διαδικτυακών επικοινωνιών και στην αντιμετώπιση των περιορισμών των παραδοσιακών πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021). Σε αντίθεση με το πρωτόκολλο TCP, το οποίο αποτελεί κομμάτι του πυρήνα των λειτουργικών συστημάτων, το QUIC υλοποιείται κυρίως στο επίπεδο της εφαρμογής και λειτουργεί πάνω από το πρωτόκολλο UDP, κατέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία στην ανάπτυξη και στην εξέλιξή του (Dellaverson et al., 2019). Η εν λόγω προσέγγιση βοηθά στην εισαγωγή νέων μηχανισμών μεταφοράς δεδομένων δίχως την ανάγκη για τροποποιήσεις στο λειτουργικό σύστημα ή στην υποδομή του δικτύου, το οποίο αποτελεί περιοριστικό παράγοντα εξέλιξης του TCP (Kumar, 2020).



Σχήμα 1: Αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου QUIC

Όπως φαίνεται στο σχήμα 1, η κύρια αρχιτεκτονική του QUIC αποτελείται από έναν συνδυασμό λειτουργιών οι οποίες ανήκουν σε διαφορετικά επίπεδα των ποικίλων πρωτοκόλλων του διαδικτύου, όπως η διαχείριση των συνδέσεων, η κρυπτογράφηση και ο έλεγχος της συμφόρησης (Langley et al., 2017; Liu et al., 2024). Πιο ειδικά, συγκεντρώνει μηχανισμούς ασφάλειας που βασίζονται στο πρωτόκολλο TLS 1.3 και συμβάλλει στην κρυπτογράφηση των δεδομένων απευθείας στο επίπεδο μεταφοράς (Iyengar & Thomson, 2021; Gupta & Bartos, 2022). Ως εκ τούτου, μειώνονται τα απαιτούμενα βήματα για την εγκατάσταση μιας ασφαλούς σύνδεσης και βελτιώνεται συνολικά η απόδοση της επικοινωνίας (Dellaverson et al., 2019).

Επίσης, στο QUIC γίνεται χρήση πολλαπλών ανεξάρτητων ροών δεδομένων (streams) μέσα στην ίδια σύνδεση (Langley et al., 2017; Liu et al., 2024). Δηλαδή, κάθε ροή δεδομένων μεταφέρει πληροφορίες ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες και έτσι επιτυγχάνεται η παράλληλη μεταφορά δεδομένων χωρίς να επηρεάζεται η συνολική επικοινωνία λόγω της απώλειας ενός πακέτου (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Το παραπάνω συμβάλλει στην αποφυγή του προβλήματος Head-of-Line blocking, που παρουσιάζεται στο TCP σε περιπτώσεις απώλειας πακέτου και καθυστέρησης της παράδοσης όλων των επόμενων δεδομένων (Cook et al., 2017;).

Επιπλέον, η χρήση ενός μοναδικού Connection ID για την ταυτοποίηση μιας σύνδεσης ανεξαρτήτως διεύθυνσης IP ή θυρών που χρησιμοποιούνται στην επικοινωνία καθιστά δυνατή τη συνέχεια μιας σύνδεσης ακόμη και αν αλλάξει η διεύθυνση IP της συσκευής (Iyengar & Thomson, 2021; Kumar, 2020). Όπως καθίσταται φανερό, αυτό είναι ιδιαίτερος χρήσιμο για τις κινητές συσκευές που μετακινούνται μεταξύ διαφορετικών δικτύων, όπως π.χ. το Wi-Fi και τα κινητά δίκτυα (Hasselquist et al., 2023; Gupta & Bartos, 2022). Η εν λόγω δυνατότητα ονομάζεται connection migration και συμβάλλει στη διατήρηση της σταθερότητας της σύνδεσης σε δυναμικά περιβάλλοντα δικτύου (Liu et al., 2024).

Παραλληλα, η αρχιτεκτονική του QUIC περιλαμβάνει έναν μηχανισμό διαχείρισης πακέτων που εδράζεται στην αρίθμηση πακέτων και στην επιβεβαίωση παραλαβής δεδομένων, όπως συμβαίνει και με το TCP, με σημαντικές, όμως, βελτιώσεις (Iyengar & Swett, 2021; Langley et al., 2017). Ειδικότερα, στο TCP η επαναμετάδοση δεδομένων εκτελείται σε επίπεδο ροής, ενώ στο QUIC η διαχείριση της απώλειας πακέτων γίνεται σε επίπεδο πακέτου. Αυτό επιτρέπει αφενός την ταχύτερη ανίχνευση

απωλειών και αφετέρου την αποτελεσματικότερη επαναμετάδοση των δεδομένων (Liu et al., 2024). Οι εν λόγω μηχανισμοί συμβάλλουν στην αποδοτική λειτουργία του πρωτοκόλλου ακόμη και σε δίκτυα με υψηλή καθυστέρηση ή απώλεια πακέτων (Hasselquist et al., 2023; Gupta & Bartos, 2022).

Όπως έγινε φανερό από τα παραπάνω, η αρχιτεκτονική του QUIC σχεδιάστηκε με σκοπό να συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των παραδοσιακών πρωτοκόλλων μεταφοράς με νέους μηχανισμούς, οι οποίοι ανταποκρίνονται επαρκώς στις ανάγκες των σύγχρονων εφαρμογών του διαδικτύου (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021). Η ενσωμάτωση μηχανισμών ασφάλειας, η χρήση πολλαπλών ροών δεδομένων και η δυνατότητα μετακίνησης συνδέσεων αποτελούν τα κεντρικά χαρακτηριστικά διαφοροποίησης του QUIC από το TCP και συμβάλλουν στη βελτίωση της απόδοσης των διαδικτυακών υπηρεσιών (Gupta & Bartos, 2022; Trevisan et al., 2021).

3.2.3 Διαδικασία σύνδεσης στο QUIC

Ένα από τα κυριότερα στοιχεία διαφοροποίησης του QUIC από τα παραδοσιακά πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων είναι η διαδικασία εγκατάστασης μιας σύνδεσης (Kumar, 2020). Στο TCP προκειμένου να δημιουργηθεί μια σύνδεση οφείλει να ολοκληρωθεί η διαδικασία three-way handshake (Kumar, 2020; Cook et al., 2017), η οποία ενδέχεται να γίνει ακόμη πιο πολύπλοκη, όταν η επικοινωνία χρήζει ασφάλειας μέσω του πρωτοκόλλου TLS (Dellaverson et al., 2019). Η ακολουθία των παραπάνω βημάτων συνήθως αυξάνει σημαντικά τον χρόνο πριν την αποστολή των πρώτων δεδομένων της εφαρμογής (Gupta & Bartos, 2022).

Για τον λόγο αυτό, σχεδιάστηκε το QUIC το οποίο συνδυάζει τη διαδικασία μεταφοράς δεδομένων και την εγκαθίδρυση κρυπτογραφημένης επικοινωνίας σε έναν ενιαίο μηχανισμό σύνδεσης (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021). Η ενσωμάτωση της ασφάλειας απευθείας στο πρωτόκολλο μεταφοράς συμβάλλει στη δημιουργία ασφαλών συνδέσεων με μικρότερο αριθμό ανταλλαγών μηνυμάτων σε σχέση με τον συνδυασμό TCP και TLS (Gupta & Bartos, 2022; Kumar, 2020). Συνεπώς, μειώνεται ο χρόνος για την έναρξη της επικοινωνίας, γεγονός που βοηθά ιδιαίτερα τις εφαρμογές ιστού, στις οποίες η καθυστέρηση κατέχει σημαντικό ρόλο για την εμπειρία του χρήστη (Kumar, 2020).

Στο QUIC η εγκατάσταση της σύνδεσης πραγματοποιείται μέσω διαφορετικών μηχανισμών handshake, οι οποίοι περιλαμβάνουν τις διαδικασίες Initial handshake, 1-RTT handshake και 0-RTT handshake (Iyengar & Thomson, 2021;). Κατά τη διάρκεια της πρώτης σύνδεσης ενός πελάτη με έναν διακομιστή χρησιμοποιείται κυρίως η διαδικασία 1-RTT handshake, η οποία προϋποθέτει ένα πλήρες round-trip μεταξύ των δύο συστημάτων για την ανταλλαγή των απαραίτητων πληροφοριών και τη δημιουργία κρυπτογραφικών κλειδιών (Langley et al., 2017). Ωστόσο, η σύνδεση μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ασφαλή μεταφορά δεδομένων (Dellaverson et al., 2019).

Επιπλέον, ένα ουσιαστικής σημασίας χαρακτηριστικό του QUIC είναι η υποστήριξη της λειτουργίας 0-RTT (Zero Round Trip Time). Συγκεκριμένα, παρέχει τη δυνατότητα σε έναν πελάτη που έχει ήδη συνδεθεί στο παρελθόν με έναν συγκεκριμένο διακομιστή να αποστέλλει δεδομένα αμέσως κατά την έναρξη της νέας του σύνδεσης (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021). Δηλαδή, ο πελάτης χρησιμοποιεί τις πληροφορίες που είναι ήδη αποθηκευμένες από προηγούμενη επικοινωνία για να ξεκινήσει την αποστολή δεδομένων δίχως την αναμονή της ολοκλήρωσης του πλήρους handshake. Επομένως, περιορίζεται σημαντικά η καθυστέρηση της επικοινωνίας, κυρίως σε εφαρμογές στις οποίες απαιτούνται συχνές επανασυνδέσεις με τον ίδιο διακομιστή (Kumar, 2020; Gupta & Bartos, 2022).

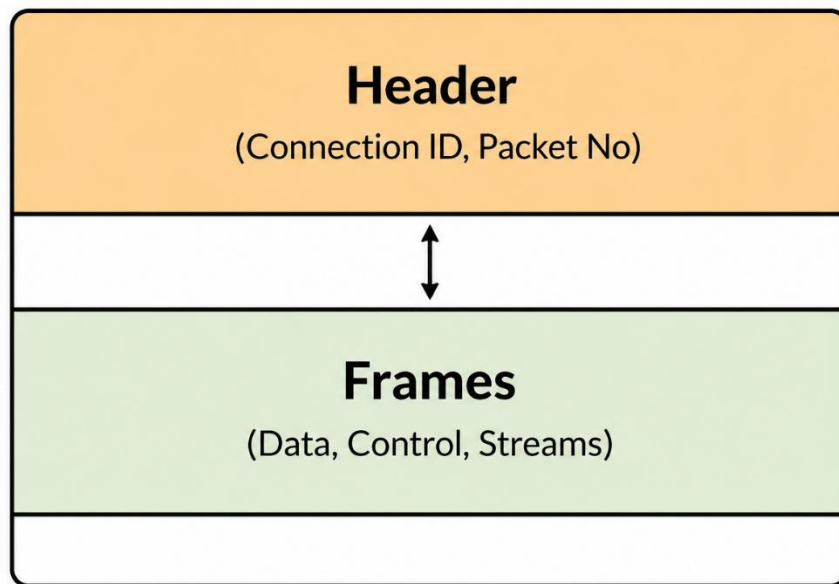
Ωστόσο, παρά τα πλεονεκτήματα της λειτουργίας 0-RTT, για τη χρήση της είναι απαραίτητη μια προσεκτική διαχείριση σχετικά με την ασφάλεια, διότι ορισμένα δεδομένα συχνά είναι ευάλωτα σε επιθέσεις επανάληψης (replay attacks) (Dellaverson et al., 2019). Για τη λύση του εν λόγω ζητήματος, το πρωτόκολλο προβλέπει ορισμένους μηχανισμούς προστασίας που περιορίζουν τους κινδύνους αυτούς, ενώ διασφαλίζουν την ασφάλεια της επικοινωνίας (Iyengar & Thomson, 2021).

Η διαδικασία σύνδεσης του QUIC αποτελεί έναν από τους κύριους λόγους για τους οποίους το πρωτόκολλο δύναται να επιτυγχάνει πιο χαμηλούς χρόνους απόκρισης συγκριτικά με τις παραδοσιακές συνδέσεις TCP και TLS (Langley et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Η μείωση του αριθμού των απαιτούμενων round trips για την εγκατάσταση μιας ασφαλούς σύνδεσης βοηθά στην ταχύτερη έναρξη της μεταφοράς των δεδομένων, καθώς και στη βελτίωση της απόδοσης των εφαρμογών του διαδικτύου (Cook et al., 2017; Hasselquist et al., 2023).

3.2.4 Πακέτο QUIC

Η δομή των πακέτων κατέχει κύριο ρόλο στον τρόπο λειτουργίας του πρωτοκόλλου QUIC, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο μεταφέρονται τα δεδομένα μεταξύ του πελάτη και του διακομιστή στο δίκτυο. Το TCP διαχειρίζεται τα πακέτα κυρίως σε επίπεδο λειτουργικού συστήματος, ενώ αντίθετα στο QUIC η υλοποίηση των μηχανισμών διαχείρισης των πακέτων γίνεται στο επίπεδο της εφαρμογής, παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία στην οργάνωση της μεταφοράς των δεδομένων (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021). Με τον παραπάνω τρόπο επιτυγχάνεται η ταχύτερη εξέλιξη του πρωτοκόλλου και η βελτίωση των μηχανισμών μεταφοράς δεδομένων χωρίς αλλαγές στον πυρήνα των λειτουργικών συστημάτων (Dellaverson et al., 2019; Kumar, 2020).

Ένα πακέτο QUIC αποτελείται από δύο κύρια μέρη, την κεφαλίδα (header) και τα πλαίσια δεδομένων (frames), τα οποία μεταφέρουν τις πληροφορίες της επικοινωνίας (Iyengar & Thomson, 2021; Liu et al., 2024). Η κεφαλίδα περιλαμβάνει τις απαραίτητες πληροφορίες για τη διαχείριση της σύνδεσης, όπως για παράδειγμα το αναγνωριστικό σύνδεσης (Connection ID), τον αριθμό πακέτου και διάφορες άλλες παραμέτρους της επεξεργασίας των δεδομένων από τον παραλήπτη (Langley et al., 2017). Από την άλλη πλευρά, τα frames περιέχουν τα πραγματικά δεδομένα της εφαρμογής και τις πληροφορίες ελέγχου αναφορικά με τη λειτουργία του πρωτοκόλλου (Dellaverson et al., 2019).



Σχήμα 2: Πακέτο QUIC

Σημαντικό χαρακτηριστικό της δομής των πακέτων στο QUIC αποτελεί η κρυπτογράφηση σχεδόν όλων των δεδομένων του πακέτου, με σκοπό την προστασία της επικοινωνίας από επιθέσεις παρακολούθησης ή τροποποίησης των δεδομένων (Iyengar & Thomson, 2021; Gupta & Bartos, 2022). Στο TCP το μεγαλύτερο μέρος της επικοινωνίας ενδέχεται να είναι ορατό σε ενδιάμεσες συσκευές δικτύου, ενώ αντίθετα το QUIC είναι σχεδιασμένο με σκοπό την προστασία της ιδιωτικότητας των δεδομένων και έτσι περιορίζει την ανάλυση της κίνησης από τρίτους (Langley et al., 2017; Dellaverson et al., 2019).

Επίσης, η δομή των πακέτων στο QUIC συμβάλλει στη μεταφορά πολλαπλών ροών δεδομένων στην ίδια σύνδεση, αφού τα frames αντιστοιχούν σε διαφορετικά streams και λειτουργούν ανεξάρτητα μεταξύ τους (Liu et al., 2024). Συνεπώς, επιτυγχάνεται η παράλληλη μεταφορά των δεδομένων από πληθώρα εφαρμογών ή διαδικασιών χωρίς τη δημιουργία καθυστερήσεων εξαιτίας της απώλειας πακέτων σε μία μοναδική ροή δεδομένων (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Όπως φαίνεται, το QUIC βελτιώνει την απόδοση των εφαρμογών ιστού οι οποίες προϋποθέτουν τη μεταφορά πολλών αντικειμένων μέσω του δικτύου (Cook et al., 2017).

Η χρήση μοναδικών αριθμών πακέτων (packet numbers) επιτρέπει στον παραλήπτη να εντοπίζει τις απώλειες δεδομένων και να διαχειρίζεται αποτελεσματικά την επαναμετάδοση πακέτων (Liu et al., 2024). Στο TCP η αρίθμηση συνδέεται άμεσα με τη ροή δεδομένων, ενώ αντίθετα στο QUIC το εκάστοτε πακέτο κατέχει έναν μοναδικό αριθμό και συνεπώς συμβάλλει τόσο στην ανίχνευση των απωλειών ταχύτατα όσο και στην αποτελεσματικότερη διαχείριση της επικοινωνίας (Iyengar & Swett, 2021; Langley et al., 2017).

Η αρχιτεκτονική των πακέτων του QUIC σχεδιάστηκε με σκοπό την αποτελεσματική υποστήριξη των σύγχρονων εφαρμογών ιστού, οι οποίες χρήζουν υψηλών ταχυτήτων μετάδοσης δεδομένων και χαμηλής καθυστέρησης (Langley et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Συγκεκριμένα, το εν λόγω πρωτόκολλο μέσω της χρήσης κρυπτογραφημένων πακέτων επιτυγχάνει υψηλότερη απόδοση συγκριτικά με τις παραδοσιακές προσεγγίσεις που έχουν ως βάση το TCP (Cook et al., 2017; Hasselquist et al., 2023).

3.2.5 Διαδικασία ανάκαμψης στο πρωτόκολλο QUIC

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων σε ένα δίκτυο είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία του. Ωστόσο, απαιτεί μηχανισμούς που εντοπίζουν απώλειες πακέτων και προσαρμόζουν τη μετάδοση των δεδομένων στις συνθήκες του εκάστοτε δικτύου (Iyengar & Swett, 2021). Για την επίτευξη αυτού του στόχου, το πρωτόκολλο QUIC περιλαμβάνει μηχανισμούς ανίχνευσης απώλειας πακέτων (loss detection) και ελέγχου συμφόρησης (congestion control), οι οποίοι συμβάλλουν στην αποτελεσματική διαχείριση της επικοινωνίας, ακόμη και σε δίκτυα με υψηλή καθυστέρηση ή απώλεια πακέτων (Langley et al., 2017). Έτσι, διατηρείται η υψηλή απόδοση στη μεταφορά δεδομένων και προσαρμόζεται ο ρυθμός αποστολής πακέτων ανάλογα με τις συνθήκες του εκάστοτε δικτύου (Liu et al., 2024; Hasselquist et al., 2023).

Η ανίχνευση της απώλειας πακέτων στο πρωτόκολλο QUIC είναι βασισμένη στη χρήση μοναδικών αριθμών πακέτων (packet numbers) και μηχανισμών επιβεβαίωσης παραλαβής δεδομένων, βοηθώντας τον αποστολέα να εντοπίζει άμεσα τα πακέτα που δεν έχουν αποσταλεί στον προορισμό τους (Iyengar & Swett, 2021; Langley et al., 2017). Ακόμη, όταν ένας αποστολέας αντιληφθεί ότι ένα πακέτο δεν έχει επιβεβαιωθεί

σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το πρωτόκολλο θεωρεί ότι το πακέτο έχει χαθεί και το επαναμεταδίδει (Liu et al., 2024). Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται η ταχεία αποκατάσταση της επικοινωνίας και μειώνονται οι επιπτώσεις της απώλειας των πακέτων στην απόδοση της σύνδεσης (Hasselquist et al., 2023; Gupta & Bartos, 2022).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του QUIC σε σχέση με το TCP είναι ότι η επαναμετάδοση δεδομένων πραγματοποιείται σε επίπεδο πακέτου και όχι σε επίπεδο ροής δεδομένων. Συγκεκριμένα, στο TCP η απώλεια ενός πακέτου καθυστερεί και την παράδοση όλων των επόμενων δεδομένων λόγω του φαινομένου Head-of-Line blocking, επιδρώντας αρνητικά στην απόδοση της σύνδεσης (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Αντίθετα, στο QUIC η απώλεια ενός πακέτου επιδρά αρνητικά μόνο στη συγκεκριμένη ροή δεδομένων στην οποία ανήκει, ενώ οι υπόλοιπες ροές συνεχίζουν την κανονική μεταφορά των δεδομένων (Langley et al., 2017). Το παραπάνω επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων του δικτύου, ενώ μειώνει σημαντικά τις καθυστερήσεις στην επικοινωνία (Liu et al., 2024).

Ο μηχανισμός ελέγχου συμφόρησης του QUIC λειτουργεί παρόμοια με τους μηχανισμούς που χρησιμοποιούνται στο TCP, αλλά είναι σχεδιασμένος με σκοπό την καλύτερη προσαρμογή του στις σύγχρονες συνθήκες του δικτύου (Iyengar & Swett, 2021; Langley et al., 2017). Το πρωτόκολλο παρακολουθεί συνεχώς τις επιβεβαιώσεις παραλαβής πακέτων και χρησιμοποιεί αυτές τις πληροφορίες, ώστε να προσαρμόζει τον ρυθμό αποστολής δεδομένων και να αποφεύγει την υπερφόρτωση του δικτύου (Hasselquist et al., 2023; Gupta & Bartos, 2022). Ακόμη, όταν εντοπίζει στοιχεία συμφόρησης, όπως αυξημένες καθυστερήσεις ή απώλειες πακέτων, μειώνει προσωρινά τον ρυθμό μετάδοσης δεδομένων μέχρι οι συνθήκες του δικτύου να βελτιωθούν (Liu et al., 2025).

Επιπλέον, το QUIC χρησιμοποιεί μηχανισμούς χρονισμού και υπολογισμού καθυστέρησης για την καλύτερη εκτίμηση της κατάστασης του δικτύου. Συγκεκριμένα, παρακολουθείται ο χρόνος που χρειάζεται για την επιβεβαίωση παραλαβής των πακέτων και έτσι προσαρμόζει δυναμικά τη στρατηγική μετάδοσης των δεδομένων, βελτιστοποιώντας την απόδοση της σύνδεσης (Iyengar & Swett, 2021; Langley et al., 2017). Συνεπώς, επιτυγχάνεται η αποτελεσματική λειτουργία του πρωτοκόλλου ακόμη και σε δίκτυα υψηλής καθυστέρησης ή με ασταθή σύνδεση, όπως τα κινητά δίκτυα (Hasselquist et al., 2023; Gupta & Bartos, 2022).

Οι μηχανισμοί ανίχνευσης απώλειας πακέτων και ελέγχου συμφόρησης του QUIC συμβάλλουν σημαντικά στη βελτίωση της απόδοσης των διαδικτυακών εφαρμογών (Langley et al., 2017). Το πρωτόκολλο QUIC παρέχει μια πιο αποδοτική και σταθερή επικοινωνία σε σχέση με τις παραδοσιακές, βασισμένες στο TCP προσεγγίσεις, καθώς ανιχνεύει άμεσα και ταχύτατα τις απώλειες, διαχειρίζεται ανεξάρτητα τις ροές των δεδομένων και προσαρμόζει δυναμικά τον ρυθμό μετάδοσής τους (Hasselquist et al., 2023).

3.2.6 Μειονεκτήματα και περιορισμοί του QUIC

Το πρωτόκολλο QUIC σχεδιάστηκε προκειμένου να βελτιωθεί η απόδοση των διαδικτυακών επικοινωνιών, ωστόσο η υιοθέτησή του περιλαμβάνει ορισμένες προκλήσεις και περιορισμούς αναφορικά με την τεχνολογική του υλοποίηση και τη λειτουργία του στο σύγχρονο οικοσύστημα του διαδικτύου (Trevisan et al., 2021; Saif et al., 2021). Οι περιορισμοί αφορούν κυρίως ζητήματα συμβατότητας με τις υπάρχουσες υποδομές δικτύου, με την πολυπλοκότητα της υλοποίησης του πρωτοκόλλου καθώς και με τη δυσκολία παρακολούθησης της κίνησης του δικτύου λόγω της μεγάλης χρήσης της κρυπτογράφησης (Zhang et al., 2023; Cook et al., 2017).

Η χρήση του UDP, ως υποκείμενου πρωτοκόλλου μεταφοράς, βοηθά το QUIC στην υλοποίηση των μηχανισμών μεταφοράς δεδομένων σε επίπεδο εφαρμογής (Trevisan et al., 2019). Ωστόσο, σε ορισμένα δίκτυα η κίνηση UDP περιορίζεται ή ελέγχεται από ενδιάμεσες συσκευές ασφαλείας, όπως firewalls και middleboxes (Zhang et al., 2023). Αυτό καθιστά την επικοινωνία μέσω QUIC συχνά αντιμέτωπη με ορισμένες δυσκολίες ή εξαρτημένη από εναλλακτικούς μηχανισμούς επικοινωνίας μέσω παραδοσιακών πρωτοκόλλων όπως το TCP (Saif et al., 2021; Cook et al., 2017).

Σημαντική πρόκληση αποτελεί η δυσκολία παρακολούθησης και ανάλυσης της κίνησης του δικτύου. Το QUIC είναι σχεδιασμένο με σκοπό την κρυπτογραφημένη μεταφορά του μεγαλύτερου μέρους των δεδομένων και συνεπώς προστατεύει την ιδιωτικότητα των χρηστών (Zhang et al., 2023). Ωστόσο, συγχρόνως περιορίζει τη δυνατότητα των διαχειριστών δικτύου να αναλύουν τη συμπεριφορά της κίνησης και να εντοπίζουν πιθανά προβλήματα απόδοσης ή ασφάλειας (Trevisan et al., 2021). Σε παραδοσιακά πρωτόκολλα, όπως είναι το TCP, πολλές πληροφορίες αναφορικά με τη

σύνδεση είναι ορατές από ενδιάμεσες συσκευές δικτύου, διευκολύνοντας την παρακολούθηση και τη διαχείριση της κίνησης (Cook et al., 2017; Saif et al., 2021).

Επιπλέον, η υλοποίηση του QUIC είναι πιθανό να αυξήσει την πολυπλοκότητα των εφαρμογών και των διακομιστών που το χρησιμοποιούν. Το πρωτόκολλο υλοποιείται στο επίπεδο της εφαρμογής και όχι στο επίπεδο του πυρήνα του λειτουργικού συστήματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλές από τις λειτουργίες, που στο TCP παρέχονται από το λειτουργικό σύστημα, να πρέπει να υλοποιηθούν απευθείας από τις εφαρμογές ή τις βιβλιοθήκες που το χρησιμοποιούν (Langley et al., 2017; Saif et al., 2021). Το παραπάνω αυξάνει την κατανάλωση των υπολογιστικών πόρων, καθώς και την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού των συστημάτων που το χρησιμοποιούν (Zhang et al., 2023; Trevisan et al., 2021).

Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας επίδρασης στην υιοθέτηση του QUIC είναι ότι το πρωτόκολλο βρίσκεται ακόμη σε σχετικά πρώιμο στάδιο ανάπτυξης συγκριτικά με το TCP, το οποίο χρησιμοποιείται στο διαδίκτυο ήδη αρκετές δεκαετίες (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Μολονότι μεγάλοι οργανισμοί (εταιρείες τεχνολογίας και πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου) έχουν ενσωματώσει στις υποδομές τους το QUIC, απαιτείται χρόνος για την πλήρη υιοθέτησή του, καθώς χρειάζεται να γίνουν ορισμένες αλλαγές στις εφαρμογές και στις υποδομές δικτύου (Trevisan et al., 2021; Zhang et al., 2023).

Ωστόσο, σε ποικίλες μελέτες υποστηρίζεται ότι τα πλεονεκτήματα του QUIC αναφορικά με την απόδοση, την ασφάλεια και την ευελιξία είναι πιο σημαντικά από τις δυσκολίες υλοποίησής του (Langley et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Μέσω της συνεχούς εξέλιξης του πρωτοκόλλου και της αυξανόμενης υιοθέτησης του από τις εφαρμογές ιστού και τις σύγχρονες διαδικτυακές υπηρεσίες αποδεικνύεται ότι η σημασία του στην εξέλιξη των πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων στο διαδίκτυο (Trevisan et al., 2021; Hasselquist et al., 2023).

3.3 Το HTTP/3 και η σχέση του με το QUIC

3.3.1 Εξέλιξη των πρωτοκόλλων HTTP

Το Hypertext Transfer Protocol (HTTP) αποτελεί το κυριότερο πρωτόκολλο επικοινωνίας που χρησιμοποιείται στον Παγκόσμιο Ιστό σχετικά με τη μεταφορά

δεδομένων. Μέσω αυτού του πρωτοκόλλου πραγματοποιείται η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των πελατών (π.χ φυλλομετρητές ιστού κ.α.) και των διακομιστών διαδικτυακού περιεχομένου (Gupta & Bartos, 2022; Cook et al., 2017). Η εξέλιξή του είναι ιδιαίτερα σημαντική προκειμένου να καλυφθούν οι αυξανόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών ιστού λόγω της μεγάλης ανάπτυξης του διαδικτύου καθώς και της αύξησης της πολυπλοκότητας των ιστοσελίδων (Trevisan et al., 2021; Liu et al., 2024).

Η έκδοση HTTP/1.1 χρησιμοποιήθηκε για μεγάλο χρονικό διάστημα ως το κύριο πρωτόκολλο επικοινωνίας στον ιστό και εισήγαγε σημαντικές βελτιώσεις, όπως οι persistent connections, που συμβάλλουν στην αποστολή πολλαπλών αιτημάτων μέσω της ίδιας σύνδεσης TCP (Cook et al., 2017). Ωστόσο, ενυπάρχουν και ορισμένοι περιορισμοί, όπως η διαδοχική επεξεργασία των αιτημάτων αιτήματα μέσα στην ίδια σύνδεση η οποία προκαλεί καθυστερήσεις στην επικοινωνία (Gupta & Bartos, 2022).

Ειδικότερα, σημαντικό περιορισμό της εν λόγω προσέγγισης αποτελεί το φαινόμενο Head-of-Line blocking, (Cook et al., 2017; Liu et al., 2024) το οποίο παρατηρείται κυρίως σε σύγχρονες ιστοσελίδες με μεγάλο αριθμό αντικειμένων, όπως είναι οι εικόνες και τα αρχεία JavaScript. Για τον λόγο αυτό οι εφαρμογές έκαναν χρήση πολλαπλών ταυτόχρονων συνδέσεων TCP με σκοπό την αντιμετώπισή του (Trevisan et al., 2021). Ωστόσο, έτσι αυξάνεται ιδιαίτερα η πολυπλοκότητα της επικοινωνίας (Gupta & Bartos, 2022).

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, αναπτύχθηκε το HTTP/2 το οποίο συμπεριλαμβάνει ορισμένες σημαντικές βελτιώσεις στον τρόπο μεταφοράς δεδομένων. Κύρια βελτίωσή του αποτελεί το multiplexing, δηλαδή η δυνατότητα ταυτόχρονης μεταφοράς πολλαπλών αιτημάτων και απαντήσεων μέσω μιας μοναδικής σύνδεσης TCP (Cook et al., 2017; Liu et al., 2024). Ωστόσο, το HTTP/2 εδράζεται στο TCP και επομένως επηρεάζεται από τους περιορισμούς του πρωτοκόλλου μεταφοράς, όπως το Head-of-Line blocking σε επίπεδο TCP όπως αναφέρθηκε παραπάνω (Langley et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022).

Οι εν λόγω περιορισμοί είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη της έκδοσης HTTP/3, το οποίο χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο QUIC αντί για το TCP στη μεταφορά των δεδομένων. Η χρήση του QUIC βοηθά τόσο στην αποτελεσματικότερη διαχείριση των

συνδέσεων όσο και στη μείωση της καθυστέρησης της μεταφοράς των δεδομένων (Gupta & Bartos, 2022; Langley et al., 2017).

3.3.2 Το HTTP/2 και οι περιορισμοί του

Το HTTP/2 αναπτύχθηκε με στόχο τη βελτίωση της απόδοσης του Παγκόσμιου Ιστού και την αντιμετώπιση των περιορισμών του HTTP/1.1 (Gupta & Bartos, 2022; Cook et al., 2017). Η ανάπτυξή του εδράζεται κυρίως στο πρωτόκολλο SPDY, το οποίο είναι σχεδιασμένο από την Google, ώστε να συμβάλλει στη μείωση της καθυστέρησης της μεταφοράς δεδομένων στον ιστό (Trevisan et al., 2019; Liu et al., 2024).

Ιδιαίτερης σημασία είναι ορισμένες καινοτομίες του HTTP/2 όπως η υποστήριξη multiplexing, που παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης μεταφοράς πολλαπλών αιτημάτων και απαντήσεων μέσω μιας μόνο σύνδεσης TCP (Cook et al., 2017;). Επιπλέον, ορισμένοι μηχανισμοί του πρωτοκόλλου όπως η συμπίεση κεφαλίδων μέσω του αλγορίθμου HPACK και η λειτουργία server push μειώνουν τον όγκο των δεδομένων και βελτιώνουν σημαντικά τον χρόνο φόρτωσης των ιστοσελίδων (Cook et al., 2017).

Ωστόσο, το HTTP/2 έχει ακόμη τις βάσεις του στο TCP και συνεπώς επηρεάζεται από περιορισμούς του επιπέδου μεταφοράς. Η απώλεια ενός πακέτου TCP καθυστερεί την παράδοση των επόμενων δεδομένων μέχρι την επόμενη μετάδοση, ως επακόλουθο την καθυστέρηση της επικοινωνίας (Liu et al., 2024). Επιπλέον, η δημιουργία σύνδεσης μέσω TCP και η διεκπεραίωση μιας ασφαλούς επικοινωνίας μέσω TLS προϋποθέτουν την εκτέλεση πολλαπλών round trips πριν την έναρξη της μεταφοράς των δεδομένων (Gupta & Bartos, 2022; Cook et al., 2017).

Οι εν λόγω περιορισμοί αποτέλεσαν κύριους λόγους ανάπτυξης του HTTP/3, το οποίο βασίζεται στο QUIC και διαχειρίζεται αποτελεσματικότερα την επικοινωνία στο διαδίκτυο (Langley et al., 2017; Hasselquist et al., 2023).

3.3.3 Το HTTP/3

Το HTTP/3 είναι η πιο πρόσφατη εξέλιξη του πρωτοκόλλου HTTP. Στόχος του είναι η βελτίωση της απόδοσης των διαδικτυακών εφαρμογών μέσω της αξιοποίησης των δυνατοτήτων του πρωτοκόλλου QUIC (Gupta & Bartos, 2022; Trevisan et al., 2019). Η εξέλιξη του πρωτοκόλλου χρησιμοποιεί το QUIC το οποίο λειτουργεί πάνω από το UDP και είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε να συμβάλλει στη μείωση της καθυστέρησης της επικοινωνίας (Langley et al., 2017; Liu et al., 2024).

Η χρήση του QUIC βοηθά το HTTP/3 να αντιμετωπίζει τα προβλήματα του επιπέδου μεταφοράς στο TCP, όπως το Head-of-Line blocking. Συγκεκριμένα, κάθε αίτημα HTTP μεταφέρεται μέσω ενός ξεχωριστού stream μέσα στη σύνδεση QUIC, μεταφέροντας πολλαπλά αιτήματα ταυτόχρονα δίχως την επίδραση των υπόλοιπων ροών από την απώλεια ενός πακέτου (Gupta & Bartos, 2022).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του HTTP/3 είναι ότι η ασφάλεια αποτελεί ενσωματωμένο στοιχείο της επικοινωνίας, διότι το QUIC χρησιμοποιεί υποχρεωτική κρυπτογράφηση η οποία βασίζεται στο TLS 1.3 (Gupta & Bartos, 2022). Συνεπώς, μειώνεται ο αριθμός των ανταλλαγών μηνυμάτων με σκοπό τη δημιουργία μιας ασφαλούς σύνδεσης (Iyengar & Thomson, 2021).

Επιπλέον, η συγκεκριμένη έκδοση αξιοποιεί ορισμένες δυνατότητες του QUIC όπως το connection migration, το οποίο συμβάλλει στη συνέχιση μιας σύνδεσης ακόμη και μετά την αλλαγή της διεύθυνσης IP της συσκευής (Hasselquist et al., 2023).

3.3.4 Πώς λειτουργεί το HTTP/3 πάνω στο QUIC

Το HTTP/3 χρησιμοποιεί το QUIC ως ένα υποκείμενο πρωτόκολλο μεταφοράς για τη διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ του πελάτη και του διακομιστή (Langley et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Στη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική, το QUIC δημιουργεί τις συνδέσεις και αναλαμβάνει τόσο την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων και την κρυπτογράφηση της επικοινωνίας όσο και τον έλεγχο συμφόρησης στο δίκτυο (Iyengar & Thomson, 2021; Liu et al., 2024).

Η λειτουργία του HTTP/3 εδράζεται στην αξιοποίηση των streams, τα οποία αποτελούν ανεξάρτητες ροές δεδομένων μέσα σε μία σύνδεση QUIC (Langley et al., 2017;).

Δηλαδή, κάθε αίτημα HTTP αντιστοιχεί και σε ένα ξεχωριστό stream, συμβάλλοντας στην επίτευξη της ταυτόχρονης μεταφοράς πολλαπλών αιτημάτων και απαντήσεων χωρίς καθυστερήσεις σε περιπτώσεις πακέτων που έχουν χαθεί (Liu et al., 2024).

Τα δεδομένα οργανώνονται σε frames που μεταφέρονται μέσα στα πακέτα του QUIC. Συγκεκριμένα, τα frames περιλαμβάνουν τα δεδομένα της εφαρμογής και τις πληροφορίες ελέγχου οι οποίες χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση της επικοινωνίας μεταξύ πελάτη και διακομιστή (Iyengar & Thomson, 2021; Liu et al., 2024).

Η συνεργασία ανάμεσα στο HTTP/3 και στο QUIC έχει ως αποτέλεσμα την αποτελεσματικότερη διαχείριση της επικοινωνίας του διαδικτύου και συμβάλλει σημαντικά τόσο στη μείωση της καθυστέρησης όσο και κατά τη μεταφορά δεδομένων στον ιστό (Gupta & Bartos, 2022; Hasselquist et al., 2023).

3.3.5 Σύγκριση HTTP/2 και HTTP/3

Η μετάβαση από το HTTP/2 στο HTTP/3 αποτελεί μια πολύ σημαντική εξέλιξη στη λειτουργία των διαδικτυακών πρωτοκόλλων. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το HTTP/2 εδράζεται στο TCP, ενώ το HTTP/3 χρησιμοποιεί το QUIC, το οποίο λειτουργεί πάνω από το UDP (Gupta & Bartos, 2022).

Κύρια διαφορά των δύο πρωτοκόλλων αποτελεί ο τρόπος διαχείρισης των απωλεσθέντων πακέτων και της καθυστέρησης στην επικοινωνία. Ειδικότερα, στο HTTP/2 η απώλεια ενός πακέτου TCP συχνά καθυστερεί και την παράδοση όλων των επόμενων δεδομένων (Langley et al., 2017). Αντίθετα, στο HTTP/3 οι ανεξάρτητες ροές δεδομένων του QUIC επιτυγχάνουν τη συνέχιση της επικοινωνίας χωρίς να επηρεάζονται οι υπόλοιπες ροές (Gupta & Bartos, 2022).

Επιπλέον, το HTTP/3 συμβάλλει στην ταχύτερη εγκατάσταση της σύνδεσης, αφού το QUIC κατέχει έναν ενιαίο μηχανισμό για τη δημιουργία σύνδεσης και την κρυπτογράφηση της επικοινωνίας (Iyengar & Thomson, 2021). Με αυτόν τον τρόπο καθίσταται μικρότερος ο χρόνος έναρξης της επικοινωνίας, ενώ βελτιώνεται σημαντικά η εμπειρία των χρηστών κατά τη φόρτωση των ιστοσελίδων (Trevisan et al., 2021).

Συνεπώς, όπως γίνεται εμφανές, το HTTP/3 αξιοποιεί τα πλεονεκτήματα του QUIC με σκοπό την προσφορά χαμηλότερης καθυστέρησης και πιο αποδοτικής επικοινωνίας

στις σύγχρονες διαδικτυακές εφαρμογές (Gupta & Bartos, 2022; Hasselquist et al., 2023).

3.4 Απόδοση του QUIC

3.4.1 Σύγκριση QUIC και TCP

Ένας σημαντικός παράγοντας για τη λειτουργία των διαδικτυακών εφαρμογών αποτελεί η απόδοση των πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων. Για τον παραπάνω λόγο, σε αρκετές μελέτες συγκρίνεται το QUIC με το παραδοσιακό πρωτόκολλο TCP και εξετάζεται η συμπεριφορά τους σε ποικίλα περιβάλλοντα δικτύου (Cook et al., 2017; Hasselquist et al., 2023). Από τα αποτελέσματα των μελετών αναδεικνύεται η σημαντική προσφορά του QUIC στη βελτίωση της απόδοσης της επικοινωνίας, κυρίως σε εφαρμογές που χρήζουν χαμηλής καθυστέρησης, καθώς και άμεσης μεταφοράς των δεδομένων (Gupta & Bartos, 2022; Zhang et al., 2023).

Ακόμη, σημαντικό πλεονέκτημα του QUIC αποτελεί ο μικρότερος χρόνος που απαιτείται για την εγκατάσταση μιας σύνδεσης. Πιο ειδικά, στις συνδέσεις TCP είναι απαραίτητη η διαδικασία three-way handshake, ενώ σε περιπτώσεις χρήσης TLS χρειάζονται επιπλέον ανταλλαγές μηνυμάτων μεταξύ πελάτη και διακομιστή (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Αντίθετα, στο QUIC συνδυάζεται η δημιουργία σύνδεσης και η εγκαθίδρυση ασφαλούς επικοινωνίας μέσω ενός ενιαίου μηχανισμού και μειώνεται ο αριθμός των round trips που απαιτούνται για την αποστολή των δεδομένων (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021).

Επιπλέον, το QUIC βελτιώνει τη διαχείριση της απώλειας πακέτων σε σχέση με το TCP. Η απώλεια ενός πακέτου στο TCP καθυστερεί και την παράδοση των επόμενων δεδομένων λόγω του Head-of-Line blocking, ενώ αντίθετα στο QUIC οι ανεξάρτητες ροές δεδομένων βοηθούν στη συνέχιση της μεταφοράς ακόμη και σε περιπτώσεις χαμένων πακέτων (Cook et al., 2017; Langley et al., 2017). Παράλληλα, μολονότι το QUIC υλοποιείται στο επίπεδο της εφαρμογής, παρέχει μεγαλύτερη ευελιξία εξέλιξης και προσαρμογής του στις σύγχρονες και ποικίλες απαιτήσεις του δικτύου (Hasselquist et al., 2023).

Ωστόσο, η απόδοση του QUIC δεν είναι μεγαλύτερη από εκείνη του TCP σε όλες τις περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, τα δύο πρωτόκολλα συχνά λειτουργούν παρόμοια σε

σταθερά δίκτυα με χαμηλή απώλεια πακέτων, ενώ αντίθετα σε δίκτυα με υψηλή καθυστέρηση το QUIC υπερέχει λόγω της αποτελεσματικότερης διαχείρισης των πακέτων και των ανεξάρτητων streams (Hasselquist et al., 2023; Zhang et al., 2023). Κατά συνέπεια, το QUIC μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των διαδικτυακών εφαρμογών στα πιο απαιτητικά επικοινωνιακά περιβάλλοντα (Gupta & Bartos, 2022; Trevisan et al., 2021).

3.4.2 Latency και χρόνος απόκρισης

Η καθυστέρηση στη μεταφορά δεδομένων επηρεάζει άμεσα την απόδοση των διαδικτυακών εφαρμογών και την εμπειρία των χρηστών του διαδικτύου (Cook et al., 2017). Ο χρόνος απόκρισης μιας εφαρμογής εξαρτάται κυρίως τόσο από τον χρόνο εγκατάστασης της σύνδεσης όσο και από τη συμπεριφορά του πρωτοκόλλου κατά τη μεταφορά των δεδομένων (Gupta & Bartos, 2022).

Το QUIC συμβάλλει στη μείωση της καθυστέρησης κυρίως μέσω του τρόπου με τον οποίο δημιουργείται η σύνδεση. Στο TCP χρειάζονται ξεχωριστά βήματα για τη δημιουργία μιας σύνδεσης και την επίτευξη μιας ασφαλούς επικοινωνίας μέσω TLS (Langley et al., 2017). Αντίθετα, στο QUIC ενσωματώνονται μηχανισμοί κρυπτογράφησης μέσα στο ίδιο το πρωτόκολλο μεταφοράς (Iyengar & Thomson, 2021). Επιπλέον, η λειτουργία 0-RTT παρέχει τη δυνατότητα στον πελάτη που έχει επικοινωνήσει με έναν διακομιστή να αποστείλει τα δεδομένα άμεσα κατά την έναρξη της σύνδεσης, δίχως την πραγματοποίηση της πλήρους διαδικασίας handshake (Gupta & Bartos, 2022; Hasselquist et al., 2023).

Η μείωση της καθυστέρησης σχετίζεται άμεσα η διαχείριση των πακέτων που χάθηκαν. Όσον αφορά τις συνδέσεις TCP, η απώλεια ενός πακέτου ενδέχεται να επιδράσει αρνητικά στον χρόνο απόκρισης λόγω του Head-of-Line blocking (Cook et al., 2017). Αντίθετα, στο QUIC οι ανεξάρτητες ροές δεδομένων παρέχουν τη δυνατότητα συνέχισης της επικοινωνίας χωρίς το μπλοκάρισμα όλων των πακέτων (Langley et al., 2017). Παράλληλα, οι μηχανισμοί δυναμικής διαχείρισης της συμφόρησης και της ταχύτερης ανίχνευσης της απώλειας των πακέτων αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες αποτελεσματικής προσαρμογής του QUIC στις συνθήκες του δικτύου (Iyengar & Swett, 2021; Hasselquist et al., 2023).

Σε πληθώρα μελετών υποστηρίζεται ότι το QUIC μπορεί να μειώσει τον χρόνο φόρτωσης ιστοσελίδων και να βελτιώσει τον χρόνο απόκρισης των εφαρμογών, κυρίως σε περιβάλλοντα δικτύων με υψηλή καθυστέρηση ή απώλεια πακέτων (Cook et al., 2017; Zhang et al., 2023).

3.4.3 Απόδοση σε κινητά δίκτυα

Στις μέρες μας χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερες διαδικτυακές εφαρμογές μέσω κινητών συσκευών και ασύρματων συνδέσεων. Σε αυτά τα περιβάλλοντα παρουσιάζονται συχνά ορισμένα προβλήματα όπως η μεγάλη καθυστέρηση, η μεταβαλλόμενη ποιότητα σύνδεσης και η απώλεια πακέτων, τα οποία επιδρούν άμεσα στην απόδοση των παραδοσιακών πρωτοκόλλων μεταφοράς (Hasselquist et al., 2023; Gupta & Bartos, 2022).

Το QUIC στα κινητά δίκτυα κατέχει τη δυνατότητα connection migration, η οποία συμβάλλει στη συνέχιση της σύνδεσης ακόμη και μετά από μεταβολές της διεύθυνσης IP της συσκευής (Iyengar & Thomson, 2021). Το παραπάνω είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιπτώσεις μετακίνησης των χρηστών ανάμεσα σε διαφορετικά δίκτυα, όπως για παράδειγμα από ένα δίκτυο κινητής τηλεφωνίας σε Wi-Fi σε μία σύνδεση (Hasselquist et al., 2023).

Επιπλέον, το πρωτόκολλο QUIC κατέχει πιο επιτυχείς τρόπους για την αντιμετώπιση της απώλειας πακέτων. Ειδικά σε ασύρματα περιβάλλοντα, όπου η ποιότητα του σήματος μεταβάλλεται συχνά, αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό. Εν αντιθέσει με το TCP, στο οποίο η απώλεια ενός πακέτου επηρεάζει ολόκληρη τη ροή της επικοινωνίας, στο QUIC συνεχίζεται η μεταφορά μέσω ανεξάρτητων streams (Cook et al., 2017; Langley et al., 2017). Επίσης, φαίνεται ότι η ταχύτερη εγκατάσταση της σύνδεσης και η χρήση 0-RTT συμβάλλουν καθοριστικά στη μείωση του χρόνου για την έναρξη της επικοινωνίας (Iyengar & Thomson, 2021; Hasselquist et al., 2023).

Σε ορισμένες πειραματικές μελέτες καθίσταται φανερό ότι το QUIC βελτιώνει την απόδοση των εφαρμογών ιστού σε κινητά δίκτυα και μειώνει σημαντικά τον χρόνο φόρτωσης των ιστοσελίδων, διατηρώντας τη σταθερότητα της σύνδεσης (Hasselquist

et al., 2023). Ως εκ τούτου, θεωρείται κατάλληλο σε περιβάλλοντα με συχνά μεταβαλλόμενες συνθήκες δικτύου (Gupta & Bartos, 2022).

3.4.4 Απόδοση σε δίκτυα υψηλής καθυστέρησης

Η απόδοση των πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων επηρεάζεται σημαντικά σε δίκτυα με υψηλή καθυστέρηση μετάδοσης, όπως είναι τα δίκτυα με μεγάλη γεωγραφική απόσταση ή τα περιβάλλοντα με ασταθή ποιότητα σύνδεσης (Zhang et al., 2023; Hasselquist et al., 2023). Τα παραδοσιακά πρωτόκολλα, όπως το TCP, ενδέχεται να κατέχουν μειωμένη απόδοση σε τέτοιου είδους συνθήκες, κυρίως εξαιτίας της εξάρτησής τους από πολλαπλά round trips πριν το ξεκίνημα της μεταφοράς των δεδομένων (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022).

Το QUIC είναι σχεδιασμένο με σκοπό τον περιορισμό της επίδρασης της υψηλής καθυστέρησης μέσω μηχανισμών όπως το 0-RTT και το 1-RTT handshake, τα οποία συμβάλλουν στη μείωση του χρόνου εγκατάστασης της σύνδεσης (Iyengar & Thomson, 2021; Gupta & Bartos, 2022). Επιπλέον, η χρήση ανεξάρτητων streams παρέχει τη δυνατότητα μεταφοράς πολλαπλών αιτημάτων και απαντήσεων και έτσι η απώλεια ενός πακέτου δεν επηρεάζει ολόκληρη την επικοινωνία (Langley et al., 2017; Liu et al., 2024).

Παράλληλα, οι μηχανισμοί ελέγχου συμφόρησης και ανίχνευσης της απώλειας πακέτων του QUIC βοηθούν στην καλύτερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και στη μείωση των καθυστερήσεων, καθώς προσαρμόζονται άμεσα στις συνθήκες του δικτύου (Iyengar & Swett, 2021; Hasselquist et al., 2023). Σε σύγχρονες μελέτες αναδεικνύεται ότι το QUIC επιτυγχάνει καλύτερη απόδοση από τις παραδοσιακές συνδέσεις TCP σε δίκτυα που εμφανίζουν υψηλή καθυστέρηση, κυρίως ως προς τον χρόνο φόρτωσης ιστοσελίδων, καθώς και στη συνολικότερη εμπειρία των χρηστών (Zhang et al., 2023).

3.4.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί στην πράξη

Μέσω της αξιολόγησης του πρωτοκόλλου QUIC σε πραγματικές συνθήκες δικτύου, αναδεικνύεται ότι το νέο πρωτόκολλο παρέχει ουσιαστικά πλεονεκτήματα τόσο στη μείωση της καθυστέρησης όσο και στη βελτίωση της αποδοτικότητας της επικοινωνίας (Cook et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022). Πιο συγκεκριμένα, η ταχύτερη εγκατάσταση της σύνδεσης, η αποφυγή του Head-of-Line blocking και η ευέλικτη εξέλιξη του εν λόγω πρωτοκόλλου αποτελούν τα κυριότερα πλεονεκτήματά του, τα οποία δικαιολογούν και τη ραγδαία αυξανόμενη ενδιαφέρον υιοθέτησή του (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021).

Ωστόσο, στην πράξη το QUIC παρουσιάζει και ορισμένους περιορισμούς. Κύριο ζήτημα αποτελεί η συμβατότητα με τις υπάρχουσες υποδομές δικτύου, καθώς και το γεγονός ότι ορισμένες συσκευές ασφαλείας ενδεχομένως περιορίζουν ή φιλτράρουν την κίνηση UDP στην οποία βασίζεται το πρωτόκολλο (Trevisan et al., 2019; Zhang et al., 2024). Επιπλέον, φαίνεται ότι η εκτεταμένη χρήση κρυπτογράφησης έχει ως επακόλουθο τον περιορισμό της παρακολούθησης και της ανάλυσης της κίνησης του δικτύου από ενδιάμεσες συσκευές, προκαλώντας δυσκολίες στη διαχείριση των δικτύων (Saif et al., 2021; Trevisan et al., 2021).

Όπως αποδεικνύεται από τη σχετική βιβλιογραφία, τα πλεονεκτήματα του QUIC φαίνεται να υπερτερούν των περιορισμών του και κυρίως σε δίκτυα με υψηλή καθυστέρηση ή απώλεια πακέτων (Hasselquist et al., 2023). Για τον παραπάνω λόγο, αποτελεί μια σημαντική εξέλιξη στα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων, γεγονός που αποδεικνύεται από την ολοένα αυξανόμενη υιοθέτησή του από τις σύγχρονες υπηρεσίες διαδικτύου (Gupta & Bartos, 2022).

4. Υιοθέτηση του QUIC στο Σύγχρονο Διαδίκτυο

4.1 Έννοια της υιοθέτησης πρωτοκόλλων

Η υιοθέτηση καινοτόμων πρωτοκόλλων επικοινωνίας αποτελεί μια σύνθετη και πολυδιάστατη διαδικασία, η οποία συνδέεται άμεσα με την εξέλιξη του διαδικτύου και την ανάγκη για συνεχή βελτίωση της απόδοσης, της ασφάλειας και της αξιοπιστίας των διαδικτυακών υπηρεσιών. Η έννοια της υιοθέτησης (adoption) δεν περιορίζεται μόνο στην τεχνική εφαρμογή ενός πρωτοκόλλου, αλλά περιλαμβάνει τη σταδιακή

ενσωμάτωσή του σε ποικίλα επίπεδα του διαδικτυακού οικοσυστήματος, όπως είναι οι υποδομές δικτύου, οι διακομιστές, οι εφαρμογές, οι πάροχοι υπηρεσιών και οι τελικοί χρήστες (Trevisan et al., 2019). Επομένως, πρόκειται για μια διαδικασία με σταδιακή και χρονοβόρα εξέλιξη, καθώς οι νέες τεχνολογίες πρέπει να δοκιμαστούν, να αξιολογηθούν και να προσαρμοστούν σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (Mücke et al., 2025).

Όσον αφορά τα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων, φαίνεται ότι η υιοθέτησή τους αρχικά επηρεάζεται από το κατά πόσο ένα νέο πρωτόκολλο έχει τη δυνατότητα να καλύψει τις ανάγκες που τα υπάρχοντα πρωτόκολλα δεν μπορούν να εξυπηρετήσουν με επάρκεια (Langley et al., 2017). Το QUIC αναπτύχθηκε σε ένα περιβάλλον όπου το TCP, παρουσίαζε ορισμένους περιορισμούς αναφορικά με την ταχύτητα εξέλιξης, την εγκατάσταση ασφαλών συνδέσεων και την απόδοση σε δίκτυα με καθυστέρηση ή απώλειες πακέτων (Iyengar & Thomson, 2021). Κατά συνέπεια, η υιοθέτηση του QUIC συνδέεται τόσο με την εισαγωγή ενός νέου τεχνικού μηχανισμού όσο και με τη γενικότερη ανάγκη προσαρμογής των διαδικτυακών επικοινωνιών στις απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών (Gupta & Bartos, 2022).

Ωστόσο, η τεχνική υπεροχή δεν αποτελεί το μοναδικό κριτήριο για την ευρεία αποδοχή ενός πρωτοκόλλου. Η υιοθέτηση εξαρτάται επίσης από τη συμβατότητα με τις υπάρχουσες υποδομές, την ευκολία ενσωμάτωσης σε εφαρμογές, την υποστήριξη από browsers και διακομιστές, καθώς και από τη στάση των παρόχων υπηρεσιών και της τεχνολογικής κοινότητας (Trevisan et al., 2021). Για τον λόγο αυτό, τα νέα πρωτόκολλα δεν μπορούν να αντικαταστήσουν άμεσα τα παλαιότερα και συνήθως συνυπάρχουν με τα παλαιά για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση του QUIC, καθώς η μετάβαση από το TCP δεν θεωρείται άμεση ή καθολική, αλλά είναι μια διαδικασία σταδιακής ενσωμάτωσης σε συγκεκριμένα περιβάλλοντα χρήσης (Hasselquist et al., 2023).

Η υιοθέτηση ενός πρωτοκόλλου επίσης γίνεται κατανοητή μέσω της λογικής της διάχυσης της καινοτομίας. Οι νέες τεχνολογίες αρχικά συχνά υιοθετούνται από οργανισμούς με τους απαραίτητους τεχνικούς και οικονομικούς πόρους, οι οποίοι μπορούν να τις δοκιμάσουν σε μεγάλη κλίμακα (Jiang & Mannan, 2026). Στην περίπτωση του QUIC, η αρχική ανάπτυξη και η αξιοποίησή του από μεγάλες εταιρείες τεχνολογίας προώθησε σημαντικά τη σταδιακή διάδοσή του, καθώς έδωσε τη

δυνατότητα αξιολόγησης του πρωτοκόλλου σε πραγματικά περιβάλλοντα, και δημιούργησε τις προϋποθέσεις αποδοχής του και από άλλες υπηρεσίες και εφαρμογές (Mücke et al., 2025).

Επιπλέον, η υιοθέτηση του QUIC συνδέεται άμεσα με την ύπαρξη πραγματικών δεδομένων χρήσης, τα οποία συμβάλλουν στην αξιολόγηση της πορείας του στο σύγχρονο διαδίκτυο. Από τη σταδιακή αύξηση της χρήσης του σε ιστοσελίδες, εφαρμογές και διαδικτυακές υπηρεσίες καθίσταται φανερό ότι το πρωτόκολλο αποκτά βαθμιαία ουσιαστική θέση στο οικοσύστημα του διαδικτύου (W3Techs, 2026). Τα παραπάνω αποδεικνύουν ότι η υιοθέτηση ενός πρωτοκόλλου δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τα θεωρητικά του πλεονεκτήματα, αλλά κυρίως από τον βαθμό στον οποίο αυτό χρησιμοποιείται στην πράξη (Huston, 2025).

Η υιοθέτηση του QUIC αποτελεί μια σταδιακή και εξελισσόμενη διαδικασία, η οποία συνδέεται αφενός με τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου και αφετέρου με την ευρεία αποδοχή του από οργανισμούς, παρόχους υπηρεσιών, εφαρμογές και τελικούς χρήστες. Η κατανόηση της έννοιας της υιοθέτησης είναι ουσιαστικής σημασίας διότι βοηθά στην καλύτερη ερμηνεία της πορείας του QUIC στο σύγχρονο διαδίκτυο (Huston, 2025).

4.2 Υιοθέτηση από μεγάλες εταιρείες και CDNs

Η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου QUIC από μεγάλες εταιρείες τεχνολογίας και παρόχους υποδομών διαδικτύου κατέχει κεντρικό ρόλο στη διάδοσή του στο σύγχρονο διαδίκτυο. Αντίθετα με τα προηγούμενα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων, των οποίων η εξέλιξή τους ήταν άμεσα συνδεδεμένη με τυποποιημένες διαδικασίες και αργούς ρυθμούς υλοποίησης, το QUIC αναπτυγμένο αρχικά από τη Google δοκιμάστηκε σε πραγματικές συνθήκες μεγάλης κλίμακας, επιταχύνοντας σημαντικά τη διαδικασία υιοθέτησής του (Langley et al., 2017).

Η Google ήταν ο πρώτος οργανισμός που υιοθέτησε το QUIC σε ευρεία κλίμακα, ενσωματώνοντάς το σε υπηρεσίες όπως το YouTube και ο Chrome browser. Μέσω της χρήσης του QUIC η εταιρεία μείωσε τον χρόνο φόρτωσης των ιστοσελίδων της και βελτίωσε τη συνολικότερη εμπειρία των χρηστών τους, κυρίως σε απαιτητικά περιβάλλοντα τα οποία εμφάνιζαν υψηλή καθυστέρηση και ασταθείς συνδέσεις

(Langley et al., 2017). Συνεπώς, η ευρεία χρήση του πρωτοκόλλου από τη Google ενίσχυσε την αποδοχή του και την αποτελεσματικότητά του σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, ενώ επιτεύχθηκε η αξιολόγησή του σε περιβάλλοντα εκατομμυρίων χρηστών, καθώς και η άμεση αναγνώριση των πλεονεκτημάτων και των περιορισμών του (Gupta & Bartos, 2022).

Επιπλέον, σημαντικό ρόλο στην υιοθέτηση του QUIC έχουν διαδραματίσει ποικίλες μεγάλες εταιρείες τεχνολογίας που αξιοποιούν το πρωτόκολλο για τη βελτίωση της απόδοσης των υπηρεσιών τους, όπως η Meta. Σύμφωνα με πρόσφατα δεδομένα, σημαντικό ποσοστό της κίνησης του διαδικτύου μεγάλων πλατφορμών εδράζεται στο QUIC. Ειδικότερα, υποστηρίζεται ότι η χρήση του QUIC επιτυγχάνει επίπεδα υψηλής λειτουργικότητας και αποδοτικότητας σε πραγματικά περιβάλλοντα, καθώς δύναται να επιτυγχάνει μεγάλο ποσοστό κάλυψης της συνολικής κίνησης σε πλατφόρμες μεγάλης κλίμακας (Walding, 2025).

Η συμβολή των Content Delivery Networks (CDNs), όπως η Cloudflare και η Akamai, διαχειρίζονται σημαντικό μέρος της παγκόσμιας διαδικτυακής κίνησης, αφού παίζουν καθοριστικό ρόλο στην υιοθέτηση νέων τεχνολογιών. Η ενσωμάτωση του QUIC στις υποδομές των CDNs βελτιώνει την απόδοση των ιστοσελίδων, διευκολύνει τη μεταφορά δεδομένων μεταξύ χρηστών και διακομιστών και μειώνει την καθυστέρηση (Madariaga et al., 2020). Επιπλέον, η χρήση του HTTP/3, το οποίο είναι βασισμένο στο QUIC, παρέχει αποδοτικότερη επικοινωνία (Hasselquist et al., 2023).

Η υιοθέτηση του QUIC από CDNs επιδρά στη διάδοση του πρωτοκόλλου, καθώς επιτυγχάνει την άμεση ενεργοποίησή του από πολυάριθμες ιστοσελίδες δίχως την απαίτηση αλλαγών από τους τελικούς χρήστες. Συνεπώς, το πρωτόκολλο μπορεί να υιοθετηθεί και από μικρότερες ιστοσελίδες και έτσι ενισχύεται η συνολική υιοθέτησή του στο διαδίκτυο. Δημιουργείται έτσι ένα φαινόμενο “αλυσιδωτής διάδοσης”, κατά το οποίο η υιοθέτηση από μεγάλους παρόχους συνεπάγεται και τη σταδιακή υιοθέτηση από το σύνολο του οικοσυστήματος (Madariaga et al., 2020).

Παράλληλα, η υιοθέτηση του QUIC από μεγάλες εταιρείες συνδέεται άμεσα με την ανάγκη για βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών, κυρίως σε εφαρμογές που χρήζουν γρήγορης και αξιόπιστης μεταφοράς δεδομένων. Οι σύγχρονες διαδικτυακές υπηρεσίες, όπως τα κοινωνικά δίκτυα, οι πλατφόρμες streaming και οι εφαρμογές

cloud, εδράζονται σημαντικά στην απόδοση του δικτύου (Iyengar & Thomson, 2021). Το QUIC, που μειώνει το latency και το Head-of-Line blocking, παρέχει ορισμένα καίρια πλεονεκτήματα σε αυτούς τους τομείς και αυτό το καθιστά κατάλληλο για μεγάλους οργανισμούς (Hasselquist et al., 2023).

Ωστόσο, ορισμένοι οργανισμοί εξακολουθούν να βασίζονται σε παραδοσιακά πρωτόκολλα όπως το TCP, είτε για λόγους συμβατότητας με υπάρχουσες υποδομές είτε εξαιτίας περιορισμών αναφορικά με τη χρήση του UDP (Hasselquist et al., 2023). Επιπλέον, η διαχείριση της κρυπτογραφημένης κίνησης και η έλλειψη ορατότητας στο δίκτυο αποτελούν προκλήσεις για ορισμένους παρόχους (Trevisan et al., 2021).

Όπως καθίσταται φανερό, η υιοθέτηση του QUIC από μεγάλες εταιρείες και παρόχους CDNs αποτελεί τον κύριο παράγοντα διάδοσής του στο σύγχρονο διαδίκτυο. Η χρήση του από υπηρεσίες μεγάλης κλίμακας, η ενσωμάτωσή του σε υποδομές διανομής περιεχομένου και η ραγδαία αύξηση της διαδικτυακής κίνησης που εδράζεται σε αυτό αναδεικνύουν την καθιέρωσή του ως ένα από τα σημαντικότερα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων (Walding, 2025). Ωστόσο, παρά τις προκλήσεις, η τάση υιοθέτησής του συνεχίζεται και επηρεάζει καθοριστικά τη μελλοντική εξέλιξη του διαδικτύου (Madariaga et al., 2020).

4.3 Υιοθέτηση από web browsers και υπηρεσίες

4.3.1 Υιοθέτηση από web browsers

Η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου QUIC από τους σύγχρονους web browsers είναι καθοριστικός παράγοντας διάδοσής του στο διαδίκτυο, αφού λειτουργούν ως κύρια διεπαφή ανάμεσα στους χρήστες και τις διαδικτυακές υπηρεσίες. Η αρχική ανάπτυξη του QUIC από τη Google, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, συνδέεται άμεσα με την ενσωμάτωσή του στον browser Chrome, επιτρέποντας την άμεση αξιολόγησή του σε πραγματικές συνθήκες μεγάλης κλίμακας, ενώ συνέβαλλε στην επιτάχυνση της διαδικασίας υιοθέτησής του (Langley et al., 2017).

Η σταδιακή τυποποίηση του QUIC από την IETF μέσω του προτύπου RFC 9000 συνέβαλε καθοριστικά στην υιοθέτησή του από άλλους browsers, όπως ο Firefox και ο Microsoft Edge, οι οποίοι ενσωμάτωσαν υποστήριξη για HTTP/3. Αυτή η υποστήριξη μετέτρεψε το QUIC από μια πειραματική τεχνολογία σε ένα επίσημα

αναγνωρισμένο πρωτόκολλο και ενίσχυσε την εμπιστοσύνη της τεχνολογικής κοινότητας απέναντί του (Iyengar & Thomson, 2021).

Οι web browsers υιοθετούν το QUIC κυρίως γιατί παρέχει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των παραδοσιακών πρωτοκόλλων μεταφοράς δεδομένων. Μολονότι το QUIC λειτουργεί μέσω ενός συνδυασμού πολλαπλών πρωτοκόλλων, όπως το TCP, το TLS και το HTTP/2, σε ένα ενιαίο επίπεδο πάνω από το UDP, παρέχει αυξημένη ευελιξία και ταχύτερη εξέλιξη (De Coninck & Bonaventure, 2017). Επιπλέον, η ενσωματωμένη υποστήριξη για πολλαπλές ανεξάρτητες ροές δεδομένων μειώνει το φαινόμενο Head-of-Line blocking και βελτιώνει την απόδοση των εφαρμογών ιστού (Amet et al., 2024).

Παράλληλα, η βελτιωμένη διαδικασία εγκατάστασης σύνδεσης είναι ένας σημαντικός λόγος υιοθέτησης του QUIC από τους web browsers, οι οποίοι εξυπηρετούν εφαρμογές που απαιτούν άμεση απόκριση και υψηλή απόδοση, (Iyengar & Thomson, 2021).

Επιπλέον, το QUIC μέσω της δυνατότητας διαχείρισης αλλαγών στη διεύθυνση IP και του μηχανισμού connection migration θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλο για χρήση σε κινητές συσκευές, όπου οι χρήστες μετακινούνται συχνά μεταξύ διαφορετικών δικτύων (Amet et al., 2024).

Συνολικά, η ενσωμάτωση του QUIC στους web browsers προωθεί την άμεση αξιοποίησή του από εκατομμύρια χρήστες και συμβάλλει στην καθιέρωση του HTTP/3 ως το νέο πρότυπο επικοινωνίας στο διαδίκτυο (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021).

4.3.2 Υιοθέτηση σε ιστοσελίδες και υπηρεσίες

Η υιοθέτηση του QUIC επεκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα διαδικτυακών υπηρεσιών και ιστοσελίδων, οι οποίες αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου με σκοπό να βελτιώσουν την απόδοση και την εμπειρία των χρηστών τους. Η μετάβαση στο HTTP/3, το οποίο βασίζεται στο QUIC, είναι βασική παράμετρος της υιοθέτησής του σε αυτό το επίπεδο, αφού παρέχει σημαντικότερες βελτιώσεις σε σύγκριση με τα προηγούμενα πρωτόκολλα HTTP (Iyengar & Thomson, 2021).

Στις μέρες μας το QUIC χρησιμοποιείται ήδη από ένα σημαντικό ποσοστό ιστοσελίδων σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ η τάση υιοθέτησής του αυξάνεται σταθερά τα τελευταία χρόνια, αναδεικνύοντας τη δυναμική εξάπλωση του QUIC στο σύγχρονο διαδίκτυο (W3Techs, 2026).

Η χρήση του QUIC σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως πλατφόρμες κοινωνικής δικτύωσης και υπηρεσίες streaming ενισχύει την υιοθέτησή του από τις διαδικτυακές υπηρεσίες. Ειδικότερα, πρόσφατα δεδομένα τονίζουν τη σημασία του πρωτοκόλλου στην πράξη, καθώς καταδεικνύουν ότι ένα σημαντικό ποσοστό της διαδικτυακής κίνησης των μεγάλων πλατφορμών εδράζεται ήδη σε αυτό το πρωτόκολλο (Walding, 2025).

Παράλληλα, η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου επεκτείνεται και στις κινητές εφαρμογές, οι οποίες βασίζονται στη σταθερή και αποδοτική σύνδεση. Όπως υποστηρίζεται σε σχετικές μελέτες, ένα αυξανόμενο ποσοστό εφαρμογών χρησιμοποιεί πλέον HTTP/3, καταδεικνύοντας τη μετάβαση χρήσης του QUIC στα σύγχρονα περιβάλλοντα (Jiang & Mannan, 2026).

Επιπλέον, το QUIC μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, καθώς τα αποτελέσματα μελετών δείχνουν ότι το πρωτόκολλο δύναται να προσφέρει συγκρίσιμη ή ακόμη και βελτιωμένη απόδοση σε σύγκριση με τα παραδοσιακά πρωτόκολλα, παρά την περεταίρω επιβάρυνση λόγω της κρυπτογράφησης (Amet et al., 2024).

Τέλος, η ευρεία υιοθέτηση του QUIC επιταχύνεται, καθώς ενισχύεται από τη δυνατότητα ενσωμάτωσής του σε υποδομές όπως τα CDNs, τα οποία επιτρέπουν τη μαζική του διάδοση χωρίς σημαντικές αλλαγές από τους τελικούς χρήστες (Madariaga et al., 2020).

Η υιοθέτηση του QUIC σε ιστοσελίδες και διαδικτυακές υπηρεσίες αποτελεί μια εξελισσόμενη διαδικασία, η οποία ενισχύεται από τα πλεονεκτήματα του πρωτοκόλλου και την αυξανόμενη ανάγκη για βελτιωμένη απόδοση στο σύγχρονο διαδίκτυο, ενώ τα επόμενα χρόνια αναμένεται να αποτελέσει κεντρικό παράγοντα εξέλιξης των διαδικτυακών τεχνολογιών (W3Techs, 2026; Walding, 2025).

4.4. Στατιστικά και τάσεις χρήσης του QUIC

Η ανάλυση των στατιστικών δεδομένων και των τάσεων χρήσης του πρωτοκόλλου QUIC αποτελεί κύρια παραμέτρο για την κατανόηση της πραγματικής υιοθέτησής του στο σύγχρονο διαδίκτυο. Τα εμπειρικά δεδομένα συμβάλλουν στην αξιολόγηση της υιοθέτησης του πρωτοκόλλου σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, ενώ δείχνουν τον βαθμό ενσωμάτωσής του στις σύγχρονες υποδομές δικτύου. Η σταθερή αύξηση της χρήσης του QUIC τα τελευταία χρόνια συνδέεται άμεσα με την ολοένα και αυξανόμενη ανάγκη για χαμηλή καθυστέρηση, υψηλή απόδοση και βελτίωση της εμπειρίας χρήστη στις εφαρμογές του διαδικτύου (Huston, 2025; Walding, 2025).

Οι πρώτες εμπειρικές μελέτες χρήσης του QUIC στο διαδίκτυο έδειξαν ότι το πρωτόκολλο ήταν αρχικά σε ένα πρώιμο στάδιο υιοθέτησης, καθώς χρησιμοποιούνταν από έναν περιορισμένο αριθμό υπηρεσιών και οργανισμών. Συγκεκριμένα, στη μελέτη των Trevisan et al. (2021) το QUIC αντιπροσώπευε περίπου το 2,6% έως 9,1% της συνολικής κίνησης του διαδικτύου, ανάλογα με το δίκτυο στο οποίο πραγματοποιούνταν οι μετρήσεις. Επιπλέον, η παραπάνω μελέτη έδειξε ότι το QUIC υιοθετούνταν κυρίως από συγκεκριμένους παρόχους, όπως η Google, η οποία είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής κίνησης.

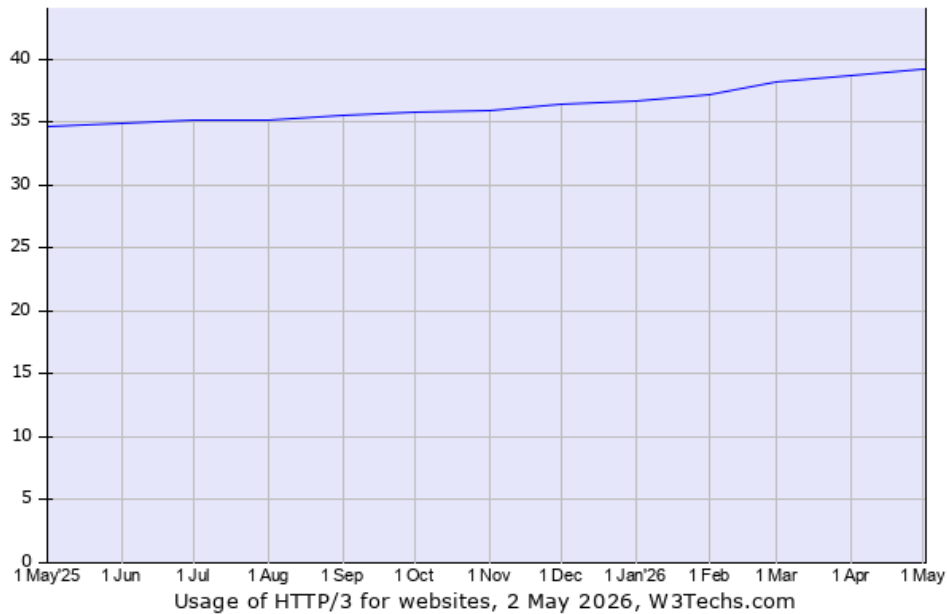
Επιπλέον, παρατηρήθηκε η ταχεία επέκταση της υποδομής του QUIC, αφού υπήρξε σημαντική αύξηση του αριθμού των IP διευθύνσεων οι οποίες υποστήριζαν το πρωτόκολλο (Trevisan et al., 2021). Ωστόσο, παρά την αύξηση αυτή, το ποσοστό των domain names που χρησιμοποιούσαν το πρωτόκολλο παρέμενε ιδιαίτερα χαμηλό, από 0,06% έως 0,1%, καταδεικνύοντας το γεγονός ότι η υιοθέτηση σε επίπεδο εφαρμογών και ιστοσελίδων ήταν σαφώς μικρότερη συγκριτικά με την ανάπτυξη της υποδομής (Trevisan et al., 2021).

Με το πέρασμα των χρόνων, φαίνεται ότι η χρήση του QUIC αυξήθηκε σημαντικά, κυρίως σε περιβάλλοντα κινητής και ασύρματης επικοινωνίας. Σύμφωνα με μελέτη των Madariaga et al. (2020), το QUIC αντιπροσώπευε περίπου το 23,05% της συνολικής διαδικτυακής κίνησης σε συγκεκριμένα δίκτυα ανάλογα με το περιβάλλον πρόσβασης. Ειδικότερα, φτάνει το 26,16% σε δίκτυα WiFi και το 10,56% σε δίκτυα κινητής τηλεφωνίας, φανερώνοντας την τάση υιοθέτησης του πρωτοκόλλου σε περιβάλλοντα όπου οι συνθήκες δικτύου είναι περισσότερο ασταθείς λόγω των τεχνικών του

χαρακτηριστικών, όπως είναι η βελτιωμένη διαχείριση των απωλεσθέντων πακέτων και η υποστήριξη connection migration (Madariaga et al., 2020).

Η αυξημένη χρήση του QUIC σε κινητά δίκτυα επιβεβαιώνεται και από πρόσφατη μελέτη των Jiang & Mannan (2026). Ειδικότερα, υποστηρίζεται ότι ένα σημαντικό ποσοστό σύγχρονων εφαρμογών και υπηρεσιών αξιοποιεί το HTTP/3 σε περιβάλλοντα κινητής χρήσης. Επίσης, η ανάλυση της χρήσης του πρωτοκόλλου σε επίπεδο DNS μέσω του DNS over QUIC (DoQ) έδειξε ότι ο αριθμός των διαθέσιμων resolvers αυξήθηκε σημαντικά, φτάνοντας έως και τους 1.217 σε διάστημα μίας εβδομάδας, ενώ καταγράφηκαν σε σύνολο 1.851 μοναδικά πιστοποιητικά σε μια περίοδο 29 εβδομάδων. Από τα παραπάνω δεδομένα καταδεικνύεται η δυναμική ανάπτυξη του οικοσυστήματος του QUIC, αλλά και ορισμένα ζητήματα σταθερότητας, αφού σύμφωνα με τη μελέτη μόνο το 51,6% των resolvers έμειναν ενεργοί σε βάθος χρόνου.

Σε πρόσφατα δεδομένα καθίσταται φανερή η εξέλιξη της χρήσης του QUIC, δηλαδή η μετάβασή του από μια εξειδικευμένη τεχνολογία σε ένα κύριο στοιχείο της υποδομής του διαδικτύου. Σύμφωνα με αναλύσεις που έχουν τη βάση τους σε πραγματική διαδικτυακή κίνηση, το QUIC αντιπροσωπεύει πλέον σημαντικό ποσοστό της συνολικής κίνησης. Πιο ειδικά, οι εκτιμήσεις φτάνουν έως και το 20,5% των συνολικών αιτημάτων στο διαδίκτυο, ενώ το HTTP/3 αξιοποιείται από το περίπου 35,8% των ιστοσελίδων (Olzak, 2025).



Σχήμα 3 : Εξέλιξη της χρήσης του HTTP/3 σε ιστοσελίδες σε παγκόσμιο επίπεδο. Πηγή: W3Techs, Usage statistics (2026).

Από τα παραπάνω στοιχεία και το σχήμα 4.1. προκύπτει ότι η υιοθέτηση του QUIC φαίνεται να πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο μέσω ανώτερων πρωτοκόλλων, όπως το HTTP/3 το οποίο λειτουργεί ως καίριος μηχανισμός διάδοσής του.

Επιπλέον, από δεδομένα της πλατφόρμας W3Techs φαίνεται ότι το QUIC χρησιμοποιείται άμεσα από περίπου το 8–9% των ιστοσελίδων παγκοσμίως, παρουσιάζοντας σταθερή αύξηση τα τελευταία χρόνια. Συγχρόνως το HTTP/3, το οποίο βασίζεται στο QUIC, παρουσιάζει σημαντικά υψηλότερο ποσοστό υιοθέτησης, δηλαδή περίπου 35–38% των ιστοσελίδων. Επομένως, η πραγματική υιοθέτηση του QUIC είναι μεγαλύτερη από αυτή που αποτυπώνεται άμεσα, καθώς χρησιμοποιείται ευρέως ως υποκείμενη τεχνολογία μέσω ανώτερων πρωτοκόλλων και υποδομών όπως τα CDNs (W3Techs, 2026; Walding, 2025).

Παράλληλα, πρόσφατα δεδομένα σχετικά με την εξέλιξη της διαδικτυακής κίνησης επιβεβαιώνουν αυτή την τάση, καθώς δείχνουν την αυξημένη χρήση του HTTP/3 κατά την περίοδο 2022–2023, από περίπου 37% σε 45%, πριν τη σταθεροποίησή της σε υψηλά επίπεδα. Συνεπώς, η σταδιακή ενσωμάτωση του QUIC στο σύγχρονο διαδίκτυο επιβεβαιώνει ότι το πρωτόκολλο αποτελεί πλέον ένα κύριο στοιχείο της υποδομής του διαδικτύου (Walding, 2025).

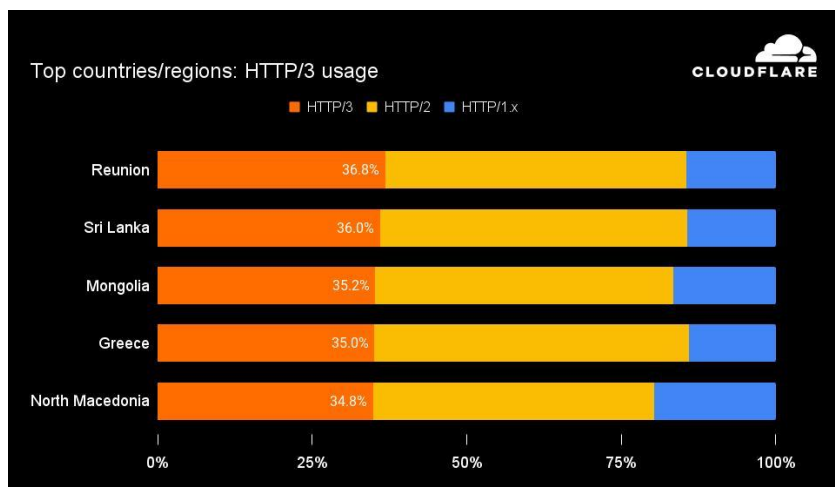
Η ανάλυση της εξέλιξης της χρήσης του QUIC σε βάθος χρόνου καθιστά φανερά την τάση της συνεχούς αύξησής του, αφενός λόγω της διάδοσής του από μεγάλους οργανισμούς και αφετέρου λόγω της ενσωμάτωσής του σε σύγχρονες εφαρμογές. Σύμφωνα με τους Perarnaud και Musiani (2025) τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί σημαντικά το ποσοστό της διαδικτυακής κίνησης που βασίζεται στο QUIC, αποτελώντας έως και κατά το 50% της συνολικής κίνησης στο διαδίκτυο και αναδεικνύοντας την σημαντική επίδραση του πρωτοκόλλου στον τρόπο πραγματοποίησης της διαδικτυακής επικοινωνίας.

Ωστόσο, παρά την υψηλή αύξηση της χρήσης του QUIC στο επίπεδο της διαδικτυακής κίνησης, η υιοθέτησή του δεν είναι ομοιόμορφη, καθώς παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ανάλογα με το περιβάλλον και τον τρόπο υλοποίησης. Από τα αποτελέσματα πειραματικών αξιολογήσεων αναδεικνύεται ότι η απόδοση του πρωτοκόλλου εξαρτάται τόσο από τον σχεδιασμό του όσο και από την εκάστοτε υλοποίησή του. Συγκεκριμένα σύμφωνα με τους Yu & Benson (2021), η απόδοση του QUIC ενδέχεται να διαφέρει ουσιαστικά μεταξύ διαφορετικών implementations, αφού οι παράγοντες όπως ο αλγόριθμος ελέγχου συμφόρησης, η παραμετροποίηση και τα πιθανά σφάλματα επιδρούν σε μεγάλο βαθμό στα αποτελέσματα.

Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν και από μελέτες σε περιβάλλοντα πραγματικού χρόνου. Όπως αναφέρουν οι Amet et al. (2024), το QUIC σε ορισμένες περιπτώσεις παρουσιάζει απόδοση ανάλογη με αυτή του UDP και του DTLS, ενώ η ενσωμάτωση μηχανισμών κρυπτογράφησης και αξιοπιστίας ενδέχεται να αυξήσει την καθυστέρηση, κυρίως σε εφαρμογές που απαιτούν αυστηρό χρονισμό. Συνεπώς, παρόλο που το QUIC αποτελεί μια ισχυρή λύση για πλήθος εφαρμογών, δεν είναι εξίσου κατάλληλο για όλα τα σενάρια χρήσης.

Επιπλέον, σύμφωνα με τους De Coninck και Bonaventure (2017), το QUIC εμφανίζει καλύτερη απόδοση σε δίκτυα με υψηλά ποσοστά απωλειών, καθώς οι μηχανισμοί επαναμετάδοσης και πολυπλεξίας που αξιοποιεί ενισχύουν τη διατήρηση της ροής των δεδομένων δίχως σημαντικές διακοπές. Αξιοσημείωτο είναι επίσης ότι η δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών διαδρομών (multipath) παρέχει τη δυνατότητα ταυτόχρονης χρήσης διαφορετικών συνδέσεων δικτύου, βελτιώνοντας καθοριστικά την απόδοση και την αξιοπιστία της επικοινωνίας.

Η αξιολόγηση της χρήσης του QUIC σε πραγματικά δίκτυα καταδεικνύει ορισμένες σημαντικές διαφορές ανάλογα με το είδος της υποδομής και τη γεωγραφική περιοχή. Σε μελέτες στις οποίες εξετάζεται η χρήση του πρωτοκόλλου σε επίπεδο DNS μέσω του DNS over QUIC φάνηκε ότι η κατανομή των υπηρεσιών δεν είναι ομοιόμορφη, με την Ασία να συγκεντρώνει περίπου το 45,19% των συγκεκριμένων υπηρεσιών, την Ευρώπη το 32,37% και τη Βόρεια Αμερική το 17,83% (Jiang & Mannan, 2026). Συνεπώς, όπως καθίσταται φανερό η υιοθέτηση του QUIC επηρεάζεται τόσο από τεχνικούς όσο και από γεωγραφικούς και οικονομικούς παράγοντες.



Σχήμα 4: Χρήση του HTTP/3 ανά χώρα/περιοχή σε σύγκριση με προηγούμενες εκδόσεις HTTP.

Πηγή: Cloudflare Radar (2024).

Σημαντική είναι επίσης η επίδραση των υποδομών και των μηχανισμών διαχείρισης της κυκλοφορίας στη λειτουργία του QUIC. Σύμφωνα με τους Mücke et al. (2025), η χρήση μηχανισμών όπως τα connection IDs βελτιώνει τη διαχείριση της κυκλοφορίας και διευκολύνει λειτουργίες όπως το load balancing, αποκαλύπτοντας ωστόσο πληροφορίες αναφορικά με την υποδομή των δικτύων. Επομένως, το συγκεκριμένο πρωτόκολλο δεν αποτελεί απλά ένα τεχνικό εργαλείο βελτίωσης της απόδοσης, αλλά επηρεάζει και τον τρόπο οργάνωσης και διαχείρισης της διαδικτυακής υποδομής.

Παράλληλα, η ευρεία χρήση της κρυπτογράφησης στο QUIC οδηγεί σε νέες προκλήσεις παρακολούθησης και διαχείρισης της διαδικτυακής κίνησης. Σύμφωνα με τους Jiang & Mannan (2026), τα παραδοσιακά εργαλεία ανάλυσης της κίνησης δεν

μπορούν να προχωρήσουν σε αποτελεσματική επεξεργασία της κρυπτογραφημένης επικοινωνίας του QUIC, περιορίζοντας την ορατότητα των διαχειριστών δικτύου. Επιπλέον, υποστηρίζεται από τους ίδιους ότι η χρήση του QUIC μπορεί να αξιοποιηθεί από ορισμένες εφαρμογές ως ένα μέσο παράκαμψης μηχανισμών ελέγχου και παρακολούθησης, ενώ θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων προκλήσεων για την ασφάλεια και τη διαχείριση των δικτύων (Jiang & Mannan, 2026).

Όπως καθίσταται φανερό, παρά τη σημαντική αύξηση της χρήσης του QUIC, η υιοθέτησή του συνοδεύεται από μια σειρά προκλήσεων και περιορισμών. Το πρωτόκολλο δεν αποτελεί μια καθολική λύση που υπερτερεί σε όλα τα σενάρια, αλλά λειτουργεί ως ένα εργαλείο με συγκεκριμένα πλεονεκτήματα σε συγκεκριμένες συνθήκες. Η αποτελεσματικότητά του εξαρτάται από παράγοντες όπως το περιβάλλον δικτύου, η υλοποίηση των μηχανισμών του και η φύση των εφαρμογών που το χρησιμοποιούν.

Συμπερασματικά, τα στατιστικά στοιχεία και οι τάσεις χρήσης του QUIC φανερώνουν ότι το πρωτόκολλο εξελίσσεται δυναμικά, ωστόσο η υιοθέτησή του δεν είναι ομοιόμορφη και η απόδοσή του εξαρτάται από ένα σύνολο τεχνικών και οργανωτικών παραγόντων οι οποίοι εξετάζονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα. Η κατανόηση αυτών των τάσεων είναι καίρια για την αξιολόγηση του ρόλου του QUIC στο σύγχρονο διαδίκτυο, καθώς και για την πρόβλεψη της μελλοντικής του εξέλιξης.

4.5 Παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση του QUIC

Όπως καθίσταται φανερό από τα παραπάνω, η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου QUIC στο σύγχρονο διαδίκτυο αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, καθώς επηρεάζεται από ένα σύνολο τεχνικών, οργανωτικών, οικονομικών και θεσμικών παραγόντων. Η κατανόηση των παραπάνω παραγόντων θα συμβάλλει σημαντικά στην πρόβλεψη της μελλοντικής εξέλιξης του πρωτοκόλλου.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση του QUIC είναι τα τεχνικά πλεονεκτήματα που παρέχει. Ειδικότερα, συμπεριλαμβάνει λειτουργίες όπως η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων, η ασφάλεια μέσω TLS 1.3 και η πολυπλεξία ροών, οι οποίες στα παραδοσιακά πρωτόκολλα υλοποιούνται σε διαφορετικά επίπεδα και ενισχύουν την αποδοτικότητα και την ευελιξία (Iyengar &

Thomson, 2021; Langley et al., 2017). Επιπλέον, το γεγονός ότι η διαδικασία εγκατάστασης της σύνδεσης είναι σημαντικά ταχύτερη, παρέχει τη δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων ήδη από το αρχικό στάδιο επικοινωνίας (1-RTT ή ακόμη και 0-RTT), με αποτέλεσμα τη μείωση της καθυστέρησης και συνεπώς τη βελτίωση της εμπειρίας των χρηστών σε περιβάλλοντα εφαρμογών ιστού και κινητών συσκευών (Olzak, 2025).

Επιπλέον, σύμφωνα με τους Yu & Benson (2021) μολονότι το QUIC παρέχει σημαντικά τεχνικά πλεονεκτήματα, όπως η υποστήριξη πολλαπλών ανεξάρτητων ροών δεδομένων και η αποφυγή του Head-of-Line blocking, αυτά τα οφέλη δεν βελτιώνουν πάντα σημαντικά την απόδοση σε πραγματικές συνθήκες. Ο τρόπος υλοποίησης και του πρωτοκόλλου και οι συνθήκες του δικτύου επιδρούν καθοριστικά στην αποτελεσματικότητα του πρωτοκόλλου, επηρεάζοντας τη συνολική του υιοθέτηση.

Επίσης, σημαντικό παράγοντα αποτελεί η απόδοση του πρωτοκόλλου σε διαφορετικά περιβάλλοντα δικτύου. Συγκεκριμένα, το QUIC παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα σε περιβάλλοντα με υψηλή καθυστέρηση και απώλειες πακέτων, όπως είναι τα ασύρματα και κινητά δίκτυα, στα οποία η δυνατότητα διαχείρισης της σύνδεσης και η υποστήριξη connection migration βελτιώνουν σημαντικά την ποιότητα της υπηρεσίας (Madariaga et al., 2020; De Coninck & Bonaventure, 2017). Ωστόσο, σε περιβάλλοντα πραγματικού χρόνου, όπου απαιτείται σταθερή και προβλέψιμη καθυστέρηση, το QUIC ενδέχεται να παρουσιάσει περιορισμούς λόγω της επιπλέον επεξεργασίας που εισάγει η κρυπτογράφηση και οι μηχανισμοί αξιοπιστίας. Έτσι, καθίσταται φανερό ότι η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου εξαρτάται από τη φύση των εφαρμογών που εξυπηρετεί (Amet et al., 2024).

Αξιοσημείωτο είναι ότι η υιοθέτηση του QUIC επηρεάζεται σημαντικά από τη συμβατότητα με τις υπάρχουσες δικτυακές υποδομές. Παρά το γεγονός ότι το πρωτόκολλο βασίζεται στο UDP το οποίο υποστηρίζεται ευρέως, σε ορισμένα δίκτυα η κίνηση UDP περιορίζεται ή φιλτράρεται, επιδρώντας αρνητικά στη λειτουργία του QUIC (Hasselquist et al., 2023). Παράλληλα, αναφορικά κυρίως με τα παλαιότερα ή λιγότερο ευέλικτα συστήματα, απαιτούνται σημαντικές αλλαγές υποδομών και λογισμικού προκειμένου να επιτευχθεί η μετάβαση από το TCP σε ένα νέο πρωτόκολλο και έτσι επιβραδύνεται η διαδικασία υιοθέτησης (Trevisan et al., 2021).

Οι μεγάλοι οργανισμοί και οι πάροχοι υπηρεσιών διαδικτύου κατέχουν καθοριστικό ρόλο στη διάδοση του QUIC. Συγκεκριμένα, η αρχική ανάπτυξη και υιοθέτηση του πρωτοκόλλου από τη Google, καθώς και η ευρεία χρήση του από πλατφόρμες όπως η Meta, συνέβαλαν σημαντικά στην αύξηση της αποδοχής του (Langley et al., 2017; Walding, 2025). Σε ορισμένες εμπειρικές μελέτες καθίσταται φανερό ότι μεγάλο μέρος της διαδικτυακής κίνησης μέσω QUIC προέρχεται από περιορισμένο αριθμό μεγάλων παρόχων, καταδεικνύοντας τη σημαντικότητα της στρατηγικής των μεγάλων εταιρειών στην υιοθέτηση του πρωτοκόλλου (Trevisan et al., 2021; Perarnaud & Musiani, 2025).

Επίσης, η συμβολή των Content Delivery Networks (CDNs) είναι ένας ουσιαστικός παράγοντας επιτάχυνσης υιοθέτησης του QUIC. Οι πάροχοι αυτοί βοηθούν στην ενεργοποίηση του πρωτοκόλλου από μεγάλο αριθμό ιστοσελίδων χωρίς την απαίτηση σημαντικών αλλαγών από τους τελικούς χρήστες ή τους διαχειριστές, επιταχύνοντας την επέκτασή του και δημιουργώντας ένα φαινόμενο αλυσιδωτής διάδοσης (Madariaga et al., 2020).

Παράλληλα, η εκτεταμένη χρήση της κρυπτογράφησης στο QUIC επιδρά στη διαδικασία υιοθέτησης. Από τη μία πλευρά, η ενσωμάτωση του TLS 1.3 αυξάνει τα επίπεδα ασφάλειας της επικοινωνίας και προστατεύει τα δεδομένα των χρηστών (Iyengar & Thomson, 2021). Από την άλλη πλευρά, η πλήρης κρυπτογράφηση της επικοινωνίας δεν επιτρέπει την ορατότητα της δικτυακής κίνησης και καθιστά δυσκολότερη την ανάλυση και τη διαχείρισή της από τους διαχειριστές δικτύου (Jiang & Mannan, 2026). Επιπλέον, όπως υποστηρίζεται από τους Jiang et al. (2026) το QUIC χρησιμοποιείται επίσης ως ένα μέσο παράκαμψης των μηχανισμών ελέγχου και παρακολούθησης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ορισμένων νέων προκλήσεων σχετικά με την ασφάλεια και τη διακυβέρνηση του διαδικτύου.

Οι παραπάνω εξελίξεις συνδέονται άμεσα με ευρύτερους θεσμικούς και πολιτικούς παράγοντες. Σύμφωνα με τους Perarnaud και Musiani (2025), η υιοθέτηση του QUIC επιδρά τόσο στη δομή όσο και στη λειτουργία του διαδικτύου και μεταβάλλει την ισορροπία ισχύος ανάμεσα στους διαφορετικούς εμπλεκόμενους φορείς. Ακόμη, η αυξημένη χρήση κρυπτογράφησης και η μεταφορά της λογικής ελέγχου στα άκρα του δικτύου ενισχύουν σημαντικά τον ρόλο των μεγάλων εταιρειών τεχνολογίας, ενώ περιορίζουν τη δυνατότητα παρέμβασης των παρόχων δικτύου και των κρατικών φορέων (Perarnaud & Musiani, 2025). Επομένως, η υιοθέτηση του QUIC δεν αποτελεί

μόνο ένα ζήτημα τεχνικής φύσης, αλλά και ένα θέμα ευρύτερης σημασίας για τη διακυβέρνηση του διαδικτύου.

Τέλος, ενισχυτικοί παράγοντες για τη διάδοσή του QUIC αποτελούν τόσο η διαθεσιμότητα πραγματικών δεδομένων χρήσης όσο και η συνεχής αύξηση της υιοθέτησής του. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, αναδεικνύεται η αύξηση της εμπιστοσύνης απέναντί του από την τεχνολογική κοινότητα και ενθαρρύνεται η περαιτέρω ενσωμάτωσή του στις σύγχρονες εφαρμογές, με αποτέλεσμα η χρήση του πρωτοκόλλου να αυξάνεται σταθερά τα τελευταία χρόνια (W3Techs, 2026). Παράλληλα, η δυνατότητα εξέλιξης του QUIC σε επίπεδο εφαρμογής προωθεί την ταχύτερη προσαρμογή του σύμφωνα με τις ανάγκες των χρηστών και των οργανισμών, καθώς και τη διαρκή βελτίωσή του (Huston, 2025).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω, η υιοθέτηση του QUIC είναι ένα πολυπαραγοντικό ζήτημα το οποίο συνδέεται άμεσα με την επίδραση της τεχνικής του υπεροχής, της απόδοσής του σε πραγματικά περιβάλλοντα, της συμβατότητάς του με τις υπάρχουσες υποδομές και της στρατηγικής των μεγάλων εταιρειών που το προωθούν. Επίσης, από τις μελέτες που εξετάστηκαν φαίνεται ότι το QUIC ευνοείται κυρίως σε περιβάλλοντα με υψηλή καθυστέρηση, απώλειες πακέτων και κινητικότητα χρηστών, ενώ η ενσωμάτωσή του σε browsers, CDNs και υπηρεσίες μεγάλης κλίμακας προωθεί την επιτάχυνση της διάδοσής του (Langley et al., 2017; Madariaga et al., 2020; Walding, 2025). Συγχρόνως, η εξάρτησή του από το UDP, η περιορισμένη ορατότητα της κρυπτογραφημένης κίνησης και η διαφοροποίηση της απόδοσής του ανά implementation λειτουργούν ως παράγοντες επιβράδυνσης της καθολικής του υιοθέτησης (Yu & Benson, 2021; Amet et al., 2024; Jiang & Mannan, 2026).

Επομένως, σύμφωνα με την πορεία του στο σύγχρονο διαδίκτυο φαίνεται ότι το QUIC πρόκειται για ένα πρωτόκολλο με ισχυρή δυναμική και ουσιαστική επίδραση στην εξέλιξη των διαδικτυακών επικοινωνιών (Trevisan et al., 2021). Ωστόσο, το παραπάνω δε σημαίνει ότι η μετάβαση από το TCP θα είναι άμεση ή πλήρης. Συγκεκριμένα, τα δύο πρωτόκολλα ίσως συνεχίσουν να συνυπάρχουν για αρκετό χρονικό διάστημα, ενώ το QUIC θα υιοθετείται σταδιακά σε περιβάλλοντα όπου τα τεχνικά και λειτουργικά του πλεονεκτήματα είναι περισσότερο αξιοποιήσιμα (Perarnaud & Musiani, 2025; Mücke et al., 2025).

5.1 Προκλήσεις

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρέχει το πρωτόκολλο QUIC και τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω, η υιοθέτησή του συνοδεύεται από ορισμένες τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις. Πιο συγκεκριμένα, οι προκλήσεις αφορούν αφενός την αρχιτεκτονική του πρωτοκόλλου και αφετέρου τη δυσκολία ενσωμάτωσής του στις ήδη υπάρχουσες υποδομές του διαδικτύου (Langley et al., 2017). Το QUIC σχεδιάστηκε σκοπεύοντας να επιλύσει τους περιορισμούς του TCP καθώς και να υποστηρίξει αποτελεσματικότερα το HTTP/3. Ωστόσο, η πρακτική εφαρμογή του σε πραγματικά περιβάλλοντα δικτύου ανέδειξε ορισμένα σημαντικά ζητήματα τα οποία επιδρούν στην ευρεία υιοθέτησή του (Iyengar & Thomson, 2021; Thomson & Turner, 2021).

Η συμβατότητα του πρωτοκόλλου με τις υπάρχουσες δικτυακές υποδομές αποτελεί μια καίρια πρόκληση (Iyengar & Thomson, 2021). Ειδικότερα, το πρωτόκολλο εδράζεται στο UDP αντί του TCP, παρέχοντας μεγαλύτερη ευελιξία και ταχύτερη εξέλιξη, αλλά ταυτόχρονα δημιουργώντας ορισμένα προβλήματα σε περιβάλλοντα όπου η χρήση UDP είναι περιορισμένη ή ελέγχεται αυστηρά από firewalls, NATs και middleboxes (Langley et al., 2017). Μολονότι ποικίλα δίκτυα είναι σχεδιασμένα με βάση το TCP, η αυξημένη χρήση ενός νέου transport πρωτοκόλλου δημιουργεί ζητήματα συμβατότητας και διαχείρισης της κίνησης. Σύμφωνα με τους Langley et al. (2017), κατά τα αρχικά στάδια ανάπτυξης του QUIC παρατηρήθηκαν ορισμένες περιπτώσεις αποκλεισμού UDP πακέτων ή λανθασμένης διαχείρισης της κίνησης από ενδιάμεσες συσκευές δικτύου, επιδρώντας αρνητικά στην αξιοπιστία της σύνδεσης. Παρομοίως, οι Trevisan et al. (2021) υποστηρίζουν ότι η μετάβαση σε νέα transport πρωτόκολλα εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον βαθμό συμβατότητας με το ήδη εγκατεστημένο οικοσύστημα του διαδικτύου.

Επίσης, η ενσωμάτωση της κρυπτογράφησης στο ίδιο το transport επίπεδο δυσκολεύει τη δυνατότητα παρακολούθησης και ανάλυσης της κίνησης του δικτύου. Αντίθετα με το TCP, όπου ένα μέρος της πληροφορίας του πρωτοκόλλου είναι ορατό στις ενδιάμεσες συσκευές, το QUIC μέσω της κρυπτογράφησης ενός μεγάλου μέρους των μεταδεδομένων του περιορίζει τη δυνατότητα επιθεώρησης της κίνησης από εργαλεία διαχείρισης δικτύου και μηχανισμούς ασφαλείας (Thomson & Turner, 2021). Η περιορισμένη ορατότητα δημιουργεί ορισμένες προκλήσεις σε οργανισμούς και παρόχους υπηρεσιών, οι οποίοι βασίζονται σε τεχνικές traffic inspection, intrusion

detection και QoS monitoring με σκοπό τη διαχείριση των δικτύων τους. Επιπλέον, η αυξημένη κρυπτογράφηση του QUIC περιορίζει τη λειτουργία ορισμένων middleboxes, proxies και TCP optimization μηχανισμών τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως στο σύγχρονο διαδίκτυο (Langley et al., 2017). Κατά τους Cook et al. (2017) η πλήρης κρυπτογράφηση της επικοινωνίας μεταβάλλει σε σημαντικό βαθμό τον ρόλο των ενδιάμεσων διαδικτυακών φορέων, διότι η ορατότητα της κίνησης περιορίζεται κυρίως στους browsers και στους παρόχους υπηρεσιών.

Επιπλέον, η αυξημένη εξάρτηση του QUIC από το TLS 1.3 και το ευρύτερο οικοσύστημα του Web PKI δημιουργεί επιπλέον προκλήσεις ασφάλειας και διαχείρισης εμπιστοσύνης. Σύμφωνα με τους Thomson και Turner (2021), το QUIC βασίζεται πλήρως στο TLS 1.3 όσον αφορά τη διαδικασία αυθεντικοποίησης, ανταλλαγής κλειδιών και προστασίας της επικοινωνίας. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα της παραπάνω προσέγγισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την αξιοπιστία των certificate authorities και των root stores του σύγχρονου διαδικτύου. Όσον αφορά τη μελέτη για το οικοσύστημα εμπιστοσύνης του TLS, παρατηρείται ότι η συγκέντρωση της διαχείρισης εμπιστοσύνης σε περιορισμένο αριθμό οργανισμών δημιουργεί πιθανούς κινδύνους ασφάλειας και εξάρτησης από ορισμένα trust infrastructures. Επίσης, προβλήματα όπως η λανθασμένη έκδοση πιστοποιητικών ή οι καθυστερημένες ενημερώσεις root stores μπορούν να επιδράσουν σημαντικά στην ασφάλεια των συνδέσεων (Thomson & Turner, 2021).

Η διαφορετική συμπεριφορά των implementations του QUIC αποτελεί επίσης ένα καίριο ζήτημα. Σε αντίθεση με το TCP, το οποίο υλοποιείται κυρίως σε επίπεδο πυρήνα λειτουργικού συστήματος και παρουσιάζει αυξημένο βαθμό τυποποίησης, το QUIC αναπτύσσεται με βάση το user space, με αποτέλεσμα την ταχύτερη εξέλιξή του καθώς και τη δημιουργία διαφοροποιήσεων μεταξύ των υλοποιήσεων (Trevisan et al., 2021; Langley et al., 2017). Σε μελέτη των Yu & Benson (2021) υποστηρίζεται ότι διαφορετικά QUIC implementations παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις ως προς την απόδοση, τη διαχείριση congestion control και τη συμπεριφορά σε δίκτυα με υψηλή καθυστέρηση ή packet loss. Οι Mücke et al. (2025) καταλήγουν σε παρόμοια συμπεράσματα σε μελέτες αξιολόγησης HTTP/3, στις οποίες παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές μεταξύ υλοποιήσεων όπως οι QUICHE, AIOQUIC και Hypercorn ως προς το throughput, το latency και το Quality of Experience των

χρηστών). Κατά συνέπεια, η συνολική εμπειρία χρήσης του πρωτοκόλλου συχνά διαφέρει ανάλογα με την εκάστοτε υλοποίηση και την παραμετροποίησή της.

Οι παραπάνω προκλήσεις γίνονται περισσότερο εμφανείς σε κινητά και ασύρματα δίκτυα, όπου οι συνθήκες επικοινωνίας μεταβάλλονται ραγδαία. Μολονότι το QUIC έχει σχεδιαστεί με σκοπό την αποτελεσματική του λειτουργία σε περιβάλλοντα με υψηλή καθυστέρηση και μεταβολές σύνδεσης, υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες όπως το packet reordering, η αστάθεια του RTT και οι συχνές αλλαγές δικτύου οι οποίες επηρεάζουν αρνητικά την απόδοσή του (Amet et al., 2024; Iyengar & Swett, 2021). Σύμφωνα με τους Hasselquist et al. (2023), η συμπεριφορά του QUIC σε περιβάλλοντα Dual Connectivity και 5G επηρεάζεται σημαντικά από τη σωστή διαχείριση των buffers, του congestion control και του packet pacing. Επίσης, σε περιπτώσεις έντονου packet reordering δημιουργούνται ορισμένα προβλήματα fairness και μειωμένης απόδοσης, αναδεικνύοντας το γεγονός ότι η λειτουργία του πρωτοκόλλου σε δίκτυα επόμενης γενιάς αποτελεί ένα σύγχρονο αντικείμενο ενεργούς έρευνας. Επιπλέον, οι Cook et al. (2017) υποστηρίζουν ότι τα οφέλη του QUIC παρουσιάζονται κυρίως σε ασύρματα και lossy δίκτυα, ενώ σε σταθερά περιβάλλοντα υψηλής ποιότητας οι διαφορές απόδοσης σε σχέση με το HTTP/2 συχνά είναι περιορισμένες.

Επιπλέον, η διαδικασία υιοθέτησης του QUIC παρουσιάζει ορισμένες δυσκολίες, καθώς δεν είναι ακόμη ομοιόμορφη στο σύνολο του διαδικτύου. Όπως αναφέρουν οι Trevisan et al. (2021), η ύπαρξη υποδομής συμβατής με QUIC δεν συνδέεται απαραίτητα και με την ουσιαστική χρήση του πρωτοκόλλου από ιστοσελίδες και εφαρμογές, καθώς παρατηρήθηκε ότι ορισμένες ιστοσελίδες υποστήριζαν τεχνικά το QUIC, αλλά δεν διέθεταν σωστή παραμετροποίηση, κατάλληλα πιστοποιητικά ή πλήρη υποστήριξη HTTP/3. Επίσης, η συνεχής εξέλιξη των εκδόσεων του QUIC και η ταχεία ανάπτυξη νέων χαρακτηριστικών φαίνεται να δυσχεραίνει τη διατήρηση της πλήρους συμβατότητας μεταξύ των ποικίλων συστημάτων και εφαρμογών (Iyengar & Thomson, 2021).

Επιπλέον, η αυξημένη πολυπλοκότητα του QUIC ως transport πρωτοκόλλου δημιουργεί ορισμένες προκλήσεις στη διαχείριση της απόδοσής του. Το RFC 9002 υποστηρίζει ότι μηχανισμοί όπως το congestion control, το pacing και το packet loss recovery χρήζουν προσεκτικής παραμετροποίησης, με σκοπό την αποφυγή προβλημάτων όπως false loss detection, unnecessary retransmissions και persistent

congestion (Iyengar & Swett, 2021). Παράλληλα, οι συνεχείς μεταβολές των συνθηκών του δικτύου των ασύρματων περιβαλλόντων αυξάνουν την πολυπλοκότητα της αποτελεσματικής διαχείρισης της σύνδεσης, κύριως σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου και mobile υπηρεσίες (Amet et al., 2024).

Όπως αναδεικνύεται από τα παραπάνω, οι προκλήσεις που συνοδεύουν το QUIC αποδεικνύουν ότι η μετάβαση σε νέα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων εκτός από ένα τεχνικό ζήτημα, αποτελεί και μια σύνθετη διαδικασία προσαρμογής ολόκληρου του οικοσυστήματος του διαδικτύου (Langley et al., 2017). Παρά τα ουσιαστικά πλεονεκτήματα που παρέχει το συγκεκριμένο πρωτόκολλο ως προς την απόδοση, την ασφάλεια και τη μείωση της καθυστέρησης, η αποτελεσματική ενσωμάτωσή του εξαρτάται από τη σταδιακή προσαρμογή των δικτύων, εφαρμογών, παρόχων υπηρεσιών και μηχανισμών διαχείρισης στις απαιτήσεις της σύγχρονης αρχιτεκτονικής επικοινωνίας (Iyengar & Thomson, 2021; Trevisan et al., 2021).

5.2 Περιορισμοί

Όπως καθίσταται φανερό από τα παραπάνω, το QUIC αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στα πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων του σύγχρονου διαδικτύου. Ωστόσο, από την πρακτική εφαρμογή του αναδεικνύονται ορισμένοι περιορισμοί οι οποίοι επηρεάζουν τόσο την απόδοσή του όσο και τη διαδικασία της ευρύτερης υιοθέτησής του. Οι παραπάνω περιορισμοί σχετίζονται με την πολυπλοκότητα του πρωτοκόλλου, τις απαιτήσεις κρυπτογράφησης, τη διαφοροποίηση των implementations και τη συμπεριφορά του στα διαφορετικά περιβάλλοντα δικτύου (Langley et al., 2017). Συγκεκριμένα, παρά το γεγονός ότι το QUIC σχεδιάστηκε προκειμένου να αντιμετωπίσει τις αδυναμίες του TCP και του HTTP/2, η πραγματική του λειτουργία εξαρτάται σημαντικά από τις συνθήκες του δικτύου, την ποιότητα υλοποίησης και την υπάρχουσα υποδομή (Trevisan et al., 2021).

Ένας σημαντικός περιορισμός του QUIC είναι ότι η βελτιωμένη απόδοσή του δεν εμφανίζεται με τον ίδιο τρόπο σε όλα τα περιβάλλοντα επικοινωνίας. Ειδικότερα, οι Cook et al. (2017) αναφέρουν ότι τα πιο ουσιαστικά οφέλη του πρωτοκόλλου παρατηρούνται κυρίως σε ασύρματα και lossy δίκτυα, στα οποία η αποφυγή του Head-of-Line blocking και οι βελτιωμένοι μηχανισμοί ανάκαμψης συμβάλλουν στη μείωση της καθυστέρησης και στη βελτίωση της εμπειρίας του χρήστη. Αντιθέτως, σε σταθερά

δίκτυα υψηλής ποιότητας είναι συχνά περιορισμένες οι διαφορές μεταξύ QUIC και HTTP/2. Επίσης, σε μελέτες αξιολόγησης του HTTP/3 διαπιστώνεται ότι η αύξηση του throughput δεν συνεπάγεται πάντοτε αντίστοιχη βελτίωση του Quality of Experience των χρηστών (Mücke et al., 2025). Όπως υποστηρίζουν οι Amet et al. (2024) σε ορισμένες εφαρμογές πραγματικού χρόνου η ενσωμάτωση μηχανισμών αξιοπιστίας και κρυπτογράφησης ενδέχεται να οδηγήσει σε αύξηση του processing overhead και να καθυστερήσει την επικοινωνία.

Επιπλέον, η ενσωμάτωση των μηχανισμών ασφάλειας στο ίδιο το transport επίπεδο αυξάνει την πολυπλοκότητα και το υπολογιστικό κόστος του πρωτοκόλλου. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά μοντέλα TCP και TLS, το QUIC εδράζεται πλήρως στο TLS 1.3 σχετικά με τη διαδικασία αυθεντικοποίησης, ανταλλαγής κλειδιών και προστασίας της επικοινωνίας (Thomson & Turner, 2021). Ωστόσο, παρά το γεγονός ότι η παραπάνω προσέγγιση βελτιώνει σημαντικά την ασφάλεια και την ιδιωτικότητα των χρηστών, προϋποθέτει μεγάλη επεξεργαστική ισχύ από servers και τελικές συσκευές, κυρίως σε περιβάλλοντα με υψηλή κίνηση και περιορισμένους πόρους (Langley et al., 2017). Επίσης, κατά το RFC 9001, οι μηχανισμοί 0-RTT του QUIC είναι ευάλωτοι σε replay attacks, περιορίζοντας χρήση τους σε εφαρμογές που χρήζουν αυστηρής προστασίας δεδομένων και συναλλαγών (Thomson & Turner, 2021).

Η αυξημένη κρυπτογράφηση της επικοινωνίας περιορίζει τη δυνατότητα ανάλυσης και παρακολούθησης της κίνησης του δικτύου. Σύμφωνα με τους Thomson & Turner (2021) η αυξημένη χρήση κρυπτογραφημένων transport πρωτοκόλλων δυσχεραίνει την αποτελεσματική λειτουργία μηχανισμών traffic inspection, intrusion detection και network monitoring. Μολονότι, το QUIC κρυπτογραφεί σημαντικό μέρος των metadata της σύνδεσης, μειώνεται η δυνατότητα παρέμβασης των middleboxes και των εργαλείων διαχείρισης δικτύου (Cook et al., 2017). Το παραπάνω ενισχύει την ιδιωτικότητα και την προστασία της επικοινωνίας, αλλά δημιουργεί δυσκολίες σε οργανισμούς και παρόχους υπηρεσιών που εδράζονται στην ανάλυση της κίνησης για λόγους ασφάλειας, troubleshooting και Quality of Service.

Σημαντικός επίσης είναι ο περιορισμός που σχετίζεται με τη διαφοροποίηση των implementations του QUIC και του HTTP/3. Αντίθετα με το TCP το οποίο επί δεκαετίες παρουσιάζει υψηλό βαθμό σταθερότητας, ποικίλες υλοποιήσεις QUIC βρίσκονται σε στάδιο συνεχούς εξέλιξης (Trevisan et al., 2021). Όπως υποστηρίζεται

από τους Yu & Benson (2021), ορισμένες implementations παρουσιάζουν ουσιαστικές αποκλίσεις ως προς το congestion control, το pacing, τη διαχείριση packet loss και την απόδοση του πρωτοκόλλου συνολικά. Παρομοίως, οι Mücke et al. (2025) διαπίστωσαν ουσιαστικές διαφορές ανάμεσα στα ποικίλα implementations όπως οι QUICHE, AIOQUIC και Hypercorn ως προς το throughput, το latency και το First Contentful Paint, αναδεικνύοντας ότι η πραγματική συμπεριφορά του QUIC εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από την ποιότητα της υλοποίησής του.

Επίσης, ακόμη και σε περιβάλλοντα κινητής και ασύρματης επικοινωνίας εμφανίζονται ορισμένοι περιορισμοί. Μολονότι, το QUIC είναι σχεδιασμένο για αποτελεσματικότερη λειτουργία σε μεταβαλλόμενα δίκτυα υποστηρίζοντας connection migration παράγοντες όπως το packet reordering, η μεταβλητότητα του RTT και οι διαφορές ανάμεσα στις πολλαπλές διαδρομές δικτύου επιδρούν σημαντικά στους μηχανισμούς loss detection και congestion recovery του πρωτοκόλλου (Iyengar & Swett, 2021; Hasselquist et al., 2023). Αντίθετα με το TCP, το QUIC αξιοποιεί διαφορετικούς μηχανισμούς packet numbering, acknowledgment και Probe Timeout (PTO), με αποτέλεσμα τη βελτίωση της ακρίβειας της ανίχνευσης απωλειών αλλά και την αύξηση της πολυπλοκότητας της υλοποίησης και της ορθής παραμετροποίησης του πρωτοκόλλου (Iyengar & Swett, 2021). Επιπλέον, η ανάγκη για πιο ακριβής διαχείριση packet loss, pacing και retransmissions αυξάνει την πολυπλοκότητα των congestion control μηχανισμών του QUIC σε περιβάλλοντα υψηλής μεταβλητότητας και packet reordering (Iyengar & Swett, 2021; Hasselquist et al., 2023). Σε περιβάλλοντα Dual Connectivity και 5G παρατηρούνται ορισμένα προβλήματα fairness και throughput κυρίως σε περιπτώσεις που οι επιμέρους συνδέσεις παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις σε latency και bandwidth (Hasselquist et al., 2023).

Τέλος, η αποτελεσματικότητα και η ασφάλεια του QUIC εξαρτώνται κατά μεγάλο βαθμό από το υπάρχον οικοσύστημα εμπιστοσύνης του διαδικτύου. Ειδικότερα, η λειτουργία του πρωτοκόλλου εδράζεται στο TLS και στο Web PKI, τα οποία εξαρτώνται από περιορισμένο αριθμό certificate authorities και root programs (Thomson & Turner, 2021). Από την παραπάνω συγκέντρωση δημιουργούνται ζητήματα εξάρτησης και πιθανών κινδύνων ασφάλειας, καθώς ζητήματα όπως η λανθασμένη έκδοση πιστοποιητικών ή αστοχίες στη διαχείριση root stores επιδρούν άμεσα στην αξιοπιστία των ασφαλών συνδέσεων. Επιπλέον, οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα σε root

stores και trust policies ενδέχεται να δημιουργήσουν προβλήματα συμβατότητας και διαχείρισης εμπιστοσύνης σε ποικίλα περιβάλλοντα χρήσης (Thomson & Turner, 2021).

Όπως καθίσταται φανερό από τα παραπάνω, παρόλο που το πρωτόκολλο συμβάλλει θετικά στην πρόοδο των επικοινωνιών του διαδικτύου, δεν αποτελεί μια καθολική λύση για κάθε περιβάλλον χρήσης (Cook et al., 2017). Η πραγματική απόδοση του QUIC εξαρτάται σημαντικά από τη σωστή υλοποίηση των μηχανισμών congestion control, RTT estimation και packet recovery (Iyengar & Swett, 2021). Το QUIC μπορεί να βελτιώνει την ταχύτητα, την ασφάλεια και την ευελιξία της επικοινωνίας, ωστόσο εμφανίζει ορισμένους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς οι οποίοι επηρεάζουν την πλήρη αξιοποίησή του στο σύγχρονο διαδίκτυο (Hasselquist et al., 2023; Mücke et al., 2025).

5.3 Προτάσεις

Το QUIC αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πρωτόκολλα της σύγχρονης δικτυακής αρχιτεκτονικής, καθώς η συνεχής ανάπτυξη του διαδικτύου και η αυξανόμενη ανάγκη για αμεσότερες, ασφαλέστερες και περισσότερο αξιόπιστες διαδικτυακές επικοινωνίες είναι μεγάλη (Langley et al., 2017). Έτσι, παρά τις προκλήσεις και τους περιορισμούς που συνοδεύουν την υιοθέτησή του, φαίνεται ότι η συνολική πορεία εξέλιξης του πρωτοκόλλου μπορεί να διαδραματίσει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη μελλοντική λειτουργία του διαδικτύου και του HTTP/3 (Iyengar & Thomson, 2021). Ωστόσο, προκειμένου να αξιοποιηθεί στο μέγιστο δυνατό επίπεδο απαιτείται περαιτέρω έρευνα, βελτιστοποίηση και προσαρμογή των υφιστάμενων υποδομών του διαδικτύου.

Σημαντικό ζήτημα σχετικά με τη μελλοντική εξέλιξη του πρωτοκόλλου αποτελεί η βελτίωση των μηχανισμών congestion control και loss recovery. Μολονότι το RFC 9002 εισάγει πιο σύγχρονες τεχνικές διαχείρισης απωλειών και καθυστέρησης σε σύγκριση με το TCP, η λειτουργία του QUIC σε δίκτυα υψηλής μεταβλητότητας επηρεάζεται από παράγοντες όπως το packet reordering, η αστάθεια του RTT και οι συχνές αλλαγές σύνδεσης (Iyengar & Swett, 2021). Συνεπώς, η ανάπτυξη προσαρμοστικότερων congestion control αλγορίθμων δύναται να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της απόδοσης του πρωτοκόλλου σε ασύρματα και κινητά περιβάλλοντα, κυρίως σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου και υπηρεσίες υψηλών απαιτήσεων (Hasselquist et al., 2023). Επιπλέον, η αποτελεσματικότερη διαχείριση retransmissions

και pacing μπορεί να περιορίσει προβλήματα fairness καθώς και να βελτιώσει τη σταθερότητα της σύνδεσης συνολικά (Amet et al., 2024).

Ιδιαίτερα σημαντική θεωρείται επίσης η περαιτέρω εξέλιξη του QUIC σε περιβάλλοντα 5G και μελλοντικών δικτύων κινητής επικοινωνίας. Η δυνατότητα connection migration και η λειτουργία του πάνω από UDP επιτρέπουν στο πρωτόκολλο να ανταποκρίνεται αποτελεσματικότερα σε αλλαγές δικτύου και handovers μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών πρόσβασης (Langley et al., 2017). Παρόλα αυτά, η συμπεριφορά του QUIC σε περιβάλλοντα multipath και Dual Connectivity εξακολουθεί να αποτελεί ενεργό αντικείμενο έρευνας, καθώς προβλήματα όπως οι αποκλίσεις στο RTT και το packet reordering επηρεάζουν την αποδοτικότητα της επικοινωνίας (Hasselquist et al., 2023). Για τον λόγο αυτό, η περαιτέρω ανάπτυξη του Multipath QUIC θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς θα μπορούσε να ενισχύσει την καλύτερη αξιοποίηση πολλαπλών διαδρομών δικτύου και την αποτελεσματικότερη υποστήριξη εφαρμογών cloud, edge computing και υπηρεσιών πραγματικού χρόνου.

Επίσης, ιδιαίτερης σημασίας θεωρείται η περαιτέρω ωρίμανση των implementations του QUIC και του HTTP/3. Οι διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα διαφορετικά implementations φανερώνουν ότι η απόδοση του πρωτοκόλλου εξαρτάται σε κύριο βαθμό από τον τρόπο υλοποίησής του, καθώς και από τη σωστή παραμετροποίηση μηχανισμών όπως το congestion control, το pacing και το packet recovery (Yu & Benson, 2021). Επιπλέον, σε μελέτες αξιολόγησης του HTTP/3 αναδεικνύεται ότι οι διαφορετικές υλοποιήσεις παρουσιάζουν ορισμένες σημαντικές αποκλίσεις ως προς το throughput, το latency και την ποιότητα εμπειρίας των χρηστών (Mücke et al., 2025). Για τον παραπάνω λόγο, είναι απαραίτητη η ανάπτυξη πιο σταθερών και βελτιστοποιημένων implementations προκειμένου να επιτευχθεί η βελτίωση της συνολικής αξιοπιστίας και αποδοτικότητας του πρωτοκόλλου στο σύγχρονο διαδίκτυο.

Ακόμη, φαίνεται ότι είναι ουσιαστική η ενίσχυση της πρώτης υιοθέτησης του HTTP/3 και η βελτίωση της συμβατότητας μεταξύ browsers, CDN παρόχων και δικτυακών υποδομών. Η χρήση του QUIC αυξάνεται συνεχώς, ωστόσο η πραγματική αξιοποίηση του πρωτοκόλλου διαφέρει σημαντικά ανάμεσα στις ποικίλες ιστοσελίδες, υπηρεσίες και παρόχους περιεχομένου (Trevisan et al., 2021). Η ευρύτερη ενσωμάτωση του HTTP/3 από cloud πλατφόρμες, content delivery networks και σύγχρονες διαδικτυακές υπηρεσίες δύναται να επιταχύνει τη μετάβαση σε ένα αποδοτικότερο και με μειωμένη

καθυστερήση διαδικτύου. Επιπρόσθετα, η σταθεροποίηση των εκδόσεων του QUIC και η περαιτέρω τυποποίηση των implementations μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των προβλημάτων συμβατότητας και fragmentation ανάμεσα στα ποικίλα συστήματα και εφαρμογές.

Επιπλέον, ιδιαίτερης σημασίας αποτελεί η ανάπτυξη νέων τεχνικών διαχείρισης και παρακολούθησης της κρυπτογραφημένης δικτυακής κίνησης. Η εκτεταμένη χρήση end-to-end encryption οδηγεί σε σημαντικό περιορισμό της δυνατότητας ανάλυσης της επικοινωνίας από μηχανισμούς monitoring και middleboxes, ενώ δημιουργεί νέες προκλήσεις όσον αφορά τη διαχείριση και την ασφάλεια των δικτύων (Langley et al., 2017). Ως εκ τούτου, μέσω της ανάπτυξης καινοτόμων προσεγγίσεων network telemetry και traffic analysis επιτυγχάνεται η βελτίωση της παρακολούθησης της απόδοσης των δικτύων χωρίς να επηρεάζεται η ιδιωτικότητα των χρηστών. Παράλληλα, ιδιαίτερα σημαντική θεωρείται η ενίσχυση της αξιοπιστίας και της διαφάνειας του Web PKI αναφορικά με τη διατήρηση της ασφάλειας των QUIC συνδέσεων και του οικοσυστήματος TLS (Thomson & Turner, 2021).

Η μελλοντική εξέλιξη του QUIC συνδέεται άμεσα με τις αυξανόμενες απαιτήσεις του σύγχρονου διαδικτύου για χαμηλή καθυστέρηση, αυξημένη ασφάλεια και μεγαλύτερη ευελιξία επικοινωνίας. Για τους παραπάνω λόγους, κρίνεται αναγκαία η περαιτέρω έρευνα και βελτιστοποίηση του πρωτοκόλλου με σκοπό τη δημιουργία ενός πιο αποδοτικού, ασφαλούς και ευέλικτου διαδικτυακού περιβάλλοντος για τις εφαρμογές επόμενης γενιάς.

Τέλος, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η περαιτέρω ερευνητική μελέτη του QUIC σε πραγματικά περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας. Ζητήματα όπως η συμπεριφορά του πρωτοκόλλου σε multipath περιβάλλοντα, η αποτελεσματικότητα διαφορετικών congestion control αλγορίθμων και η αλληλεπίδραση του QUIC με τεχνολογίες 5G και edge computing είναι ορισμένα πεδία που θα μπορούσαν να απασχολήσουν σημαντικά τη μελλοντική έρευνα. Επιπλέον, η αξιολόγηση της σταθερότητας, της ασφάλειας και της αποδοτικότητας των διαφορετικών υλοποιήσεων του πρωτοκόλλου κρίνεται απαραίτητη, καθώς η εξέλιξη του HTTP/3 και των user-space implementations είναι ραγδαία και συνεχής (Mücke et al., 2025).

6. Συμπεράσματα

Κύριος στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση του πρωτοκόλλου QUIC και η υιοθέτησή του στο σύγχρονο διαδίκτυο, εστιάζοντας στα τεχνικά χαρακτηριστικά, την απόδοσή του και τον ρόλο του στην εξέλιξη των επικοινωνιών του διαδικτύου. Μέσω της μελέτης της αρχιτεκτονικής του QUIC, της σχέσης του με το HTTP/3 και της πρακτικής εφαρμογής του σε σύγχρονα περιβάλλοντα δικτύου, αναδείχθηκε ότι το πρωτόκολλο αποτελεί μια ουσιαστική προσπάθεια αντιμετώπισης περιορισμών οι οποίες χαρακτηρίζουν τα παραδοσιακά πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων, κυρίως το TCP και το HTTP/2 (Langley et al., 2017; Iyengar & Thomson, 2021). Η ανάπτυξη του QUIC σχετίζεται τόσο με την τεχνική εξέλιξη των transport πρωτοκόλλων, όσο και με τη γενικότερη ανάγκη της προσαρμογής του διαδικτύου στις απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών, όπως η χαμηλή καθυστέρηση, η ασφαλή επικοινωνία και η σταθερή απόδοση σε απαιτητικά περιβάλλοντα δικτύου (Langley et al., 2017; Gupta & Bartos, 2022).

Από την ανάλυση της σχετικής βιβλιογραφίας φάνηκε ότι το QUIC διαφοροποιείται από τα παραδοσιακά πρωτόκολλα μεταφοράς δεδομένων, καθώς λειτουργεί πάνω από το UDP και ενσωματώνει μηχανισμούς ασφάλειας μέσω του TLS 1.3. Το παραπάνω συμβάλλει στη μείωση του χρόνου εγκατάστασης της σύνδεσης, ενώ παράλληλα βελτιώνει την αποδοτικότητα της επικοινωνίας συνολικά, κυρίως σε περιβάλλοντα με καθυστέρηση και απώλειες πακέτων τα οποία επηρεάζουν την εμπειρία των χρηστών (Thomson & Turner, 2021). Επιπλέον, η δυνατότητα υποστήριξης πολλαπλών ανεξάρτητων streams περιορίζει σημαντικά το φαινόμενο Head-of-Line blocking, το οποίο αποτελούσε σημαντικό περιορισμό του HTTP/2 και επιδρούσε αρνητικά στην αποδοτικότητα των εφαρμογών του διαδικτύου (Amet et al., 2024). Επιπρόσθετα, η λειτουργία του QUIC σε user space προωθεί την ταχύτερη εξέλιξη και πιο ευέλικτη ενσωμάτωση καινοτόμων μηχανισμών συγκριτικά με το TCP, το οποίο εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τις ενημερώσεις των λειτουργικών συστημάτων (Langley et al., 2017; Trevisan et al., 2021).

Η μελέτη της σχέσης QUIC και HTTP/3 κατέδειξε ότι το πρωτόκολλο αποτελεί τη βάση της νέας γενιάς διαδικτυακών επικοινωνιών. Το HTTP/3 αξιοποιεί τις δυνατότητες του QUIC με σκοπό τη βελτίωση της ταχύτητας, της αξιοπιστίας και της εμπειρίας χρήστη (Iyengar & Thomson, 2021), ενώ το HTTP/2 αντικαθίσταται

σταδιακά από το HTTP/3 αναδεικνύοντας τη γενικότερη μετάβαση του διαδικτύου σε πιο ευέλικτες και αποδοτικές μορφές επικοινωνίας (Mücke et al., 2025). Επιπλέον, η δυνατότητα ταχύτερης εγκατάστασης σύνδεσης μέσω των μηχανισμών 0-RTT και connection resumption μειώνει σημαντικά το latency σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, υπηρεσίες streaming και cloud περιβάλλοντα (Thomson & Turner, 2021).

Από την ανάλυση της απόδοσης του QUIC φάνηκε ότι το πρωτόκολλο παρέχει ουσιαστικά πλεονεκτήματα σε ασύρματα και κινητά δίκτυα, καθώς και σε περιβάλλοντα με υψηλή καθυστέρηση ή packet loss. Οι μηχανισμοί congestion control και loss recovery που αναφέρονται στο RFC 9002 βοηθούν στην αποτελεσματικότερη διαχείριση της απώλειας πακέτων και βελτιώνουν την προσαρμογή στις μεταβαλλόμενες συνθήκες του δικτύου (Iyengar & Swett, 2021). Επιπλέον, η δυνατότητα connection migration που παρέχει το QUIC συμβάλλει στην αξιοποίησή του από κινητές συσκευές και περιβάλλοντα με συχνές μετακινήσεις χρηστών ανάμεσα στα διαφορετικά δίκτυα (Amet et al., 2024). Ωστόσο, η απόδοση του QUIC φαίνεται ότι δεν είναι ανώτερη σε όλα τα περιβάλλοντα επικοινωνίας. Συγκεκριμένα, σε σταθερά και υψηλής ποιότητας δίκτυα οι διαφορές HTTP/2 και TCP συχνά είναι περιορισμένες, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις το επιπλέον overhead της κρυπτογράφησης και των μηχανισμών αξιοπιστίας επηρεάζεται αρνητικά από την καθυστέρηση της επικοινωνίας (Cook et al., 2017).

Αξιοσημείωτο είναι ότι η υιοθέτηση του QUIC δεν εξαρτάται μόνο από τα τεχνικά του χαρακτηριστικά, αλλά και από τη γενικότερη αποδοχή του από το οικοσύστημα του διαδικτύου (Trevisan et al., 2021). Λόγω της υποστήριξής του από μεγάλες εταιρείες τεχνολογίας, browsers, CDNs και υπηρεσίες cloud επιτεύχθηκε η διάδοσή του καθώς και η αύξηση της διαδικτυακής κίνησης που βασίζεται στο HTTP/3 και στο QUIC (W3Techs, 2026). Αρχικά, η υιοθέτηση του πρωτοκόλλου από τη Google και η αξιοποίησή του σε υπηρεσίες μεγάλης κλίμακας οδήγησαν στην αξιολόγησή του σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και προώθησαν άμεσα τη διαδικασία διάδοσής του (Langley et al., 2017). Επιπλέον, η ενσωμάτωσή του σε web browsers και CDNs μετέτρεψε βαθμιαία το QUIC από μια πειραματική τεχνολογία σε ένα κύριο στοιχείο της σύγχρονης επικοινωνίας στο διαδίκτυο (Madariaga et al., 2020).

Ωστόσο, η εργασία ανέδειξε, επίσης, τις σημαντικές προκλήσεις που συνοδεύουν την ευρεία υιοθέτηση του QUIC. Η εξάρτηση από το UDP δημιουργεί προβλήματα

συμβατότητας με ορισμένες υπάρχουσες υποδομές δικτύου και middleboxes, ενώ η εκτεταμένη κρυπτογράφηση συμβάλλει περιοριστικά στην παρακολούθηση και ανάλυση της κίνησης του διαδικτύου από μηχανισμούς διαχείρισης και ασφάλειας (Trevisan et al., 2021). Επιπλέον, η διαφορετική συμπεριφορά ανάμεσα στα implementations, η υψηλή πολυπλοκότητα των μηχανισμών congestion control και η εξάρτηση από το οικοσύστημα TLS και Web PKI δείχνουν ότι η πλήρης αξιοποίηση του πρωτοκόλλου προϋποθέτει περαιτέρω έρευνα και (Yu et al., 2021). Οι παραπάνω περιορισμοί αποδεικνύουν ότι η μετάβαση σε καινοτόμα transport πρωτόκολλα εκτός από μια τεχνική διαδικασία αποτελεί και διαδικασία προσαρμογής ολόκληρου του οικοσυστήματος του διαδικτύου (Langley et al., 2017).

Επιπλέον, όπως φάνηκε στην παρούσα εργασία, η μελλοντική εξέλιξη του QUIC συνδέεται άμεσα με την ανάπτυξη των δικτύων επόμενης γενιάς και των σύγχρονων υπηρεσιών διαδικτύου. Η αυξανόμενη χρήση εφαρμογών πραγματικού χρόνου, cloud υπηρεσιών, mobile εφαρμογών και περιβαλλόντων 5G οδηγεί σε ολοένα και μεγαλύτερες ανάγκες χαμηλής καθυστέρησης και αποτελεσματικής διαχείρισης της δικτυακής κίνησης. Συνεπώς, το QUIC φαίνεται να διαδραματίζει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο, αφού προσφέρει αφενός μεγαλύτερη ευελιξία και αφετέρου καλύτερη προσαρμογή στις σύγχρονες απαιτήσεις επικοινωνίας (Hasselquist et al., 2023). Τέλος, η συνεχής εξέλιξη των implementations και των μηχανισμών congestion control προβλέπεται να οδηγήσει σε αύξηση της απόδοσης και της αξιοπιστίας του πρωτοκόλλου στο άμεσο χρονικό διάστημα (Yu & Benson, 2021).

Ως απόρροια των παραπάνω, καθίσταται φανερό ότι το QUIC αποτελεί μια ιδιαίτερα σημαντική εξέλιξη στο σύγχρονο διαδίκτυο, μολονότι ανταποκρίνεται στις αυξανόμενες ανάγκες για ταχύτερη, ασφαλέστερη και πιο ευέλικτη διαδικτυακή επικοινωνία. Παρά τις ορισμένες τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις που ενυπάρχουν στο πρωτόκολλο, από τη συνεχής υιοθέτηση του HTTP/3 και την αυξανόμενη αξιοποίηση εφαρμογών πραγματικού χρόνου φαίνεται ότι το QUIC θα επηρεάσει ουσιαστικά τη μελλοντική εξέλιξη των transport πρωτοκόλλων και της διαδικτυακής αρχιτεκτονικής (Iyengar & Thomson, 2021; Trevisan et al., 2021). Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω βελτιστοποίηση και εξέλιξη του πρωτοκόλλου με σκοπό τη δημιουργία ενός πιο αποδοτικού και προσαρμοστικού περιβάλλοντος επικοινωνίας για τις εφαρμογές επόμενης γενιάς.

Βιβλιογραφία

- Amet, M., Thomas, L., & Song, Y.-Q. (2024). A performance evaluation of QUIC in real-time networks. In *Proceedings of the 32nd International Conference on Real-Time Networks and Systems (RTNS 2024)* (pp. 255–265). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3696355.3699698>
- Cook, S., Mathieu, B., Truong, P., & Hamchaoui, I. (2017). QUIC: Better for what and for whom? In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7997281>
- De Coninck, Q., & Bonaventure, O. (2017). Multipath QUIC: Design and evaluation. In *Proceedings of the 13th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies (CoNEXT '17)* (pp. 160–166). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3143361.3143370>
- Dellaverson, J., Li, T., Wang, Y., Iyengar, J., Afanasyev, A., & Zhang, L. (2019). A quick look at QUIC. *The Internet Protocol Journal*, 22(1), 2–12. <https://web.cs.ucla.edu/~lixia/papers/UnderstandQUIC.pdf>
- Gupta, A., & Bartos, R. (2022). User experience evaluation of HTTP/3 in real-world deployment scenarios. In *2022 25th Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN)* (pp. 17–23). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIN53892.2022.9758130>
- Hasselquist, D., Lindström, C., Korzhitskii, N., Carlsson, N., & Gurtov, A. (2023). QUIC throughput and fairness over dual connectivity. *Computer Networks*, 223, 109431. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.109431>
- Huston, G. (2025, June 17). *A QUIC progress report*. APNIC Blog. <https://blog.apnic.net/2025/06/17/a-quic-progress-report/>
- Iyengar, J., & Thomson, M. (2021). *QUIC: A UDP-based multiplexed and secure transport* (RFC 9000). RFC Editor. <https://doi.org/10.17487/RFC9000>
- Jiang, S., & Mannan, M. (2026). *A closer look at QUIC traffic: Characterizing QUIC usage and privacy issues in the wild*. In *Proceedings of the Workshop on Measurements, Attacks, and Defenses for the Web (MADWeb 2026)*. Network and Distributed System Security Symposium (NDSS). <https://madweb.work/papers/2026/madweb26-paper24.pdf>
- Kumar, P. (2020). *QUIC (Quick UDP Internet Connections)—A quick study* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.03059>
- Langley, A., Riddoch, A., Wilk, A., Vicente, A., Krasic, C., Zhang, D., Yang, F., Kouranov, F., Swett, I., Iyengar, J., Bailey, J., Dorfman, J., Roskind, J., Kulik, J., Westin, P., Tenneti, R., Shade, R., Hamilton, R., Vasiliev, V., ... Shi, Z. (2017). The QUIC transport protocol: Design and Internet-scale deployment. In *Proceedings of the Conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication (SIGCOMM '17)* (pp. 183–196). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3098822.3098842>

- Liu, F., Farkiani, B., DeHart, J., Parwatikar, J., & Crowley, P. (2024). *Performance comparison of HTTP/3 and HTTP/2 with proxy integration* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2409.16267>
- Madariaga, D., Torrealba, L., Madariaga, J., Bermúdez, J., & Bustos-Jiménez, J. (2020). Analyzing the adoption of QUIC from a mobile development perspective. In *Proceedings of the Workshop on the Evolution, Performance, and Interoperability of QUIC (EPIQ '20)*. Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3405796.3405830>
- Mücke, J., Nawrocki, M., Hiesgen, R., Sattler, P., Zirngibl, J., Carle, G., Luxemburk, J., Schmidt, T. C., & Wählisch, M. (2025). Waiting for QUIC: Passive measurements to understand QUIC deployments. *Proceedings of the ACM on Networking*, 3(CoNEXT4), Article 41, 1–26. <https://doi.org/10.1145/3768988>
- Olzak, T. (2025). *QUIC: Uses and adoption* [Preprint]. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/396523543_QUIC_Uses_and_Adoption
- Perarnaud, C., & Musiani, F. (2025). QUIC, or the battle that never was: A case of infrastructuring control over Internet traffic. *New Media & Society*, 28(5). <https://doi.org/10.1177/14614448251336438>
- Saif, D., Lung, C.-H., & Matrawy, A. (2021). An early benchmark of quality of experience between HTTP/2 and HTTP/3 using Lighthouse. In *IEEE International Conference on Communications (ICC 2021)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICC42927.2021.9500258>
- Thomson, M., & Turner, S. (2021). *Using TLS to secure QUIC* (RFC 9001). RFC Editor. <https://doi.org/10.17487/RFC9001>
- Trevisan, M., Giordano, D., Drago, I., & Safari Khatouni, A. (2021). Measuring HTTP/3: Adoption and performance. In *2021 19th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet)* (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MedComNet52149.2021.9501274>
- Trilivas, A. (2023). *QUIC transport layer protocol* [Presentation]. University of Piraeus. <https://thales.cs.unipi.gr/modules/document/file.php/TMB115/QUIC%20TRANSPORT%20LAYER%20PROTOCOL.pdf>
- W3Techs. (2026). *Usage statistics of QUIC for websites*. <https://w3techs.com/technologies/details/ce-quic>
- Walding, M. (2025). *An update on QUIC adoption and traffic levels*. CellStream. <https://www.cellstream.com/2025/02/14/an-update-on-quic-adoption-and-traffic-levels/>
- Yu, A., & Benson, T. (2021). Dissecting performance of production QUIC. In *Proceedings of the Web Conference 2021 (WWW '21)* (pp. 1157–1168). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3442381.3450103>
- Zhang, X., Jin, S., He, Y., Hassan, A., Mao, Z. M., Qian, F., & Zhang, Z.-L. (2023). *QUIC is not quick enough over fast internet* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.09423>

Iyengar, J., & Swett, I. (2021). *QUIC loss detection and congestion control* (RFC 9002). RFC
Editor. <https://doi.org/10.17487/RFC9002>