



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ
ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

ΨΗΦΙΑΚΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΙΑ
ΚΑΙ ΝΕΟΦΥΗΣ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΝΤΡΟ ΕΡΕΥΝΑΣ ΓΙΑ
ΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ
ΔΙΑΚΥΒΕΡΝΗΣΗ



*Κβαντικοί Υπολογιστές, Καινοτομία &
Νεοφυής Επιχειρηματικότητα*

Σωτήριος Ντάλας

3272023007,
icsdm723007@aegean.gr

Επιβλέπων: Γεράσιμος Κοντός

Μάρτιος 2026

Η Διπλωματική Εργασία παρουσιάστηκε ενώπιον
του Διδακτικού Προσωπικού του Πανεπιστημίου Αιγαίου & του Εθνικού Μετσόβιου
Πολυτεχνείου

Σε Μερική Εκπλήρωση των απαιτήσεων για την απόκτηση του μεταπτυχιακού
διπλώματος ειδίκευσης «Ψηφιακή Καινοτομία και Νεοφυής Επιχειρηματικότητα»

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ
ΕΠΙΚΥΡΩΝΕΙ ΤΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του Σωτήριου Ντάλα

Γεράσιμος Κοντός, Επιβλέπων

Διδάκτωρ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών
και Επικοινωνιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Χαράλαμπος Αλεξόπουλος, Μέλος

Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών
και Επικοινωνιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

Ιωάννης Χαραλαμπίδης, Μέλος

Βαθμίδα Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών
και Επικοινωνιακών Συστημάτων, Πανεπιστήμιο Αιγαίου

© 2026

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Σωτήριος Ντάλας

Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Πρόλογος

Η εργασία αυτή ολοκληρώθηκε στο πλαίσιο του Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ψηφιακή Καινοτομία και Νεοφυής Επιχειρηματικότητα» του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Γεράσιμο Κοντό, για την καθοδήγηση και την υποστήριξή του σε όλη τη διάρκεια της εκπόνησης.

Πάνω απ' όλα, ευχαριστώ τη σύζυγό μου Μαρία για την υπομονή, τη στήριξη και την κατανόηση που έδειξε σε όλη αυτή τη διαδρομή. Χωρίς εκείνη, αυτή η εργασία δεν θα είχε γίνει.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή εξετάζουμε τι ρόλο μπορούν να παίξουν οι κβαντικοί υπολογιστές στην ψηφιακή καινοτομία και στη νεοφυή επιχειρηματικότητα. Το ερώτημα δεν είναι θεωρητικό: η κβαντική τεχνολογία βγαίνει σταδιακά από τα εργαστήρια και αρχίζει να δοκιμάζεται σε πραγματικά επιχειρησιακά προβλήματα. Εμείς εστιάζουμε στα logistics, γιατί πρόκειται για κλάδο γεμάτο δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης που η κλασική υπολογιστική δυσκολεύεται να λύσει αποτελεσματικά.

Η δουλειά μας βασίζεται σε δύο πυλώνες. Ο πρώτος είναι μια βιβλιογραφική ανασκόπηση 65 πηγών (ακαδημαϊκές δημοσιεύσεις και εκθέσεις βιομηχανίας, κυρίως από το 2018 και μετά). Ο δεύτερος είναι δύο μελέτες περίπτωσης. Στην πρώτη, που βασίζεται σε εκθέσεις του IBM Institute for Business Value, μια υβριδική κβαντο-κλασική λύση εφαρμόστηκε σε last-mile διανομή με 1.200 σημεία παράδοσης και πέτυχε μείωση κόστους 1-3%. Η δεύτερη είναι πιο εντυπωσιακή: οι Weinberg et al. (2023), σε δημοσίευση στο Scientific Reports του Nature, χρησιμοποίησαν τον D-Wave Hybrid solver για τη δρομολόγηση στόλου της Aisin Corporation. Μείωσαν τα φορτηγά από 142 σε 61, δηλαδή 57% λιγότερα, καλύπτοντας το 99,39% της ζήτησης.

Τι βγαίνει από όλα αυτά; Ότι στη σημερινή εποχή NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), κανείς δεν μπορεί να αντικαταστήσει τα κλασικά συστήματα με αμιγώς κβαντικά. Αυτό που λειτουργεί είναι οι υβριδικές αρχιτεκτονικές, όπου ένα κβαντικό "κομμάτι" μπαίνει μέσα σε κλασικά workflows και βελτιώνει συγκεκριμένα σημεία. Παρουσιάζουμε επίσης το παγκόσμιο οικοσύστημα κβαντικών startups (πάνω από 500 εταιρείες), τα επιχειρηματικά μοντέλα που δοκιμάζονται (optimization-as-a-service, QCaaS), και τον ρόλο ευρωπαϊκών πρωτοβουλιών όπως το HellasQCI.

Η δική μας πρωτότυπη συνεισφορά είναι ένα πλαίσιο ανάλυσης που ονομάζουμε Quantum Startup Strategy Canvas. Πρόκειται για ένα εργαλείο τεσσάρων διαστάσεων (τεχνολογική τοποθέτηση, πρόταση αξίας, αρχιτεκτονική κόστους-εσόδων, σχέσεις οικοσυστήματος) που μπορεί να βοηθήσει ιδρυτές quantum startups να σχεδιάσουν τη στρατηγική τους. Η εργασία γεφυρώνει δύο κόσμους που σπάνια μιλάνε μεταξύ τους: την τεχνική βιβλιογραφία της κβαντικής υπολογιστικής και την πρακτική επιχειρηματική στρατηγική.

Λέξεις-κλειδιά: κβαντική υπολογιστική, ψηφιακή καινοτομία, νεοφυής επιχειρηματικότητα, logistics, βελτιστοποίηση δρομολόγησης, υβριδικά κβαντο-κλασικά συστήματα, quantum startups, deep tech

Abstract

In this paper, we examine the role that quantum computers can play in digital innovation and startup entrepreneurship. The question is not a theoretical one: quantum technology is gradually emerging from the laboratories and beginning to be tested on real-world business problems. We focus on logistics because it is an industry full of difficult optimization problems that classical computing struggles to solve effectively.

Our work is based on two pillars. The first is a literature review of 65 sources (academic publications and industry reports, primarily from 2018 onward). The second consists of two case studies. In the first, based on reports from the IBM Institute for Business Value, a hybrid quantum-classical solution was applied to last-mile delivery with 1,200 delivery points and achieved a 1-3% cost reduction. The second is more impressive: Weinberg et al. (2023), in a paper published in Nature's Scientific Reports,

used the D-Wave Hybrid solver for Aisin Corporation's fleet routing. They reduced the number of trucks from 142 to 61, a 57% reduction, while covering 99.39% of demand.

What does all this mean? It means that in the current era of NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), no one can replace classical systems with purely quantum ones. What works are hybrid architectures, where a quantum "component" is integrated into classical workflows to improve specific aspects. We also present the global ecosystem of quantum startups (over 500 companies), the business models being tested (optimization-as-a-service, QCaaS), and the role of European initiatives such as HellasQCI.

Our original contribution is an analytical framework we call the Quantum Startup Strategy Canvas. It is a four-dimensional tool (technological positioning, value proposition, cost-revenue architecture, ecosystem relationships) that can help founders of quantum startups design their strategy. This work bridges two worlds that rarely communicate with each other: the technical literature of quantum computing and practical business strategy.

Keywords: quantum computing, digital innovation, startup entrepreneurship, logistics, routing optimization, hybrid quantum-classical systems, quantum startups, deep tech

Contents

Πρόλογος	3
Περίληψη	4
Abstract	4
Ευρετήριο Συντομογραφιών	8
Ευρετήριο Πινάκων	10
Ευρετήριο Σχημάτων	11
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή	13
Ερευνητικά ερωτήματα	14
Αντικείμενο και όρια της μελέτης	14
Μεθοδολογία έρευνας	15
Δομή της εργασίας	16
1.1 Ιστορική εξέλιξη της κβαντικής υπολογιστικής	18
1.2 Βασικές αρχές κβαντικής υπολογιστικής	20
1.2.1 Κλασικά bits και κβαντικά qubits	20
1.2.2 Υπέρθωση (superposition)	21
1.2.3 Διεμπλοκή (entanglement)	22
1.2.4 Κβαντικές πύλες και κβαντικά κυκλώματα	22
1.2.5 Μέτρηση, θόρυβος και decoherence	23
1.2.6 Η NISQ εποχή (Noisy Intermediate-Scale Quantum)	23
1.3 Τύποι κβαντικών υπολογιστών και σχετικές προσεγγίσεις	25
1.3.1 Gate-based (κυκλωματικά) κβαντικά συστήματα	25
1.3.2 Quantum annealing	25
1.3.3 Αναλογικά και neutral-atom κβαντικά συστήματα	26
1.3.4 Quantum-inspired μέθοδοι	26
1.3.5 Συνοπτική σύγκριση	26
1.4 Κβαντικοί αλγόριθμοι σχετικοί με επιχειρήσεις (optimization, machine learning, cryptography)	27
1.5 Προκλήσεις και περιορισμοί για ευρεία υιοθέτηση	28
Κεφάλαιο 2 - Ψηφιακή καινοτομία και νεοφυής επιχειρηματικότητα	29
2.1 Έννοια της ψηφιακής καινοτομίας	29
Digital Artifacts	30
2.2 Ψηφιακή επιχειρηματικότητα και digital startups	30
2.2.1 Ψηφιακή επιχειρηματικότητα και digital startups	30
2.2.2 Digital entrepreneurship: ορισμοί και εξέλιξη	31
2.3 Deep tech και επιστημονική επιχειρηματικότητα	32

2.4 Επιχειρηματικά μοντέλα και startups	33
2.5 Προκλήσεις και ιδιαιτερότητες των deep-tech/quantum startups	34
2.6 Πλαίσια ανάλυσης για την καινοτομία σε κβαντικές τεχνολογίες	35
Κεφάλαιο 3 - Το παγκόσμιο οικοσύστημα κβαντικών τεχνολογιών & startups	37
3.1 Παγκόσμια χαρτογράφηση του οικοσυστήματος κβαντικών τεχνολογιών	37
3.2 Κατηγορίες και χαρακτηριστικά των quantum startups	40
3.3 Τάσεις χρηματοδότησης και υποστηρικτικοί μηχανισμοί για τις quantum startups	43
3.4 Ενδεικτικά παραδείγματα διεθνών εταιρειών και quantum startups	46
3.5 Προοπτικές για την Ευρώπη και ειδικότερα για την Ελλάδα	47
Κεφάλαιο 4 - Επιχειρηματικά μοντέλα και υιοθέτηση κβαντικής υπολογιστικής	50
4.1 Πώς μπορεί να δημιουργηθεί αξία από κβαντικούς υπολογιστές (value propositions)	52
4.2 Business model innovation με βάση κβαντικές τεχνολογίες	55
4.3 Στρατηγικές υιοθέτησης για μεγάλες επιχειρήσεις (pilots, partnerships, cloud quantum services)	57
4.4 Πλαίσιο ανάλυσης για startups στο χώρο της κβαντικής υπολογιστικής	59
Κεφάλαιο 5 - Case study: Κβαντικοί υπολογιστές στα logistics	61
5.1 Ο κλάδος των logistics και της εφοδιαστικής αλυσίδας	62
5.2 Προβλήματα βελτιστοποίησης στα logistics	64
5.2.1 Vehicle Routing Problem και παραλλαγές	64
5.2.2 Last-mile delivery και φορτοεκφόρτωση	65
5.2.3 Σχεδιασμός δικτύου και capacity planning	66
5.2.4 Γιατί τα προβλήματα είναι δύσκολα και πώς λύνονται σήμερα	67
5.3 Τεχνολογικές λύσεις με κβαντικούς και quantum-inspired αλγόριθμους	68
5.3.1 Quantum annealing και logistics	68
5.3.2 Quantum-inspired και vector annealing σε logistics	69
5.3.3 Υβριδική κβαντο-κλασική βελτιστοποίηση (QAOA, variational approaches)	69
5.4 Επιλεγμένο case study: Υβριδική κβαντική βελτιστοποίηση σε last-mile logistics	70
5.4.1 Περιγραφή οργανισμού και του προβλήματος logistics	70
5.4.2 Πώς μοντελοποιήθηκε το πρόβλημα (στόχος, περιορισμοί, δεδομένα)	71
5.4.3 Τεχνολογική λύση: κβαντικό/quantum-inspired εργαλείο και πλατφόρμα	73
5.4.4 Αποτελέσματα (βελτίωση χρόνου, κόστους, αξιοπιστίας, εκπομπών)	74
5.4.5 Επιπτώσεις στο επιχειρηματικό μοντέλο και την καινοτομία	76
5.5 Δεύτερη μελέτη περίπτωσης: Υβριδική κβαντο-κλασική δρομολόγηση στην εφοδιαστική αλυσίδα της Aisin Corporation	78
5.5.1 Περιγραφή του οργανισμού και του προβλήματος logistics	78
5.5.2 Πώς μοντελοποιήθηκε το πρόβλημα (στόχος, περιορισμοί, δεδομένα)	79

5.5.3 Τεχνολογική λύση: υβριδική επαναληπτική αρχιτεκτονική	80
5.5.4 Αποτελέσματα (μείωση στόλου, ικανοποίηση ζήτησης, αυτοματοποίηση)	81
5.5.5 Επιπτώσεις στο επιχειρηματικό μοντέλο και κριτική αποτίμηση.....	83
5.5.6 Συγκριτική αποτίμηση των δύο μελετών περίπτωσης	84
5.6 Ευκαιρίες για νεοφυείς επιχειρήσεις στα logistics	85
Κεφάλαιο 6 - Συζήτηση: σύνδεση ευρημάτων με θεωρία.....	86
6.1 Επιπτώσεις για επιχειρηματικά μοντέλα στις μεταφορές και την εφοδιαστική αλυσίδα	88
6.2 Επιπτώσεις για νεοφυείς επιχειρήσεις και επενδυτές στον χώρο των logistics.....	89
6.3 Ρόλος των εθνικών στρατηγικών & του οικοσυστήματος (π.χ. clusters, incubators).....	90
Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα, περιορισμοί και μελλοντική έρευνα	91
7.1 Συνοπτικές απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα	92
7.2.1 Συμβολή στη θεωρία (ψηφιακή καινοτομία, deep tech startups)	93
7.2.2 Συμβολή στην πράξη (logistics managers, startups, policy-makers).....	93
7.3 Περιορισμοί της εργασίας	93
7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	94

Ευρετήριο Συντομογραφιών

WEF	World Economic Forum
VRP	Vehicle Routing Problem
VQE	Variational Quantum Eigensolver
SA	Simulated Annealing
RTA	Revealed Technological Advantage
R&D	Research & Development
QUBO	Quadratic Unconstrained Binary Optimization
QKD	Quantum Key Distribution
QCaaS	Quantum Computing as-a-Service
QAOA	Quantum Approximate Optimization Algorithm
PQC	Post-Quantum Cryptography
PoC	Proof of Concept
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
NP-hard	Non-deterministic Polynomial-time hard
NISQ	Noisy Intermediate-Scale Quantum
ML	Machine Learning
IPF	International Patent Family
IBM IBV	IBM Institute for Business Value
EU / EE	European Union / Ευρωπαϊκή Ένωση
EPO	European Patent Office
D-Wave	Quantum annealing company
CVRPTW	Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Συνοπτική παρουσίαση βασικών εννοιών κβαντικής υπολογιστικής που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.	24
Πίνακας 2 Συνοπτική σύγκριση βασικών προσεγγίσεων κβαντικής υπολογιστικής και quantum-inspired μεθόδων ως προς τη γενικότητα, τις τυπικές εφαρμογές και την τρέχουσα ωριμότητα (βασισμένο σε Nielsen & Chuang, 2010; Preskill, 2018; Albash & Lidar, 2018; Glover et al, 2018).	27
Πίνακας 3 Πλαίσιο Nambisan ψηφιακής καινοτομίας: εφαρμογή στις κβαντικές τεχνολογίες (Nambisan et al., 2017 · Ίδια επεξεργασία)	30
Πίνακας 4 Συνοπτική σύγκριση βασικών εννοιών που σχετίζονται με την ψηφιακή αλλαγή και την επιχειρηματικότητα στον χώρο των logistics, με έμφαση σε ορισμό, εστίαση και ενδεικτικές εφαρμογές (βασισμένο σε Fichman et al., 2014· Nambisan, 2017· Vial, 2019· Kraus et	32
Πίνακας 5 Σύγκριση «κλασικών» digital startups και deep-tech/quantum startups (Giones & Brem, 2017 · Ίδια επεξεργασία)	35
Πίνακας 6 Ενδεικτικά πλαίσια ανάλυσης για την ωριμότητα, την εμπορική ετοιμότητα και τον κλαδικό αντίκτυπο των κβαντικών τεχνολογιών, με αναφορά σε εφαρμογές στη μεταποίηση και τις εφοδιαστικές αλυσίδες	36
Πίνακας 7 Παγκόσμιο οικοσύστημα κβαντικών τεχνολογιών (OECD, 2025; Seskir et al., 2022 · Ίδια επεξεργασία)	40
Πίνακας 8 Επιχειρηματικά μοντέλα κβαντικής υπολογιστικής (McKinsey, 2025; IBM, 2022 · Ίδια επεξεργασία)	55
Πίνακας 9 Σύγκριση κλασικής & υβριδικής κβαντο-κλασικής βελτιστοποίησης (IBM IBV, 2022; Phillipson, 2024)	76
Πίνακας 10 Σύγκριση αποτελεσμάτων χειροκίνητης δρομολόγησης vs υβριδικής κβαντο-κλασικής μεθόδου στην Aisin Corporation (Weinberg et al., 2023)	81
Πίνακας 11 Συγκριτική αποτίμηση των δύο μελετών περίπτωσης κβαντικής βελτιστοποίησης στα logistics (Ίδια επεξεργασία)	84
Πίνακας 12 Σύνοψη ευρημάτων: ερευνητικά ερωτήματα, θεωρητική σύνδεση και πρακτικές επιπτώσεις (Ίδια επεξεργασία)	87
Πίνακας 13 Ευρωπαϊκές εθνικές επενδύσεις σε κβαντικές τεχνολογίες (McKinsey, 2025; EPO/OECD, 2025 · Ίδια επεξεργασία)	91
Πίνακας 14 Αντιστοίχιση ερευνητικών ερωτημάτων - κύρια ευρήματα (Ίδια επεξεργασία)	92

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1 Ενδεικτική χρονογραμμή βασικών σταθμών στην εξέλιξη της κβαντικής υπολογιστικής, από τη διαμόρφωση της κβαντικής θεωρίας έως την εποχή NISQ και τις πρώτες εμπορικές εφαρμογές (Πηγή: Nielsen & Chuang, 2010; Preskill, 2018; Seskir et al., 2024).	20
Σχήμα 2 Σχηματική απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ κλασικού bit (διακριτές καταστάσεις 0 και 1) και qubit, το οποίο μπορεί να βρίσκεται σε υπέρθεση των δύο καταστάσεων έως τη στιγμή της μέτρησης. Hussain, Zahid. (2016). Strengths and Weaknesses of Quantum Computing. International Journal of Scientific and Engineering Research. 7.	21
Σχήμα 3 Κατανομή πατεντών κβαντικών τεχνολογιών ανά χώρα, 2000–2024 (OECD, 2025 · Ίδια επεξεργασία)	39
Σχήμα 4 Συγκέντρωση χρηματοδότησης εντός κβαντικών clusters ανά γεωγραφική περιοχή (ECIPE, 2025 · Ίδια επεξεργασία)	40
Σχήμα 5 Γεωγραφική κατανομή κβαντικών startups ανά χώρα (Seskir et al., 2022 · Ίδια επεξεργασία)	43
Σχήμα 6 Εξέλιξη ιδιωτικών και δημοσίων επενδύσεων σε κβαντικές startups, 2019–2024 (McKinsey, 2024 · Ίδια επεξεργασία)	44
Σχήμα 7 Ποσοστιαία κατανομή ιδιωτικής και δημόσιας χρηματοδότησης κβαντικών τεχνολογιών, 2021–2024 (McKinsey, 2024; OECD, 2025 · Ίδια επεξεργασία)	45
Σχήμα 8 Δημόσιες επενδύσεις σε κβαντικές τεχνολογίες ανά χώρα, \$ δισ. (McKinsey QT Monitor, 2025 · Ίδια επεξεργασία)	45
Σχήμα 9 Αλυσίδα αξίας κβαντικής υπολογιστικής (IBM, 2021; McKinsey, 2025 · Ίδια επεξεργασία)	52
Σχήμα 10 Εκτιμώμενη δυνητική οικονομική αξία κβαντικής υπολογιστικής ανά κλάδο (McKinsey, 2024; IBM IBV, 2022 · Ίδια επεξεργασία)	54
Σχήμα 11 Εκτιμώμενο μέγεθος αγοράς κβαντικών τεχνολογιών, 2024 vs 2035 (McKinsey, 2024 · Ίδια επεξεργασία)	55
Σχήμα 12 Εξέλιξη εσόδων Quantum Computing-as-a-Service (QCaaS), 2023–2025 (McKinsey, 2024; SpinQ, 2025 · Ίδια επεξεργασία)	56
Σχήμα 13 Στάδια υιοθέτησης κβαντικής υπολογιστικής σε οργανισμούς (McKinsey, 2025; IBM IBV, 2022; WEF, 2025 · Ίδια επεξεργασία)	58
Σχήμα 14 Vehicle Routing Problem: depot, πελάτες, χρονικά παράθυρα και εκθετική πολυπλοκότητα (Ίδια επεξεργασία)	65
Σχήμα 15 Δίκτυο last-mile delivery: depot, ζώνες παράδοσης και ενδεικτικά δρομολόγια (Ίδια επεξεργασία βάσει IBM IBV, 2022)	71
Σχήμα 16 Βασικοί περιορισμοί μοντέλου CVRPWTW (Ίδια επεξεργασία βάσει IBM IBV, 2022; Kumar και Panneerselvam, 2012)	73
Σχήμα 17 Υβριδική κβαντο-κλασική αρχιτεκτονική για CVRPWTW (Ίδια επεξεργασία)	74
Σχήμα 18 Σύγκριση αποτελεσμάτων κλασικής vs υβριδικής βελτιστοποίησης (Ίδια επεξεργασία βάσει IBM IBV, 2022)	76
Σχήμα 19 Από πιλοτικό project σε μακροπρόθεσμη αξία μέσω κβαντικής βελτιστοποίησης (Ίδια επεξεργασία βάσει Teece, 2010)	78
Σχήμα 20 Δίκτυο εφοδιαστικής αλυσίδας Aisin Corporation (Ίδια επεξεργασία βάσει Weinberg et al., 2023)	80
Σχήμα 21 Επαναληπτική υβριδική κβαντο-κλασική αρχιτεκτονική για δρομολόγηση φορτηγών (Βασισμένο σε Weinberg et al., 2023)	81
Σχήμα 22 Σύγκριση αποτελεσμάτων δρομολόγησης Aisin Corporation (Weinberg et al., 2023)	82
Σχήμα 23 Σύγκλιση ικανοποίησης ζήτησης: SA vs D-Wave Hybrid (Βασισμένο σε Weinberg et al., 2023, Figs. 4-5)	82
Σχήμα 24 Σύγκριση συνδεσιμότητας δικτύου: χειροκίνητη vs υβριδική δρομολόγηση (Βασισμένο σε Weinberg et al., 2023, Figs. 6-7)	83
Σχήμα 25 Αλυσιδωτές επιπτώσεις μείωσης στόλου 57% στο επιχειρηματικό μοντέλο (Ίδια επεξεργασία)	84

Κεφάλαιο 1- Εισαγωγή

Η ταχεία εξέλιξη των κβαντικών τεχνολογιών τα τελευταία χρόνια έχει μετατρέψει τους κβαντικούς υπολογιστές από κάτι θεωρητικό σε αναδυόμενη υποδομή με εμφανείς προοπτικές για την οικονομία και τις επιχειρήσεις (Gill & Buyya, 2024; Preskill, 2018). Παρότι η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο, η διεθνής βιβλιογραφία και οι αναλύσεις συγκλίνουν στο ότι οι κβαντικοί υπολογιστές μπορούν να προσφέρουν ουσιαστικά πλεονεκτήματα σε τομείς όπου κυριαρχούν περίπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης, προσομοίωσης και ανάλυσης δεδομένων, τα οποία είναι δύσκολο να αντιμετωπιστούν με κλασικές μεθόδους (Montanaro, 2016; Biamonte et al., 2017).

Ένας από τους κλάδους όπου τα παραπάνω προβλήματα είναι ιδιαίτερα έντονα είναι τα logistics και η εφοδιαστική αλυσίδα, καθώς περιλαμβάνουν πολύπλοκες αποφάσεις δρομολόγησης, σχεδιασμού δικτύου, διαχείρισης αποθεμάτων και πόρων, υπό αβεβαιότητα και αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς (Phillipson, 2024; Quantum Economic Development Consortium, 2025). Η εμφάνιση νέων κβαντικών και “quantum-inspired” αλγορίθμων βελτιστοποίησης έχει οδηγήσει σε μια σειρά από πιλοτικές εφαρμογές σε πραγματικά περιβάλλοντα logistics, όπου επιχειρείται η χρήση της κβαντικής υπολογιστικής για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και τη μείωση του κόστους (NEC Corporation, 2019; IBM Institute for Business Value, 2022).

Γύρω από τις κβαντικές τεχνολογίες αναδύεται ένα ενεργό οικοσύστημα νεοφυών επιχειρήσεων, το οποίο αποτελείται τόσο από “pure-play” quantum startups όσο και από εταιρείες που ενσωματώνουν κβαντικές δυνατότητες στις υπηρεσίες τους (Seskir et al., 2022; McKinsey & Company, 2025). Τα startups αυτά δραστηριοποιούνται σε όλο το φάσμα της κβαντικής αλυσίδας αξίας, από hardware και middleware μέχρι λογισμικό, συμβουλευτικές υπηρεσίες και κάθετες εφαρμογές σε συγκεκριμένους κλάδους, όπως τα χρηματοοικονομικά, η φαρμακοβιομηχανία και τα logistics (OECD, 2025; Spinquanta, 2025).

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να διερευνήσει πώς οι κβαντικοί υπολογιστές επηρεάζουν την καινοτομία και τη νεοφυή επιχειρηματικότητα, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση σε δύο μελέτες περίπτωσης στον κλάδο των logistics. Η εργασία επιδιώκει να γεφυρώσει το τεχνολογικό υπόβαθρο της κβαντικής υπολογιστικής με τα θεωρητικά πλαίσια της ψηφιακής καινοτομίας και της digital entrepreneurship, αναδεικνύοντας νέες μορφές επιχειρηματικών μοντέλων και πεδία επιχειρηματικής δραστηριοποίησης για νεοφυείς επιχειρήσεις (Nambisan, 2017; Giones & Brem, 2017).

Πιο συγκεκριμένα, η εργασία επιδιώκει:

- Να αποτυπώσει συνοπτικά αλλά με σαφήνεια τις βασικές έννοιες και αρχές λειτουργίας των κβαντικών υπολογιστών, καθώς και τις κύριες κατηγορίες κβαντικών αλγορίθμων με επιχειρησιακό ενδιαφέρον (Preskill, 2018; Montanaro, 2016).
- Να παρουσιάσει και να αναλύσει το παγκόσμιο οικοσύστημα των κβαντικών startups, τις κύριες κατηγορίες εταιρειών, τις επενδυτικές τάσεις και τη γεωγραφική κατανομή τους (Seskir et al., 2022; OECD, 2025; McKinsey & Company, 2025).
- Να εξετάσει πώς οι κβαντικές τεχνολογίες συνδέονται με την ψηφιακή καινοτομία και τη digital / deep-tech επιχειρηματικότητα, μέσα από το πρίσμα της δημιουργίας αξίας, των επιχειρηματικών μοντέλων και των οικοσυστημάτων (Nambisan, 2017; Nambisan, Lyytinen, Majchrzak, & Song, 2017; Hacıoglu, 2024).

- Να διερευνήσει, μέσω δύο εμπειριστατωμένων μελετών περίπτωσης στον χώρο των logistics, τις δυνατότητες, τις προκλήσεις και τις επιπτώσεις από την αξιοποίηση κβαντικών και υβριδικών κβαντο-κλασικών λύσεων σε πραγματικά προβλήματα βελτιστοποίησης (Phillipson, 2024; Quantum Economic Development Consortium, 2025; Supply Chain Management Review, 2025).
- Να αναδείξει τις επιχειρηματικές ευκαιρίες αλλά και τους κινδύνους που προκύπτουν για νεοφυείς επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στη διασταύρωση κβαντικής υπολογιστικής και logistics, προτείνοντας κατευθύνσεις για τοποθέτηση σε αυτό το πεδίο (Spinquanta, 2025; VersaCloud ERP, 2025).

Ερευνητικά ερωτήματα

Με βάση τον παραπάνω σκοπό και τους επιμέρους στόχους, οργανώνουμε την εργασία γύρω από τα ακόλουθα ερευνητικά ερωτήματα:

1. Ποιες είναι οι βασικές τεχνολογικές ιδιαιτερότητες των κβαντικών υπολογιστών και με ποιους τρόπους διαφοροποιούνται από την κλασική υπολογιστική όταν εξετάζονται επιχειρησιακές εφαρμογές; (Preskill, 2018; Gill & Buyya, 2024).
2. Πώς διαμορφώνεται το παγκόσμιο οικοσύστημα κβαντικών startups όσον αφορά τους τύπους εταιρειών, τα επιχειρηματικά μοντέλα, τις επενδύσεις και τα γεωγραφικά clusters; (Seskir et al., 2022; OECD, 2025; ECIPE, 2025).
3. Με ποιους τρόπους οι κβαντικοί υπολογιστές μπορούν να λειτουργήσουν ως μοχλός ψηφιακής καινοτομίας και να υποστηρίξουν νέες μορφές digital / deep-tech entrepreneurship; (Nambisan, 2017; Nambisan et al., 2017; Kaur & Singh, 2023).
4. Ποιες κατηγορίες προβλημάτων στον χώρο των logistics και της εφοδιαστικής αλυσίδας μπορούν να ωφεληθούν περισσότερο από κβαντικές ή υβριδικές κβαντο-κλασικές πρακτικές βελτιστοποίησης; (Phillipson, 2024; NEC Corporation, 2019; Quantum Economic Development Consortium, 2025).
5. Ποιες ευκαιρίες και ποιοι κίνδυνοι αναδύονται για νεοφυείς επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στη διασταύρωση κβαντικής υπολογιστικής και logistics, και ποια επιχειρηματικά μοντέλα φαίνεται να είναι πιο υποσχόμενα; (Spinquanta, 2025; McKinsey & Company, 2025; VersaCloud ERP, 2025).

Αντικείμενο και όρια της μελέτης

Αντικείμενο της εργασίας είναι οι κβαντικοί υπολογιστές ως τεχνολογία γενικού σκοπού και η επίδρασή τους στην καινοτομία και τη νεοφυή επιχειρηματικότητα, με ειδική εστίαση στον κλάδο των logistics. Η επιλογή των logistics ως case sector δικαιολογείται από την υψηλή σημασία του κλάδου για την παγκόσμια οικονομία, την πολυπλοκότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης που αντιμετωπίζει και το αυξανόμενο ενδιαφέρον για πιλοτικές εφαρμογές κβαντικής βελτιστοποίησης (Quantum Economic Development Consortium, 2025; Supply Chain Management Review, 2025).

Η εργασία δεν επιδιώκει να καλύψει εξαντλητικά όλες τις τεχνικές πτυχές της κβαντικής υπολογιστικής, ούτε να αναλύσει μαθηματικά τους βασικούς αλγορίθμους, αλλά περιορίζεται στις έννοιες και στα τεχνικά σημεία που είναι απαραίτητα για την κατανόηση των επιχειρησιακών εφαρμογών και των επιχειρηματικών επιπτώσεων (Preskill, 2018; Montanaro, 2016). Ενώ

αναγνωρίζεται ότι οι κβαντικές τεχνολογίες επηρεάζουν και άλλους κλάδους, η εμπειριστατωμένη ανάλυση περιορίζεται στα logistics, τα οποία λειτουργούν ως αντιπροσωπευτικό παράδειγμα.

Η ανάλυση του οικοσυστήματος κβαντικών startups βασίζεται κυρίως σε δευτερογενή δεδομένα, όπως επιστημονικές δημοσιεύσεις, reports συμβουλευτικών εταιρειών, εκθέσεις διεθνών οργανισμών και εξειδικευμένες βάσεις δεδομένων (Seskir et al., 2022; OECD, 2025; McKinsey & Company, 2025). Δεδομένου ότι το πεδίο εξελίσσεται ταχύτατα, οι αριθμοί και οι ταξινομήσεις που παρουσιάζονται αντικατοπτρίζουν μια χρονική τομή και ενδέχεται να διαφοροποιηθούν στο μέλλον. Οι μελέτες περίπτωσης στα logistics στηρίζονται σε δημοσιευμένες αναφορές (τόσο βιομηχανικές εκθέσεις όσο και peer-reviewed δημοσιεύσεις) και δεν περιλαμβάνουν πρωτογενή συλλογή δεδομένων μέσω συνεντεύξεων ή ερωτηματολογίων, κάτι που αποτελεί αναγνωρισμένο περιορισμό της εργασίας (Phillipson, 2024; IBM Institute for Business Value, 2022).

Μεθοδολογία έρευνας

Μεθοδολογικά, η εργασία ακολουθεί συνδυαστική προσέγγιση βιβλιογραφικής ανασκόπησης και δύο μελετών περίπτωσης. Αρχικά, πραγματοποιείται ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την κβαντική υπολογιστική, την ψηφιακή καινοτομία, τη digital entrepreneurship και τις εφαρμογές των κβαντικών τεχνολογιών στα logistics και την εφοδιαστική αλυσίδα (Nambisan, 2017; Kaur & Singh, 2023; Phillipson, 2024). Η ανασκόπηση εστιάζει σε πρόσφατες δημοσιεύσεις, κυρίως από το 2018 και μετά, καθώς και σε κλασικές αναφορές που θεωρούνται θεμελιώδεις για το πεδίο.

Πιο αναλυτικά, η αναζήτηση βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε κυρίως στις βάσεις δεδομένων Scopus, Google Scholar και IEEE Xplore, με συμπληρωματικές αναζητήσεις σε εξειδικευμένες πηγές όπως arXiv (για preprints κβαντικής πληροφορικής) και τα αποθετήρια διεθνών οργανισμών (OECD iLibrary, European Commission CORDIS). Τα βασικά κλειδιά αναζήτησης (keywords) περιλάμβαναν συνδυασμούς όρων όπως: «quantum computing» AND «logistics», «quantum optimization» AND «vehicle routing», «quantum startup ecosystem», «digital entrepreneurship» AND «deep tech», καθώς και «quantum-inspired» AND «supply chain». Οι αναζητήσεις πραγματοποιήθηκαν στα αγγλικά, δεδομένου ότι η συντριπτική πλειονότητα της σχετικής βιβλιογραφίας δημοσιεύεται σε αυτή τη γλώσσα.

Ως κριτήρια ένταξης (inclusion criteria) ορίστηκαν: η δημοσίευση σε αγγλική ή ελληνική γλώσσα, η χρονική περίοδος 2015–2025 (με εξαίρεση θεμελιώδη έργα όπως τα Nielsen & Chuang, 2010, Preskill, 2018 και Teese, 2010, τα οποία κρίθηκαν απαραίτητα ανεξαρτήτως χρονολογίας), η άμεση σχέση με κβαντική υπολογιστική, ψηφιακή καινοτομία ή εφαρμογές σε logistics, και η δημοσίευση σε ακαδημαϊκά περιοδικά ή αξιόπιστες βιομηχανικές εκθέσεις (reports) αναγνωρισμένων οργανισμών (IBM, McKinsey, OECD). αποκλείστηκαν (exclusion criteria) δημοσιεύσεις αμιγώς τεχνικού χαρακτήρα χωρίς επιχειρηματική ή εφαρμοσμένη διάσταση, αδημοσίευτα κείμενα εργασίας χωρίς αξιολόγηση, καθώς και εμπορικά κείμενα προώθησης προϊόντων χωρίς αναλυτική τεκμηρίωση. Από μια αρχική δεξαμενή περίπου 180 πηγών, η εφαρμογή των κριτηρίων οδήγησε σε τελικό σύνολο περίπου 65 βασικών αναφορών, οι οποίες αποτελούν τον κορμό της βιβλιογραφίας.

Όσον αφορά τις μελέτες περίπτωσης, η επιλογή εφαρμογών υβριδικής κβαντο-κλασικής βελτιστοποίησης σε last-mile logistics και δρομολόγηση στόλου δεν ήταν τυχαία. Ο κυριότερος λόγος είναι πρακτικός: πρόκειται για μία από τις ελάχιστες τεκμηριωμένες περιπτώσεις στη δημοσιευμένη βιβλιογραφία όπου παρέχονται αρκετά λεπτομερή στοιχεία, τόσο για τη μοντελοποίηση του προβλήματος (CVRPTW με ρητούς περιορισμούς) όσο και για την αρχιτεκτονική της λύσης και τα αποτελέσματα, ώστε να είναι δυνατή η ουσιαστική ανάλυση. Πολλές άλλες αναφερόμενες εφαρμογές κβαντικών τεχνικών σε logistics παρέχουν μόνο γενικές περιγραφές ή μη επαληθεύσιμα

αριθμητικά στοιχεία. Ένα ακόμη στοιχείο είναι ότι η εφαρμογή αυτή αφορά πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, δηλαδή μια κατηγορία που βρίσκεται στον πυρήνα των logistics και αποτελεί κλασικό NP-hard πρόβλημα, πράγμα που την κάνει εξαιρετικά κατάλληλη για τη διερεύνηση των ερευνητικών ερωτημάτων της παρούσας εργασίας.

Η μεθοδολογική προσέγγιση έχει εσωτερικούς περιορισμούς. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση δεν ακολουθεί αυστηρό πρωτόκολλο συστηματικής ανασκόπησης (systematic review) με προκαθορισμένο PRISMA flow, αλλά υιοθετεί μια αφηγηματική προσέγγιση (narrative review), η οποία κρίθηκε πιο κατάλληλη για ένα πεδίο που εξελίσσεται ταχύτατα και στο οποίο μέρος της γνώσης βρίσκεται σε industry reports και όχι μόνο σε peer-reviewed δημοσιεύσεις. Και οι δύο μελέτες περίπτωσης βασίζονται σε δευτερογενή δεδομένα (δημοσιευμένες αναφορές, εκ των οποίων η δεύτερη είναι peer-reviewed δημοσίευση στο Scientific Reports), κάτι που περιορίζει το βάθος ανάλυσης αλλά ενισχύει την αξιοπιστία μέσω μεθοδολογικής τριγωνποίησης.

Στη συνέχεια, επιλέγονται δύο αντιπροσωπευτικά cases από τον χώρο των logistics, στα οποία έχει εφαρμοστεί κβαντική ή quantum-inspired τεχνική βελτιστοποίησης σε πραγματικό επιχειρησιακό πρόβλημα, όπως η δρομολόγηση οχημάτων, ο σχεδιασμός δικτύου ή η φόρτωση φορτίων (NEC Corporation, 2019; Quantum Economic Development Consortium, 2025). Κάθε μελέτη περίπτωσης δομείται σύμφωνα με την κλασική λογική των case studies στη διοίκηση: περιγραφή του οργανισμού και του πλαισίου, διατύπωση του προβλήματος, περιγραφή της εφαρμοζόμενης λύσης, παρουσίαση αποτελεσμάτων και συζήτηση των επιπτώσεων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, επιχειρείται η σύνδεση των εμπειρικών ευρημάτων με τα θεωρητικά πλαίσια και τα ερευνητικά ερωτήματα που διατυπώθηκαν προηγουμένως.

Δομή της εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε επτά κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες και τεχνολογίες των κβαντικών υπολογιστών, με σκοπό να δοθεί στον αναγνώστη ένα σαφές αλλά προσιτό τεχνολογικό υπόβαθρο. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται οι έννοιες της ψηφιακής καινοτομίας, της ψηφιακής επιχειρηματικότητας και της deep-tech επιχειρηματικότητας, και παρουσιάζονται τα βασικά θεωρητικά μοντέλα επιχειρηματικότητας και επιχειρηματικών μοντέλων (Nambisan, 2017; Giones & Brem, 2017; Teece, 2010).

Το Κεφάλαιο 3 εστιάζει στο παγκόσμιο οικοσύστημα κβαντικών τεχνολογιών και startups, παρουσιάζοντας κατηγοριοποιήσεις εταιρειών, επενδυτικές τάσεις και γεωγραφικά clusters, με βάση πρόσφατες μελέτες και reports (Seskir et al., 2022; OECD, 2025; ECIPE, 2025). Στο Κεφάλαιο 4 εξετάζονται τα επιχειρηματικά μοντέλα και οι στρατηγικές υιοθέτησης κβαντικών τεχνολογιών από νεοφυείς και υφιστάμενες επιχειρήσεις, με έμφαση στη δημιουργία αξίας, τις πλατφορμικές προσεγγίσεις και τις συνεργασίες με μεγάλους παρόχους τεχνολογίας (Cambridge Institute for Manufacturing & Quantum Computing and Simulation Hub, 2023; Academy of Management, 2022).

Το Κεφάλαιο 5 αποτελεί τον πυρήνα της εμπειρικής ανάλυσης, καθώς παρουσιάζει αναλυτικά δύο μελέτες περίπτωσης εφαρμογής κβαντικής υπολογιστικής στον κλάδο των logistics (IBM last-mile delivery και Aisin Corporation/D-Wave), εστιάζοντας στη φύση των προβλημάτων, στις εφαρμοζόμενες λύσεις και στα αποτελέσματα (Phillipson, 2024; Quantum Economic Development Consortium, 2025). Στο Κεφάλαιο 6 συζητούνται τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και των μελετών περίπτωσης σε συνάρτηση με τα ερευνητικά ερωτήματα, φωτίζοντας τις επιπτώσεις για επιχειρήσεις, startups και οικοσυστήματα καινοτομίας. Τέλος, στο Κεφάλαιο 7 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας, παρουσιάζονται οι περιορισμοί της μελέτης και προτείνονται

κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα στον χώρο της κβαντικής υπολογιστικής, της καινοτομίας και της νεοφυούς επιχειρηματικότητας.

1.1 Ιστορική εξέλιξη της κβαντικής υπολογιστικής

Η κβαντική υπολογιστική δεν προέκυψε ξαφνικά, αλλά αποτελεί το αποτέλεσμα μιας μακράς πορείας εξέλιξης της κβαντικής φυσικής, της θεωρίας πληροφορίας και της επιστήμης υπολογιστών. Οι ρίζες της βρίσκονται στις αρχές του 20ού αιώνα, όταν η κβαντική μηχανική διαμορφώθηκε ως νέο θεωρητικό πλαίσιο για την κατανόηση της ύλης και της ενέργειας σε μικροσκοπικές κλίμακες. Η εισαγωγή εννοιών όπως η υπέρθεση, η κβάντωση και η απροσδιοριστία αμφισβήτησε την κλασική, ντετερμινιστική θεώρηση του φυσικού κόσμου και άνοιξε τον δρόμο για νέους τρόπους επεξεργασίας πληροφορίας (Nielsen & Chuang, 2010; Preskill, 2018).

Παρότι η κβαντική θεωρία διαμορφώθηκε ήδη από τις δεκαετίες του 1920 και 1930, η ιδέα ότι οι κβαντικοί νόμοι θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για υπολογιστικούς σκοπούς εμφανίστηκε πολύ αργότερα. Στη δεκαετία του 1970, ο Feynman και άλλοι φυσικοί τόνισαν ότι η προσομοίωση κβαντικών συστημάτων με κλασικούς υπολογιστές είναι πολύ απαιτητική και πρότειναν ότι ένας υπολογιστής βασισμένος σε κβαντικούς νόμους θα μπορούσε να το κάνει πιο φυσικά και αποτελεσματικά (Nielsen & Chuang, 2010). Αυτή η παρατήρηση θεωρείται συχνά ως ένα από τα πρώτα σπέρματα της κβαντικής υπολογιστικής, καθώς εισήγαγε την ιδέα ενός «κβαντικού υπολογιστή» ως μηχανής που χρησιμοποιεί άμεσα κβαντικά φαινόμενα.

Η συστηματική διαμόρφωση της κβαντικής υπολογιστικής ως ξεχωριστού πεδίου άρχισε στη δεκαετία του 1980. Ο Deutsch (1985) εισήγαγε την έννοια της κβαντικής καθολικής μηχανής Turing και έδειξε ότι μπορεί να οριστεί μια γενική έννοια κβαντικού υπολογιστή, ανάλογη με τον κλασικό, αλλά βασισμένη σε κβαντικές καταστάσεις και πράξεις. Στα επόμενα χρόνια αναπτύχθηκαν τα πρώτα κβαντικά πρωτόκολλα και αλγόριθμοι, όπως ο κβαντικός αλγόριθμος αναζήτησης του Grover και κυρίως ο αλγόριθμος παραγοντοποίησης του Shor, που δημοσιεύτηκε το 1994 και έδειξε ότι ένας κβαντικός υπολογιστής θα μπορούσε να επιλύσει αποτελεσματικά προβλήματα τα οποία θεωρούνται δύσκολα για κλασικούς υπολογιστές (Shor, 1994; Montanaro, 2016).

Ο αλγόριθμος του Shor είχε ιδιαίτερη επίδραση, καθώς ανέδειξε ότι η κβαντική υπολογιστική δεν είναι απλώς μια δυσνόητη θεωρητική κατασκευή, αλλά μπορεί να έχει βαθιές πρακτικές συνέπειες, όπως για παράδειγμα στην κρυπτογραφία δημοσίου κλειδιού (Nielsen & Chuang, 2010). Ομοίως, ο αλγόριθμος του Grover έδειξε ότι ακόμη και σε μη δομημένα προβλήματα αναζήτησης η κβαντική υπολογιστική μπορεί να προσφέρει επιταχύνσεις σε σχέση με τις κλασικές μεθόδους (Montanaro, 2016). Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990, είχε πλέον διαμορφωθεί ένα θεωρητικό υπόβαθρο κβαντικών αλγορίθμων και πρωτοκόλλων, συμπεριλαμβανομένων και εφαρμογών σε κβαντική κρυπτογραφία και κβαντική τηλεμεταφορά (Nielsen & Chuang, 2010).

Σε επίπεδο υλοποίησης, η πρώτη περίοδος (τέλη 1990-αρχές 2000) χαρακτηρίστηκε από μικρής κλίμακας πειραματικά συστήματα, συνήθως με λίγα qubits, βασισμένα σε διαφορετικές φυσικές πλατφόρμες, όπως παγιδευμένα ιόντα, υπεραγώγιμα κυκλώματα, πυρηνικό μαγνητικό συντονισμό (NMR) και φωτονικές διατάξεις (Preskill, 2018). Τα πειραματικά αυτά αποτελέσματα ήταν καθοριστικά για την επιβεβαίωση ότι οι βασικές κβαντικές πράξεις μπορούν να υλοποιηθούν στην πράξη, αλλά η κλίμακα ήταν πολύ περιορισμένη για να υπάρξει πρακτικό όφελος.

Η επόμενη φάση, από τα μέσα της δεκαετίας του 2000 μέχρι και τη δεκαετία του 2010, χαρακτηρίστηκε από σταδιακή αύξηση της κλίμακας και της σταθερότητας των κβαντικών συστημάτων, καθώς και από την είσοδο μεγαλύτερων βιομηχανικών και ερευνητικών οργανισμών στο πεδίο. Εταιρείες όπως η IBM, η Google, η Microsoft και νεοφυείς επιχειρήσεις όπως η D-Wave άρχισαν να επενδύουν συστηματικά στην ανάπτυξη κβαντικών επεξεργαστών, υποστηρίζοντας διαφορετικές τεχνολογικές προσεγγίσεις (Gill & Buyya, 2024). Η D-Wave, για παράδειγμα, προώθησε

από νωρίς συστήματα κβαντικής ανόπτησης (quantum annealing) εστιάζοντας σε προβλήματα βελτιστοποίησης, ενώ άλλοι παίκτες επικεντρώθηκαν σε gate-based αρχιτεκτονικές γενικού σκοπού (Preskill, 2018).

Ουσιώδες ορόσημο αποτέλεσε το 2019, όταν η Google ανακοίνωσε ότι πέτυχε αυτό που ονόμασε ως «κβαντική υπεροχή» (quantum supremacy), δηλαδή την εκτέλεση μιας συγκεκριμένης υπολογιστικής εργασίας σε κβαντικό επεξεργαστή σε χρόνο μικρότερο από τον καλύτερο γνωστό κλασικό αλγόριθμο (Arute et al., 2019). Αν και το παράδειγμα αυτό δεν είχε άμεση πρακτική αξία για επιχειρησιακές εφαρμογές, αποτέλεσε συμβολικό σημείο καμπής, δείχνοντας ότι είναι πλέον τεχνικά εφικτή η υλοποίηση κβαντικών υπολογιστών που ξεπερνούν τα κλασικά συστήματα σε συγκεκριμένες εργασίες.

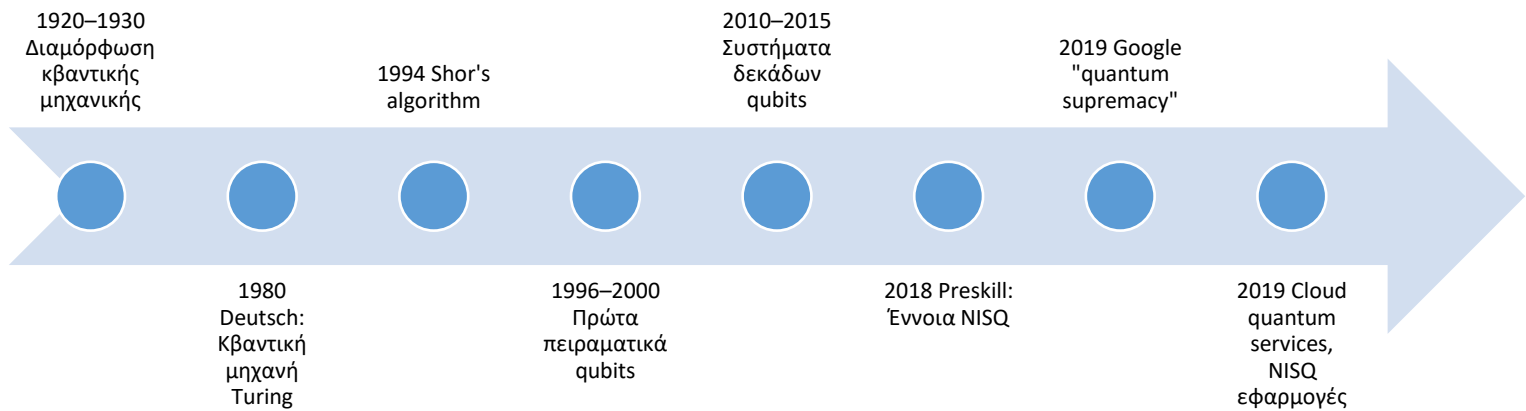
Στη δεκαετία του 2020, ο όρος NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) χρησιμοποιείται για να περιγράψει την τρέχουσα εποχή της κβαντικής υπολογιστικής, στην οποία διαθέτουμε συστήματα με δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες qubits, αλλά με σημαντικό θόρυβο και περιορισμένο χρόνο συνοχής (Preskill, 2018). Σε αυτή τη φάση, η έρευνα και η βιομηχανική δραστηριότητα επικεντρώνονται σε υβριδικές προσεγγίσεις, όπου κλασικοί και κβαντικοί πόροι συνδυάζονται, καθώς και στην αναζήτηση πρακτικών «ενδιάμεσων» use cases, προτού επιτευχθούν πλήρως ανθεκτικοί σε σφάλματα κβαντικοί υπολογιστές (Gill & Buyya, 2024; McKinsey & Company, 2024).

Παράλληλα με την τεχνολογική εξέλιξη, διαμορφώνεται και ένα ολοένα πιο ώριμο οικοσύστημα γύρω από την κβαντική υπολογιστική. Τα τελευταία χρόνια, πλήθος κυβερνήσεων έχουν ανακοινώσει εθνικές στρατηγικές και προγράμματα χρηματοδότησης για κβαντικές τεχνολογίες, δημιουργώντας clusters και ερευνητικά κέντρα σε Ευρώπη, Αμερική και Ασία (OECD, 2025; Quantum Flagship, 2025). Στον ιδιωτικό τομέα, η αύξηση των επενδύσεων σε κβαντικά startups είναι εντυπωσιακή, με σημαντική παρουσία venture capital και corporate venture arms από μεγάλες τεχνολογικές εταιρείες (McKinsey & Company, 2025; Spinquanta, 2025).

Σε επιχειρηματικό επίπεδο, ένα ακόμη ορόσημο στην ιστορική εξέλιξη είναι η εμφάνιση cloud-based κβαντικών υπηρεσιών, μέσω των οποίων επιχειρήσεις και ερευνητές μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση σε κβαντικούς επεξεργαστές χωρίς να επενδύσουν σε εξειδικευμένο hardware (Gill & Buyya, 2024). Πλατφόρμες όπως το IBM Quantum, το AWS Braket και το Azure Quantum προσφέρουν περιβάλλοντα στα οποία μπορούν να αναπτυχθούν και να δοκιμαστούν κβαντικοί αλγόριθμοι, ανοίγοντας τον δρόμο για πειραματισμό σε επιχειρησιακά σενάρια, συμπεριλαμβανομένων των logistics και της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η ιστορική εξέλιξη της κβαντικής υπολογιστικής, από την κβαντική θεωρία στις αρχές του 20ού αιώνα μέχρι τα σημερινά NISQ συστήματα και τις πρώτες εμπορικές εφαρμογές, δείχνει μια σταδιακή μετάβαση από καθαρά θεωρητικές συζητήσεις σε πρακτικούς πειραματισμούς και πιλοτικά έργα. Αυτή η πορεία είναι βασική για την παρούσα εργασία, καθώς βοηθά να κατανοηθεί ότι η κβαντική υπολογιστική βρίσκεται ακόμη σε μεταβατικό στάδιο: αρκετά ώριμη ώστε να επιτρέπει συγκεκριμένα πειραματικά use cases, αλλά όχι ακόμη τόσο ανεπτυγμένη ώστε να αντικαταστήσει εκτεταμένα τις κλασικές υποδομές (Preskill, 2018; McKinsey & Company, 2024). Αυτό το «ενδιάμεσο» στάδιο δημιουργεί προκλήσεις και ευκαιρίες για καινοτομία και νεοφυή επιχειρηματικότητα, ιδίως σε κλάδους όπως τα logistics, όπου τα προβλήματα που πρέπει να επιλυθούν είναι πολύ απαιτητικά και η πιθανή αξία από βελτιώσεις αποδοτικότητας μεγάλη.

Η εξέλιξη αυτή συνοψίζεται ενδεικτικά στο Σχήμα 1, όπου φαίνονται οι κύριοι σταθμοί από τη θεωρητική διαμόρφωση μέχρι τις σύγχρονες NISQ εφαρμογές



Σχήμα 1 Ενδεικτική χρονογραμμή βασικών σταθμών στην εξέλιξη της κβαντικής υπολογιστικής, από τη διαμόρφωση της κβαντικής θεωρίας έως την εποχή NISQ και τις πρώτες εμπορικές εφαρμογές (Πηγή: Nielsen & Chuang, 2010; Preskill, 2018; Seskir et al., 2024).

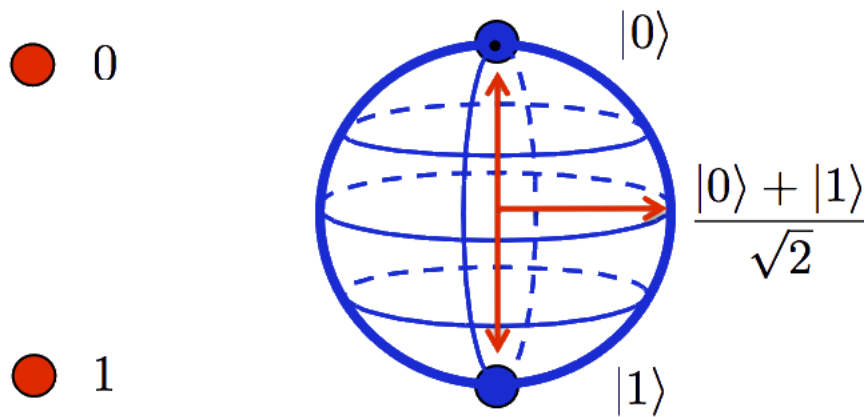
1.2 Βασικές αρχές κβαντικής υπολογιστικής

Η κατανόηση της κβαντικής υπολογιστικής προϋποθέτει τη γνωριμία με ορισμένες θεμελιώδεις έννοιες της κβαντικής μηχανικής, οι οποίες διαφοροποιούν ριζικά τους κβαντικούς υπολογιστές από τα κλασικά συστήματα. Οι σημαντικότερες από αυτές, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, είναι το qubit ως μονάδα πληροφορίας, η υπέρθεση (superposition), η διεμπλοκή (entanglement), οι κβαντικές πύλες και κυκλώματα, καθώς και η έννοια της NISQ εποχής (Noisy Intermediate-Scale Quantum). Οι έννοιες αυτές δεν εξετάζονται εδώ σε μαθηματικό βάθος, αλλά σε βαθμό που επιτρέπει την κατανόηση των επιχειρησιακών εφαρμογών και των περιορισμών τους (Nielsen & Chuang, 2010; Preskill, 2018).

1.2.1 Κλασικά bits και κβαντικά qubits

Στα κλασικά πληροφοριακά συστήματα, η μονάδα πληροφορίας είναι το bit, το οποίο μπορεί να λάβει μία από δύο διακριτές καταστάσεις, συμβολικά 0 ή 1. Όλη η επεξεργασία πληροφορίας, από τα απλά λογικά κυκλώματα μέχρι τα σύγχρονα δίκτυα, βασίζεται σε συνδυασμούς και μετασχηματισμούς αυτών των δυαδικών καταστάσεων. Αντίθετα, σε έναν κβαντικό υπολογιστή, η βασική μονάδα είναι το qubit (quantum bit), το οποίο μπορεί μεν να μετρηθεί ως 0 ή 1, αλλά πριν τη μέτρηση μπορεί να βρίσκεται σε μια κβαντική κατάσταση που είναι «συνδυασμός» των δύο (Nielsen & Chuang, 2010).

Τυπικά, η κατάσταση ενός qubit περιγράφεται ως γραμμικός συνδυασμός των καταστάσεων $|0\rangle$ και $|1\rangle$, με κατάλληλους συντελεστές (αποκαλούμενους πλάτη πιθανότητας). Αν και η μαθηματική διατύπωση δεν είναι αναγκαίο να αναλυθεί εδώ, η ιδέα είναι ότι το qubit μπορεί να συμπεριφέρεται σαν να «βρίσκεται» και στις δύο καταστάσεις ταυτόχρονα, μέχρι τη στιγμή της μέτρησης. Αυτή η ιδιότητα αποτελεί τον πυρήνα της κβαντικής υπέρθεσης (Preskill, 2018).



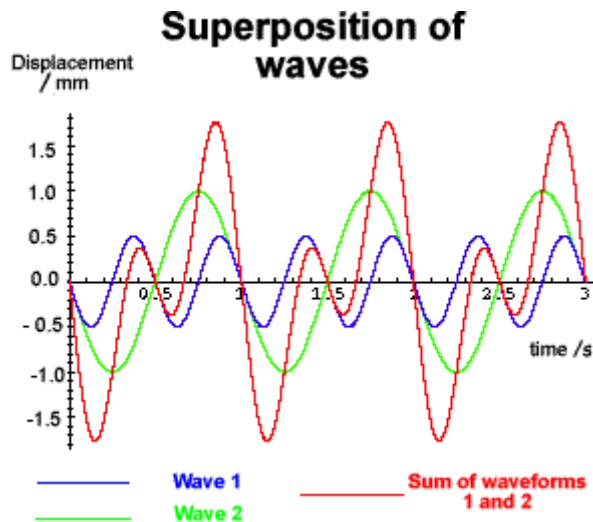
Σχήμα 2 Σχηματική απεικόνιση της διαφοράς μεταξύ κλασικού bit (διακριτές καταστάσεις 0 και 1) και qubit, το οποίο μπορεί να βρίσκεται σε υπέρθεση των δύο καταστάσεων έως τη στιγμή της μέτρησης. Hussain, Zahid. (2016). *Strengths and Weaknesses of Quantum Computing*. *International Journal of Scientific and Engineering Research*. 7.

Η διαφορά αυτή απεικονίζεται σχηματικά στο Σχήμα 2, όπου φαίνεται ότι το qubit μπορεί να βρίσκεται σε υπέρθεση των δύο βασικών καταστάσεων, ενώ το κλασικό bit παραμένει πάντα σε μία από τις δύο.

1.2.2 Υπέρθεση (superposition)

Η υπέρθεση είναι ένα από τα πιο χαρακτηριστικά και αντιδιασθητικά χαρακτηριστικά της κβαντικής υπολογιστικής. Ενώ ένα κλασικό bit βρίσκεται είτε στην κατάσταση 0 είτε στην κατάσταση 1, ένα qubit μπορεί να βρίσκεται σε μια υπέρθεση των δύο, δηλαδή σε κατάσταση όπου η μέτρηση μπορεί να δώσει 0 με κάποια πιθανότητα και 1 με κάποια άλλη (Nielsen & Chuang, 2010). Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι ένα σύστημα από n qubits μπορεί να αναπαριστά ταυτόχρονα, σε επίπεδο κβαντικής κατάστασης, 2^n διαφορετικούς συνδυασμούς 0 και 1, ενώ ένα κλασικό σύστημα n bits μπορεί να βρίσκεται σε έναν μόνο συνδυασμό κάθε φορά.

Η υπέρθεση δεν σημαίνει ότι ο υπολογιστής «δοκιμάζει όλες τις λύσεις ταυτόχρονα» με την κλασική έννοια, αλλά ότι η κβαντική κατάσταση κωδικοποιεί πληροφορία με τρόπο που επιτρέπει, υπό προϋποθέσεις, την εκμετάλλευση παρεμβολών (interference) ώστε να ενισχυθούν επιθυμητά αποτελέσματα και να αποδυναμωθούν ανεπιθύμητα (Montanaro, 2016). Αυτός είναι και ο λόγος που οι κβαντικοί αλγόριθμοι συχνά περιγράφονται ως «σχεδιασμένοι γύρω από την εκμετάλλευση της υπέρθεσης και της παρεμβολής» (Preskill, 2018).



Σχήμα 3 Κυματική απεικόνιση υπέρθεσης (Πηγή: www.cyberphysics.co.uk)

Για τις επιχειρησιακές εφαρμογές, η υπέρθεση έχει σημασία διότι επιτρέπει στα κβαντικά συστήματα να κλιμακώνονται διαφορετικά σε προβλήματα όπου το πλήθος των πιθανών λύσεων αυξάνεται εκθετικά. Σε προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως αυτά που συναντώνται στα logistics, η δυνατότητα χειρισμού μεγάλων χώρων λύσεων με κβαντικό τρόπο μπορεί, θεωρητικά, να προσφέρει αισθητά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με κλασικές εξαντλητικές ή ημι-εξαντλητικές αναζητήσεις (Phillipson, 2024).

1.2.3 Διεμπλοκή (entanglement)

Η διεμπλοκή είναι μια δεύτερη θεμελιώδης έννοια, στενά συνδεδεμένη με την ισχύ των κβαντικών υπολογιστών. Όταν δύο ή περισσότερα qubits είναι διεμπλεγμένα, η κατάσταση του ενός δεν μπορεί να περιγραφεί ανεξάρτητα από την κατάσταση των άλλων, ακόμη και αν βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους (Nielsen & Chuang, 2010). Πρακτικά, η μέτρηση ενός qubit επηρεάζει άμεσα την κατάσταση του άλλου, με τρόπο που δημιουργεί ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ τους.

Σε αντίθεση με τα κλασικά συστήματα, όπου οι συσχετίσεις προκύπτουν από κοινούς παράγοντες ή κοινή ιστορία, η κβαντική διεμπλοκή αποτελεί καθαρά κβαντικό φαινόμενο. Η αξιοποίησή της σε κβαντικούς υπολογιστές επιτρέπει την αναπαράσταση και επεξεργασία πολύπλοκων συσχετίσεων μεταξύ μεταβλητών με τρόπο που δεν είναι εύκολα αναπαραστάσιμος σε κλασικά συστήματα (Biamonte et al., 2017). Η διεμπλοκή, λοιπόν, λειτουργεί ως «πόρος» που μπορεί να ενισχύσει την υπολογιστική ισχύ κβαντικών αλγορίθμων, ιδίως όταν συνδυάζεται με υπέρθεση.

Στο πλαίσιο των εφαρμογών βελτιστοποίησης, η διεμπλοκή επιτρέπει σε ένα σύστημα qubits να «συλλαμβάνει» αλληλεξαρτήσεις μεταξύ αποφάσεων ή μεταβλητών, όπως συμβαίνει σε προβλήματα δρομολόγησης, κατανομής πόρων και σχεδιασμού δικτύων στα logistics. Παρότι η πρακτική εκμετάλλευση της διεμπλοκής σε μεγάλης κλίμακας συστήματα είναι ακόμη ερευνητικό ζητούμενο, αποτελεί στοιχείο των θεωρητικών πλεονεκτημάτων που αποδίδονται στην κβαντική υπολογιστική (Biamonte et al., 2017; Preskill, 2018).

1.2.4 Κβαντικές πύλες και κβαντικά κυκλώματα

Όπως τα κλασικά κυκλώματα αποτελούνται από λογικές πύλες που μετατρέπουν εισόδους σε εξόδους (π.χ. AND, OR, NOT), έτσι και οι κβαντικοί υπολογιστές λειτουργούν με κβαντικές πύλες, οι οποίες είναι μαθηματικά περιγραφόμενες ως μοναδιαίοι μετασχηματισμοί πάνω σε qubits (Nielsen & Chuang, 2010). Οι κβαντικές πύλες εφαρμόζονται σε ένα ή περισσότερα qubits και μπορούν να

αλλάζουν την κατάσταση τους, να δημιουργούν υπέρθεση, να εισάγουν φάση ή να δημιουργούν διεμπλοκή μεταξύ qubits.

Βασικά παραδείγματα κβαντικών πυλών περιλαμβάνουν την πύλη Hadamard, η οποία μετατρέπει ένα κλασικό bit σε υπέρθεση, τις πύλες Pauli (X, Y, Z), που παίζουν ρόλο αντίστοιχο με το κλασικό NOT και άλλους απλούς μετασχηματισμούς, καθώς και την πύλη CNOT (Controlled-NOT), η οποία δρα σε δύο qubits και μπορεί να δημιουργήσει διεμπλοκή (Nielsen & Chuang, 2010). Συνδυάζοντας τέτοιες πύλες, κατασκευάζονται κβαντικά κυκλώματα που υλοποιούν πιο σύνθετους αλγορίθμους.

Σε επίπεδο σχεδιασμού αλγορίθμων, η πρόκληση έγκειται στη σύνθεση κυκλωμάτων που επιτυγχάνουν το επιθυμητό αποτέλεσμα με όσο το δυνατόν λιγότερες πύλες και σε όσο το δυνατόν λιγότερο βάθος (δηλαδή αριθμό διαδοχικών επιπέδων), ώστε να μειώνεται η επίδραση του θορύβου και των σφαλμάτων (Montanaro, 2016). Αυτό είναι ιδιαίτερα αναγκαίο στην τρέχουσα εποχή NISQ, όπου οι υποδομές είναι ακόμη περιορισμένες σε μέγεθος και αξιοπιστία.

1.2.5 Μέτρηση, θόρυβος και decoherence

Μια ακόμη διάσταση της κβαντικής υπολογιστικής είναι η μέτρηση της κβαντικής κατάστασης. Όταν μετράμε ένα qubit, η κβαντική του κατάσταση «καταρρέει» σε μία από τις βασικές καταστάσεις, 0 ή 1, με πιθανότητες που καθορίζονται από τις πλάτες πιθανότητας της υπέρθεσης (Preskill, 2018). Κατά συνέπεια, οι κβαντικοί αλγόριθμοι πρέπει να είναι σχεδιασμένοι ώστε, στο τέλος της διαδικασίας, η πιθανότητα να μετρηθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη.

Ομοίως, τα κβαντικά συστήματα είναι πολύ ευαίσθητα στο περιβάλλον: αλληλεπιδράσεις με το εξωτερικό περιβάλλον, θερμικός θόρυβος, ηλεκτρομαγνητικοί παράγοντες και τεχνικές ατέλειες οδηγούν σε απώλεια της κβαντικής συνοχής (decoherence) και σε σφάλματα στους υπολογισμούς (Preskill, 2018). Αυτός ο θόρυβος περιορίζει τον χρόνο κατά τον οποίο ένα κβαντικό σύστημα μπορεί να εκτελεί αξιόπιστους υπολογισμούς, καθώς και το μέγεθος των κυκλωμάτων που μπορούν να υλοποιηθούν πριν τα σφάλματα γίνουν κυρίαρχα.

Για τις επιχειρησιακές εφαρμογές, η ύπαρξη θορύβου και decoherence σημαίνει ότι οι τρέχοντες κβαντικοί υπολογιστές δεν μπορούν να εκτελούν αυθαίρετα πολύπλοκους αλγορίθμους, αλλά απαιτούνται ειδικά σχεδιασμένες προσεγγίσεις που λαμβάνουν υπόψη αυτούς τους περιορισμούς. Αυτό οδηγεί στη διαμόρφωση της έννοιας της NISQ εποχής.

1.2.6 Η NISQ εποχή (Noisy Intermediate-Scale Quantum)

Ο όρος NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) εισήχθη από τον Preskill (2018) για να περιγράψει την τρέχουσα φάση ανάπτυξης της κβαντικής υπολογιστικής. Χαρακτηριστικά αυτής της εποχής είναι η ύπαρξη κβαντικών συστημάτων με δεκάδες έως λίγες εκατοντάδες qubits, τα οποία όμως είναι θορυβώδη, με περιορισμένο χρόνο συνοχής και χωρίς πλήρη δυνατότητα διόρθωσης σφαλμάτων (Preskill, 2018). Τα συστήματα αυτά είναι αρκετά ισχυρά ώστε να επιτρέπουν την εκτέλεση πειραματικών αλγορίθμων και να προσφέρουν ενδεχομένως πλεονεκτήματα σε επιλεγμένα προβλήματα, αλλά δεν είναι ακόμη σε θέση να υποστηρίξουν μεγάλους, πλήρως ανθεκτικούς σε σφάλματα κβαντικούς υπολογισμούς.

Στο πλαίσιο της NISQ εποχής, αναπτύχθηκαν υβριδικοί κβαντο-κλασικοί αλγόριθμοι, όπως ο Variational Quantum Eigensolver (VQE) και ο Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA), οι οποίοι συνδυάζουν κβαντικά κυκλώματα μικρού βάθους με κλασικούς βελτιστοποιητές (Gill & Buyya, 2024; Preskill, 2018). Αυτές οι προσεγγίσεις θεωρούνται εξαιρετικά υποσχόμενες για εφαρμογές σε βελτιστοποίηση, χημεία και μηχανική μάθηση, καθώς προσπαθούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα των κβαντικών συστημάτων, περιορίζοντας τον αντίκτυπο του θορύβου.

Για κλάδους όπως τα logistics, η NISQ εποχή δημιουργεί ένα ενδιαφέρον πλαίσιο: από τη μία πλευρά, οι περιορισμοί των σημερινών συστημάτων σημαίνουν ότι μεγάλης κλίμακας, πλήρως βελτιστοποιημένες λύσεις απέχουν ακόμη από την ευρεία υλοποίηση· από την άλλη, οι υβριδικές προσεγγίσεις επιτρέπουν πιλοτικά έργα που μπορούν να προσφέρουν βελτιώσεις σε συγκεκριμένα υποπροβλήματα, όπως δρομολόγηση οχημάτων ή ενεργή ανάθεση πόρων (Phillipson, 2024; Quantum Economic Development Consortium, 2025). Αυτό το μεταβατικό στάδιο είναι σημαντικό από επιχειρηματική άποψη, καθώς ανοίγει χώρο για νεοφυείς εταιρείες που πειραματίζονται με NISQ-συμβατές λύσεις και χτίζουν τεχνογνωσία και προϊόντα ενόψει μιας μελλοντικής, πιο ώριμης φάσης της τεχνολογίας (McKinsey & Company, 2024; Spinqunta, 2025).

Οι θεμελιακές αρχές της κβαντικής υπολογιστικής (qubits, υπέρθεση, διεμπλοκή, κβαντικές πύλες και η NISQ πραγματικότητα) συνιστούν το τεχνολογικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα στηριχθεί η ανάλυση των επιχειρησιακών εφαρμογών και της νεοφυούς επιχειρηματικότητας στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

Για λόγους σαφήνειας, στον Πίνακα 1 συνοψίζονται οι βασικές έννοιες της κβαντικής υπολογιστικής που εκμεταλλεύονται στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

Όρος	Σύντομος ορισμός	Σημασία για επιχειρησιακές εφαρμογές
Qubit	Βασική μονάδα κβαντικής πληροφορίας, μπορεί να βρίσκεται σε υπέρθεση των καταστάσεων 0 και 1.	Επιτρέπει την αναπαράσταση και επεξεργασία πολύ μεγάλων χώρων λύσεων ταυτόχρονα.
Υπέρθεση (superposition)	Η ικανότητα ενός qubit να βρίσκεται σε συνδυασμό πολλών καταστάσεων μέχρι τη μέτρηση.	Βασικός μηχανισμός για παράλληλη διερεύνηση πολλαπλών λύσεων σε προβλήματα βελτιστοποίησης.
Διεμπλοκή (entanglement)	Κβαντική συσχέτιση μεταξύ qubits, όπου η κατάσταση του ενός επηρεάζει άμεσα την κατάσταση του άλλου.	Επιτρέπει την αναπαράσταση πολύπλοκων αλληλεξαρτήσεων μεταξύ μεταβλητών (π.χ. δρομολόγηση, κατανομή πόρων).
Κβαντική πύλη (quantum gate)	Βασική πράξη που μετασχηματίζει την κατάσταση ενός ή περισσότερων qubits.	Οι κβαντικές πύλες συνθέτουν τα κβαντικά κυκλώματα που υλοποιούν αλγόριθμους βελτιστοποίησης.
Κβαντικό κύκλωμα	Ακολουθία κβαντικών πυλών που εκτελεί μια συγκεκριμένη υπολογιστική διαδικασία.	Οι αλγόριθμοι logistics (routing, scheduling) υλοποιούνται ως κβαντικά κυκλώματα.
NISQ εποχή	Φάση ανάπτυξης με θορυβώδη συστήματα μέτριας κλίμακας (50–1000 qubits), χωρίς πλήρη διόρθωση σφαλμάτων.	Καθορίζει τους τρέχοντες τεχνολογικούς περιορισμούς και κατευθύνει τις εφαρμόσιμες προσεγγίσεις (υβριδικοί αλγόριθμοι).

Πίνακας 1 Συνοπτική παρουσίαση βασικών εννοιών κβαντικής υπολογιστικής που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία.

1.3 Τύποι κβαντικών υπολογιστών και σχετικές προσεγγίσεις

Η κβαντική υπολογιστική δεν υλοποιείται με έναν μόνο τρόπο, αλλά μέσω διαφορετικών τεχνολογικών και υπολογιστικών προσεγγίσεων, κάθε μία από τις οποίες έχει τα δικά της πλεονεκτήματα, περιορισμούς και τυπικές εφαρμογές (Nielsen & Chuang, 2010; Preskill, 2018). Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα gate-based (κυκλωματικά) συστήματα, οι κβαντικοί ανιχνευτές (quantum annealers), τα αναλογικά κβαντικά συστήματα και οι λεγόμενες quantum-inspired μέθοδοι, καθώς συνδέονται άμεσα με προβλήματα βελτιστοποίησης όπως αυτά που εμφανίζονται στα logistics (D-Wave Systems Inc., 2023; Lenahan, 2023).

1.3.1 Gate-based (κυκλωματικά) κβαντικά συστήματα

Στα gate-based συστήματα, ο κβαντικός υπολογισμός περιγράφεται ως ακολουθία κβαντικών πυλών που εφαρμόζονται σε qubits, κατά ανάλογο τρόπο με τα λογικά κυκλώματα στα κλασικά συστήματα (Nielsen & Chuang, 2010). Τα qubits αρχικοποιούνται σε μια γνωστή κατάσταση και στη συνέχεια υφίστανται μια σειρά από ελεγχόμενους μετασχηματισμούς (όπως πύλες Hadamard, Pauli και CNOT), οι οποίοι σε συνδυασμό υλοποιούν τον εκάστοτε κβαντικό αλγόριθμο (Montanaro, 2016). Αυτή η προσέγγιση θεωρείται καθολική (universal), καθώς, θεωρητικά, οποιοσδήποτε κβαντικός υπολογισμός μπορεί να εκφραστεί ως κατάλληλη ακολουθία κβαντικών πυλών.

Τα gate-based συστήματα είναι η κύρια κατεύθυνση για γενικού σκοπού κβαντικούς υπολογιστές, στους οποίους μπορούν να εκτελεστούν αλγόριθμοι όπως ο Shor και ο Grover, καθώς και υβριδικοί variational αλγόριθμοι (π.χ. VQE, QAOA) για προβλήματα βελτιστοποίησης (Montanaro, 2016; Preskill, 2018). Ωστόσο, στην τρέχουσα NISQ εποχή, τα gate-based συστήματα είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα σε σφάλματα και θόρυβο, με αποτέλεσμα να περιορίζεται το μήκος και την πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων που μπορούν να υλοποιηθούν αξιόπιστα (Preskill, 2018). Παρά τις δυσκολίες, μεγάλες πλατφόρμες cloud προσφέρουν ήδη πρόσβαση σε τέτοιους επεξεργαστές, επιτρέποντας πειραματισμό με logistics use cases σε μικρότερη κλίμακα (IBM, 2024).

1.3.2 Quantum annealing

Ο κβαντικός ανιχνευτής (quantum annealer) ακολουθεί διαφορετικό υπολογιστικό μοντέλο, σχεδιασμένο πρωτίστως για προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης (Kadowaki & Nishimori, 1998; Albash & Lidar, 2018). Σε αυτή την προσέγγιση, το υπό εξέταση πρόβλημα κωδικοποιείται σε έναν Hamiltonian (συνάρτηση ενέργειας) και το κβαντικό σύστημα αρχικοποιείται σε μια απλή, γνωστή κατάσταση χαμηλής ενέργειας· στη συνέχεια, το σύστημα εξελίσσεται αργά προς τον Hamiltonian που ενσωματώνει το πρόβλημα, με σκοπό να βρεθεί η κατάσταση ελάχιστης ενέργειας, η οποία αντιστοιχεί σε βέλτιστη ή σχεδόν βέλτιστη λύση (Albash & Lidar, 2018). Η διαδικασία αυτή βασίζεται στο αδιαβατικό θεώρημα, σύμφωνα με το οποίο, αν η μεταβολή είναι αρκετά αργή, το σύστημα παραμένει στην κατάσταση ελάχιστης ενέργειας.

Quantum annealers, όπως τα συστήματα της D-Wave, έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς σε προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένης της δρομολόγησης οχημάτων, της διαχείρισης στόλων και της βελτιστοποίησης παραγωγής και logistics (Stollenwerk et al., 2023; D-Wave Systems Inc., 2023). Παραδείγματος χάρη, πρόσφατες μελέτες δείχνουν εφαρμογές quantum annealing σε δρομολόγηση και χρονοπρογραμματισμό σε εφοδιαστικές αλυσίδες, συχνά σε υβριδική μορφή που συνδυάζει κβαντικούς και κλασικούς ανιχνευτές (Noormandipour et al., 2023; Ohzeki et al., 2023). Αν και οι συσκευές αυτές δεν είναι καθολικοί κβαντικοί υπολογιστές, η εξειδίκευση στη βελτιστοποίηση τις κάνει πολύ ενδιαφέρουσες για επιχειρησιακές εφαρμογές, όπως αυτές που εξετάζονται στη συγκεκριμένη εργασία.

1.3.3 Αναλογικά και neutral-atom κβαντικά συστήματα

Πέρα από τα καθαρά gate-based και annealing μοντέλα, αναπτύσσονται και αναλογικά κβαντικά συστήματα, στα οποία η φυσική εξέλιξη του κβαντικού συστήματος αξιοποιείται πιο άμεσα, χωρίς να διασπάται πλήρως σε διακριτές πύλες (Georgescu, Ashhab, & Nori, 2014). Ιδιαίτερη προσοχή έχουν προσελκύσει τα συστήματα neutral-atom, στα οποία άτομα παγιδεύονται και ελέγχονται με οπτικά μέσα, επιτρέποντας πυκνή διάταξη qubits και φυσική υλοποίηση πολύσωμων αλληλεπιδράσεων (Browaeys & Lahaye, 2020; Pasqal, 2025). Σε τέτοια συστήματα, ο συνδυασμός αναλογικού και ψηφιακού (hybrid digital/analog) ελέγχου μπορεί να μειώσει τον αριθμό των απαιτούμενων πυλών και να βελτιώσει την ανθεκτικότητα σε σφάλματα.

Οι αναλογικές προσεγγίσεις θεωρούνται ιδιαίτερα υποσχόμενες για πρώιμο κβαντικό πλεονέκτημα σε συγκεκριμένες κλάσεις προβλημάτων, όπως ορισμένα μοντέλα βελτιστοποίησης και προσομοιώσεις φυσικών συστημάτων (Georgescu et al., 2014; Preskill, 2018). Αν και η τεχνολογία είναι ακόμη σε φάση ωρίμανσης, εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε neutral-atom πλατφόρμες προωθούν λύσεις με στόχο εφαρμογές σε βελτιστοποίηση βιομηχανικών διαδικασιών, συμπεριλαμβανομένων σεναρίων σχετικών με παραγωγή, ενέργεια και logistics (Pasqal, 2025; QuEra Computing Inc., 2026). Για την παρούσα εργασία, τα αναλογικά συστήματα αποτελούν κυρίως τεχνολογικό υπόβαθρο και πιθανή μελλοντική κατεύθυνση για εφαρμογές logistics.

1.3.4 Quantum-inspired μέθοδοι

Οι quantum-inspired μέθοδοι δεν απαιτούν πραγματικό κβαντικό hardware, αλλά χρησιμοποιούν μαθηματικές ιδέες και ευρετικές που προέρχονται από την κβαντική μηχανική και την κβαντική βελτιστοποίηση, υλοποιημένες σε κλασικούς υπολογιστές (Glover, Kochenberger, & Du, 2018). Παραδείγματα περιλαμβάνουν κλασικούς ανιχνευτές που μιμούνται quantum annealing, υβριδικά σχήματα που συνδυάζουν κλασικούς και κβαντικούς λύτες, καθώς και αλγοριθμικές τεχνικές που εμπνέονται από κβαντικά φαινόμενα σε χώρους λύσεων (Stollenwerk et al., 2023; Noormandipour et al., 2023).

Στον χώρο των logistics, έχει αναπτυχθεί μια αυξανόμενη σειρά εφαρμογών quantum-inspired βελτιστοποίησης για δρομολόγηση, φόρτωση εμπορευματοκιβωτίων, σχεδιασμό δικτύων και προγραμματισμό παραγωγής, οι οποίες προσφέρουν βελτιώσεις σε χρόνους επίλυσης ή ποιότητα λύσης χωρίς την ανάγκη πρόσβασης σε κβαντικούς επεξεργαστές (Glover et al., 2018; BQPSim, 2026). Τέτοιες λύσεις συχνά προωθούνται ως πρακτικό ενδιάμεσο βήμα, επιτρέποντας σε επιχειρήσεις και νεοφυείς εταιρείες να αποκτήσουν εμπειρία σε κβαντικού τύπου μοντελοποίηση και ροές εργασίας, πριν καταστούν διαθέσιμα πιο ισχυρά κβαντικά συστήματα (D-Wave Systems Inc., 2023; Quantum Economic Development Consortium, 2025). Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τη νεοφυή επιχειρηματικότητα, καθώς μειώνει το τεχνολογικό και επενδυτικό ρίσκο.

1.3.5 Συνοπτική σύγκριση

Συνοψίζοντας, οι κύριες προσεγγίσεις κβαντικής υπολογιστικής μπορούν να συγκριθούν ως προς το επίπεδο γενικότητας, την καταλληλότητα για βελτιστοποίηση και την ωριμότητα της τεχνολογίας (Preskill, 2018; Lenahan, 2023). Τα gate-based συστήματα είναι πιο γενικού σκοπού αλλά ακόμη τεχνολογικά απαιτητικά, οι quantum annealers είναι περισσότερο εξειδικευμένοι σε προβλήματα βελτιστοποίησης και έχουν ήδη εφαρμοστεί πιλοτικά σε πραγματικά projects logistics, ενώ οι αναλογικές και neutral-atom πλατφόρμες επιδιώκουν να συνδυάσουν πλεονεκτήματα ακρίβειας και κλιμάκωσης (Stollenwerk et al., 2023; Georgescu et al., 2014). Οι quantum-inspired μέθοδοι προσφέρουν έναν ρεαλιστικό δρόμο υιοθέτησης τεχνικών βελτιστοποίησης κβαντικού τύπου σε κλασικά περιβάλλοντα, με άμεσο επιχειρησιακό όφελος (Glover et al., 2018; BQPSim, 2026).

Οι κύριες αυτές προσεγγίσεις συνοψίζονται συγκριτικά στον Πίνακα 2.

Προσέγγιση	Γενικότητα / Τύπος υπολογιστή	Τυπικά προβλήματα / εφαρμογές	Τρέχουσα ωριμότητα	Ανάγκη κβαντικού hardware
Gate-based κβαντικός υπολογιστής	Καθολικός, γενικού σκοπού κβαντικός υπολογιστής με κβαντικές πύλες και κυκλώματα.	Κβαντικοί αλγόριθμοι (Shor, Grover), variational αλγόριθμοι (VQE, QAOA), γενικά προβλήματα βελτιστοποίησης και προσομοίωσης.	Πειραματική φάση NISQ, περιορισμένος αριθμός qubits και αισθητός θόρυβος.	Απαιτεί πρόσβαση σε gate-based κβαντικό επεξεργαστή (συνήθως μέσω cloud).
Quantum annealer	Εξειδικευμένος κβαντικός βελτιστοποιητής βασισμένος σε αδιαβατική εξέλιξη και ελαχιστοποίηση ενέργειας.	Συνδυαστική βελτιστοποίηση, δρομολόγηση, χρονοπρογραμματισμός, προβλήματα τύπου QUBO σε logistics.	Πιο ώριμη χρήση σε συγκεκριμένες βιομηχανικές πιλοτικές εφαρμογές.	Απαιτεί πρόσβαση σε εξειδικευμένο annealing hardware (π.χ. D-Wave).
Αναλογικά / neutral-atom συστήματα	Αναλογικά ή υβριδικά digital/analog συστήματα βασισμένα σε neutral-atom ή άλλες φυσικές πλατφόρμες.	Προσομοιώσεις, επιλεγμένα προβλήματα βελτιστοποίησης και μοντέλα φυσικών συστημάτων.	Ταχεία εξέλιξη, αλλά ακόμη σε ερευνητική και πιλοτική φάση.	Απαιτεί πρόσβαση σε εξειδικευμένες αναλογικές/neutral-atom πλατφόρμες.
Quantum-inspired μέθοδοι	Κλασικοί αλγόριθμοι που μιμούνται ή εμπνέονται από κβαντικές τεχνικές βελτιστοποίησης.	Βελτιστοποίηση logistics (δρομολόγηση, φόρτωση, σχεδιασμός δικτύων), QUBO μοντελοποίηση σε κλασικά συστήματα.	Σχετικά ώριμες λύσεις λογισμικού, ήδη διαθέσιμες εμπορικά.	Δεν απαιτείται πραγματικό κβαντικό hardware-λειτουργεί σε κλασικές υποδομές.

Πίνακας 2 Συνοπτική σύγκριση βασικών προσεγγίσεων κβαντικής υπολογιστικής και quantum-inspired μεθόδων ως προς τη γενικότητα, τις τυπικές εφαρμογές και την τρέχουσα ωριμότητα (βασισμένο σε Nielsen & Chuang, 2010; Preskill, 2018; Albash & Lidar, 2018; Glover et al, 2018).

1.4 Κβαντικοί αλγόριθμοι σχετικοί με επιχειρήσεις (optimization, machine learning, cryptography)

Οι κβαντικοί αλγόριθμοι που θεωρούνται πιο συναφείς με επιχειρηματικές εφαρμογές οργανώνονται συνήθως σε τρεις κύριες κατηγορίες: αλγορίθμους βελτιστοποίησης, αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και αλγορίθμους για κρυπτογραφία και ασφάλεια. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν προσεγγίσεις όπως ο Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) και οι annealing-based μέθοδοι, που στοχεύουν στη λύση σύνθετων προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, όπως η δρομολόγηση οχημάτων, η κατανομή πόρων και η διαχείριση χαρτοφυλακίων, όπου ο χώρος πιθανών λύσεων μεγαλώνει εκθετικά (Montanaro, 2016; Spinqanta, 2025). Για πολλές από αυτές τις εφαρμογές έχουν ήδη παρουσιαστεί πιλοτικά έργα σε τομείς όπως τα logistics, τα χρηματοοικονομικά και ο σχεδιασμός δικτύων, τα οποία διερευνούν κατά πόσο οι κβαντικές ή υβριδικές προσεγγίσεις μπορούν να υπερισχύσουν των κλασικών ευρετικών.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά κβαντικούς αλγόριθμους μηχανικής μάθησης, οι οποίοι συνδυάζουν ιδέες από την κβαντική υπολογιστική με καθιερωμένες τεχνικές όπως τα support vector machines, τα k-means και τα νευρωνικά δίκτυα (Schuld & Petruccione, 2018; Biamonte et al., 2017). Τέτοιοι αλγόριθμοι στοχεύουν σε επιτάχυνση εργασιών όπως ταξινόμηση, ανίχνευση ανωμαλιών και επεξεργασία μεγάλων διαστάσεων δεδομένων, κάτι που έχει άμεσο ενδιαφέρον για επιχειρήσεις σε πεδία όπως η ανάλυση πελατών, η ανίχνευση απάτης και η προγνωστική συντήρηση. Παρότι η πραγματική «κβαντική υπεροχή» σε αυτά τα σενάρια παραμένει αντικείμενο έρευνας, η ανάπτυξη υβριδικών quantum-classical μοντέλων θεωρείται ένα από τα πιο υποσχόμενα μονοπάτια για πρακτική αξιοποίηση σε περιβάλλον NISQ.

Στον χώρο της κρυπτογραφίας, ο αλγόριθμος Shor έχει αναδειχθεί ως εμβληματικό παράδειγμα του πώς ένας κβαντικός αλγόριθμος μπορεί να ανατρέψει θεμελιωμένες παραδοχές ασφαλείας, επιτρέποντας την αποδοτική παραγοντοποίηση μεγάλων αριθμών και, θεωρητικά, την υπονόμευση διαδεδομένων σχημάτων όπως το RSA και το ECC (Montanaro, 2016; ScaleUp Lab, 2024). Ακόμη, κβαντικές τεχνικές κρυπτογράφησης, όπως η κβαντική διανομή κλειδιών (QKD), και πιο πρόσφατα υβριδικές προσεγγίσεις που συνδυάζουν machine learning με quantum cryptography, διερευνώνται ως εργαλεία ενίσχυσης της ασφάλειας σε αναγκαίες υποδομές και επιχειρηματικά δίκτυα (Kumar et al., 2023). Η συζήτηση για την «post-quantum» κρυπτογραφία, δηλαδή για κλασικά αλλά ανθεκτικά σε κβαντικές επιθέσεις σχήματα, αποτελεί σήμερα κεντρικό θέμα στη διεθνή ατζέντα κυβερνήσεων και μεγάλων οργανισμών.

1.5 Προκλήσεις και περιορισμοί για ευρεία υιοθέτηση

Παρά τις σημαντικές προοπτικές, η ευρεία υιοθέτηση της κβαντικής υπολογιστικής συναντά σειρά τεχνικών και πρακτικών προκλήσεων, ιδίως στην τρέχουσα εποχή των λεγόμενων NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) συστημάτων (Preskill, 2018; Quandela, 2024). Τα διαθέσιμα συστήματα χαρακτηρίζονται από περιορισμένο αριθμό qubits, υψηλά ποσοστά σφαλμάτων, περιορισμένη συνδεσιμότητα μεταξύ qubits και μικρούς χρόνους συνοχής, με αποτέλεσμα να περιορίζεται το βάθος και την πολυπλοκότητα των κυκλωμάτων που μπορούν να εκτελεστούν με αξιοπιστία. Ως αποτέλεσμα, η επίτευξη σαφούς, πρακτικού «quantum advantage» έναντι προηγμένων κλασικών αλγορίθμων παραμένει κατά κύριο λόγο ανοιχτό ερευνητικό ζήτημα, με τις περισσότερες εφαρμογές να βρίσκονται ακόμη σε πιλοτικό ή πειραματικό στάδιο.

Πέρα από τα καθαρά τεχνικά ζητήματα, σημαντικά εμπόδια αφορούν το οικοσύστημα λογισμικού, τα πρότυπα και το ανθρώπινο δυναμικό. Η απουσία ενοποιημένων προτύπων και ώριμων εργαλείων ανάπτυξης δυσκολεύει τη δημιουργία εφαρμογών που να λειτουργούν σε διαφορετικές πλατφόρμες, ενώ η ανάγκη για εξειδικευμένες γνώσεις φυσικής, μαθηματικών και πληροφορικής περιορίζει τον αριθμό προγραμματιστών και μηχανικών που μπορούν να αναπτύξουν και να αξιολογήσουν κβαντικές λύσεις σε επιχειρηματικό περιβάλλον. Το υψηλό κόστος υποδομών (ιδίως για υπεραγώγιμες αρχιτεκτονικές που απαιτούν κρυογενικά συστήματα) και η εξάρτηση από λίγους παρόχους cloud-based κβαντικών υπηρεσιών δημιουργούν εμπόδια πρόσβασης, ιδιαίτερα για μικρότερες επιχειρήσεις και startups.

Σε γενικό επίπεδο, η αβεβαιότητα γύρω από το χρονοδιάγραμμα επίτευξης ώριμων, κλιμακούμενων κβαντικών συστημάτων δυσκολεύει τον σχεδιασμό επενδύσεων και οδικών χαρτών υιοθέτησης για οργανισμούς και κυβερνήσεις. Πολλοί οργανισμοί καλούνται να ισορροπήσουν ανάμεσα στην ανάγκη έγκαιρης προετοιμασίας (π.χ. ανάπτυξη know-how, πειραματισμός με pilots, θωράκιση κρυπτογραφικών συστημάτων) και στον κίνδυνο να επενδύσουν σε τεχνολογικές κατευθύνσεις που ενδέχεται να αλλάξουν ή να μην δικαιολογήσουν άμεσα το κόστος (Preskill, 2018; Milvus, 2025). Η πρόκληση, επομένως, δεν είναι μόνο τεχνική, αλλά και οργανωσιακή και στρατηγική: απαιτείται

σταδιακή, πειραματική υιοθέτηση, ανάπτυξη συνεργασιών με εξειδικευμένους παρόχους και ταυτόχρονη παρακολούθηση των εξελίξεων στην τυποποίηση, στη ρύθμιση και στην εκπαίδευση ανθρώπινου δυναμικού.

Κεφάλαιο 2 - Ψηφιακή καινοτομία και νεοφυής επιχειρηματικότητα

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει το θεωρητικό υπόβαθρο της ψηφιακής καινοτομίας και της ψηφιακής επιχειρηματικότητας, προκειμένου να αναδειχθεί το πλαίσιο μέσα στο οποίο εντάσσονται οι κβαντικές τεχνολογίες ως πεδίο *deep-tech* καινοτομίας. Αρχικά παρουσιάζονται βασικές έννοιες και χαρακτηριστικά της ψηφιακής καινοτομίας και των *digital startups*, στη συνέχεια αναλύονται οι ιδιαιτερότητες της επιστημονικής καινοτομίας και των *deep-tech* επιχειρήσεων, ενώ ακολουθεί ανασκόπηση κλασικών πλαισίων επιχειρηματικών μοντέλων και των προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι νεοφυείς επιχειρήσεις σε αναδυόμενες τεχνολογίες. Τέλος, προτείνεται ένα σύνολο πλαισίων ανάλυσης ειδικά για την κατανόηση της καινοτομίας σε κβαντικές τεχνολογίες, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στα επόμενα κεφάλαια για τη μελέτη του παγκόσμιου οικοσυστήματος και των εφαρμογών στα *logistics*.

2.1 Έννοια της ψηφιακής καινοτομίας

Η έννοια της ψηφιακής καινοτομίας έχει αναδειχθεί τα τελευταία χρόνια ως διακριτό πεδίο μελέτης, καθώς η βαθιά και διάχυτη ψηφιοποίηση αμφισβητεί βασικές παραδοχές της «κλασικής» θεωρίας καινοτομίας σχετικά με τα όρια, τους φορείς και τη διαδικασία της. Σε γενικές γραμμές, η ψηφιακή καινοτομία μπορεί να οριστεί ως η δημιουργία, υιοθέτηση και εκμετάλλευση νέων ή σημαντικά βελτιωμένων προϊόντων, υπηρεσιών, διαδικασιών ή επιχειρηματικών μοντέλων, όταν αυτά καθίστανται δυνατά μέσω της χρήσης ψηφιακών τεχνολογιών και ψηφιοποιημένων διαδικασιών, ακόμη και αν το τελικό αποτέλεσμα δεν είναι αμιγώς «ψηφιακό» (Hund et al., 2021). Έτσι, η ψηφιακή καινοτομία περιλαμβάνει τόσο εμφανώς ψηφιακά αποτελέσματα (π.χ. λογισμικό, πλατφόρμες, *data-driven* υπηρεσίες), όσο και υβριδικές μορφές όπου το ψηφιακό στοιχείο ενσωματώνεται σε φυσικά προϊόντα, εμπειρίες πελατών ή εσωτερικές λειτουργίες οργανισμών (Nambisan et al., 2017).

Η συζήτηση για τη «διαφορετικότητα» της ψηφιακής καινοτομίας σε σχέση με τις παραδοσιακές μορφές καινοτομίας εστιάζει σε τρεις βασικές μεταβολές. Πρώτον, τα όρια των καινοτομιών γίνονται λιγότερο σαφή και στατικά: τα ψηφιακά προϊόντα-υπηρεσίες είναι συχνά ανοιχτά, αναβαθμίσιμα και επεκτάσιμα μετά την αρχική τους διάθεση, επιτρέποντας συνεχή επαναδιαμόρφωση των λειτουργιών και της αξίας τους (Nambisan et al., 2017). Δεύτερον, η καινοτομία παύει να είναι αποκλειστικό προνόμιο ενός κεντρικού τμήματος R&D ή μιας μεμονωμένης επιχείρησης, καθώς η ψηφιοποίηση πλατφορμών και διαδικασιών βελτιώνει την κατανομημένη συμμετοχή χρηστών, προγραμματιστών, συνεργατών και κοινοτήτων στη δημιουργία και εξέλιξη της καινοτομίας. Τρίτον, η διάκριση ανάμεσα στη διαδικασία και στο αποτέλεσμα της καινοτομίας γίνεται πιο δυσδιάκριτη, καθώς η συνεχιζόμενη χρήση, συλλογή δεδομένων και αναβάθμιση των ψηφιακών λύσεων τροφοδοτεί διαρκώς νέους κύκλους ανάπτυξης και προσαρμογών.

Στο πλαίσιο αυτό, η βιβλιογραφία για την ψηφιακή επιχειρηματικότητα προτείνει ότι οι ψηφιακές τεχνολογίες εκδηλώνονται μέσω τριών βασικών δομικών στοιχείων: των **digital artifacts**, των **digital platforms** και της **digital infrastructure** (Nambisan, 2017). Τα *digital artifacts* είναι επαναχρησιμοποιήσιμα και ανασυνθέσιμα ψηφιακά συστατικά (π.χ. εφαρμογές, *modules*, *APIs*,

αλγοριθμικές υπηρεσίες) που μπορούν να συνδυάζονται με νέους τρόπους, επιταχύνοντας τον ρυθμό καινοτομίας και αυξάνοντας τη γεννητικότητα των ψηφιακών λύσεων. Οι digital platforms λειτουργούν ως κοινά περιβάλλοντα υπηρεσιών και αρχιτεκτονικών, πάνω στα οποία φιλοξενοούνται συμπληρωματικές προσφορές, επιτρέποντας σε τρίτους να δημιουργούν καινοτομίες «πάνω» στην πλατφόρμα (π.χ. app stores, cloud platforms, marketplaces). Τέλος, η digital infrastructure περιλαμβάνει τα υποκείμενα εργαλεία και συστήματα (όπως cloud computing, κοινωνικά δίκτυα, δεδομένα και αναλυτικά εργαλεία, IoT, 3D printing) που προσφέρουν δυνατότητες επικοινωνίας, συνεργασίας και υπολογιστικής ισχύος, υποστηρίζοντας τόσο την ανάπτυξη όσο και την κλιμάκωση ψηφιακών καινοτομιών. Για τις νεοφυείς επιχειρήσεις, και ιδιαίτερα για εκείνες που δραστηριοποιούνται σε προηγμένες τεχνολογίες όπως οι κβαντικοί υπολογιστές, η κατανόηση αυτών των δομικών στοιχείων είναι σημαντική, καθώς διαμορφώνει τις ευκαιρίες σχεδιασμού νέων επιχειρηματικών μοντέλων και οικοσυστημάτων αξίας.

Δομικό Στοιχείο	Γενικός Ορισμός	Κβαντική Εφαρμογή
Digital Artifacts	Επαναχρησιμοποιήσιμα ψηφιακά συστατικά (APIs, modules, data)	Κβαντικοί αλγόριθμοι (QAOA, VQE), quantum SDKs (Qiskit), QUBO formulations
Digital Platforms	Περιβάλλοντα που φιλοξενούν συμπληρωματικές προσφορές τρίτων	IBM Quantum, AWS Braket, Azure Quantum, cloud κβαντικές πλατφόρμες
Digital Infrastructure	Υποκείμενα εργαλεία: cloud, IoT, analytics, υπολογιστική ισχύς	QPUs, κρυογενικά, quantum networks, HPC co-processors

Πίνακας 3 Πλαίσιο Nambisan ψηφιακής καινοτομίας: εφαρμογή στις κβαντικές τεχνολογίες (Nambisan et al., 2017 · ίδια επεξεργασία)

2.2 Ψηφιακή επιχειρηματικότητα και digital startups

2.2.1 Ψηφιακή επιχειρηματικότητα και digital startups

Η ψηφιακή επιχειρηματικότητα αναφέρεται σε επιχειρηματικές δραστηριότητες όπου οι ψηφιακές τεχνολογίες δεν λειτουργούν απλώς ως υποστηρικτικά εργαλεία, αλλά αποτελούν τον πυρήνα τόσο της επιχειρηματικής ευκαιρίας όσο και της διαδικασίας αξιοποίησής της (Nambisan, 2017). Έτσι, ψηφιακές πλατφόρμες, εφαρμογές, δεδομένα και υποδομές cloud διαμορφώνουν νέους τρόπους αναζήτησης, δημιουργίας και κλιμάκωσης επιχειρηματικών ιδεών, επιτρέποντας σε μικρές ομάδες ή ακόμη και μεμονωμένους επιχειρηματίες να αποκτήσουν άμεση πρόσβαση σε παγκόσμιες αγορές και πόρους. Η ψηφιακή επιχειρηματικότητα δεν περιορίζεται σε πλήρως διαδικτυακές επιχειρήσεις, αλλά μπορεί να αφορά και υβριδικά σχήματα, όπου ο πυρήνας της αξίας στηρίζεται σε ψηφιακές πλατφόρμες ή data-driven υπηρεσίες, ακόμη κι αν μέρος της προσφερόμενης εμπειρίας παραμένει φυσικό ή τοπικά ενσωματωμένο.

Η βιβλιογραφία σημειώνει ότι οι ψηφιακές τεχνολογίες μετασχηματίζουν τη φύση της **αβεβαιότητας**, των **ορίων** και της **επιχειρηματικής δράσης**. Πρώτον, η αβεβαιότητα δεν σχετίζεται μόνο με την αγορά ή την τεχνολογία, αλλά και με την ίδια την εξέλιξη του ψηφιακού προϊόντος, το οποίο μπορεί να αλλάζει συνεχώς μέσω ενημερώσεων λογισμικού, νέων λειτουργιών και συνδυασμών με άλλα ψηφιακά artifacts. Δεύτερον, τα όρια της επιχείρησης γίνονται λιγότερο σαφή, καθώς οι πλατφόρμες και τα οικοσυστήματα επιτρέπουν τη συμμετοχή πολλών, ετερογενών φορέων (πελατών, τρίτων προγραμματιστών, παρόχων συμπληρωματικών υπηρεσιών) στη συν-διαμόρφωση της αξίας. Τρίτον,

ο «φορέας» της επιχειρηματικότητας παύει να είναι ένα μεμονωμένο άτομο ή μια εταιρεία και τείνει να κατανέμεται σε δίκτυα και κοινότητες που συνδέονται ψηφιακά, οδηγώντας σε περισσότερο συλλογικές μορφές επιχειρηματικής δράσης (Nambisan, 2017).

Τα digital startups χαρακτηρίζονται, συνεπώς, από υψηλή **κλιμακωσιμότητα** και **αρθρωτότητα** (modularity) των προσφορών τους, καθώς μπορούν να επεκτείνουν γρήγορα τη λειτουργικότητα και την εμβέλειά τους μέσω προσθήκης νέων modules, υπηρεσιών ή διασυνδέσεων με άλλες πλατφόρμες. Η χρήση cloud-native υποδομών, εργαλείων αυτοματοποίησης και δεδομένων σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει σε τέτοιες επιχειρήσεις να υιοθετούν στρατηγικές «digital-first» και να πειραματίζονται ταχύτατα με νέα επιχειρηματικά μοντέλα, συχνά με χαμηλό οριακό κόστος για κάθε επιπλέον χρήστη ή συναλλαγή. Την ίδια στιγμή, η δυνατότητα κλιμάκωσης συνοδεύεται από προκλήσεις, όπως η διαχείριση της πολυπλοκότητας των οικοσυστημάτων πλατφόρμας, η εξάρτηση από τρίτες υποδομές και οι αυξανόμενοι ανταγωνισμοί σε παγκόσμιο επίπεδο, στοιχεία που κάνουν τις ψηφιακές startups πολύ ευαίσθητες σε επιλογές σχεδιασμού, αρχιτεκτονικής λογισμικού και συνεργασιών.

2.2.2 Digital entrepreneurship: ορισμοί και εξέλιξη

Ο όρος digital entrepreneurship χρησιμοποιείται για να περιγράψει μορφές επιχειρηματικότητας όπου οι ψηφιακές τεχνολογίες λειτουργούν τόσο ως μέσο όσο και ως αντικείμενο δημιουργίας αξίας (Nambisan, 2017). Στις πρώτες προσεγγίσεις, η ψηφιακή επιχειρηματικότητα ταυτίστηκε με e-entrepreneurship, δηλαδή με επιχειρηματικές δραστηριότητες στις οποίες μέρος ή το σύνολο των λειτουργιών μιας παραδοσιακής επιχείρησης μεταφέρεται σε ψηφιακά περιβάλλοντα και πληροφοριακά συστήματα, για παράδειγμα μέσω ηλεκτρονικού εμπορίου και online καναλιών διανομής (Hull et al., 2007; Kollmann, 2006). Η επιχειρηματική δράση βασιζόταν κυρίως στη χρήση του διαδικτύου και βασικών web τεχνολογιών για την προβολή, πώληση και υποστήριξη προϊόντων και υπηρεσιών (Gruber & Henkel, 2006).

Πιο πρόσφατα, η βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι η digital entrepreneurship δεν αφορά απλώς «ηλεκτρονικές εκδόσεις» υφιστάμενων επιχειρηματικών μοντέλων, αλλά μια συνολική αναδιαμόρφωση του τρόπου με τον οποίο προκύπτουν, δομούνται και κλιμακώνονται οι επιχειρηματικές ευκαιρίες υπό την επίδραση ψηφιακών τεχνολογιών (Nambisan, 2017; Sussan & Acs, 2017). Ψηφιακές πλατφόρμες, οικοσυστήματα εφαρμογών και διαδικτυακές κοινότητες μειώνουν τα εμπόδια εισόδου, επιτρέπουν τη γρήγορη δοκιμή και προσαρμογή επιχειρηματικών ιδεών και μεταβάλλουν το «πού» και «ποιος» μπορεί να δρα ως επιχειρηματικός φορέας. Έτσι, η ψηφιακή επιχειρηματικότητα συνδέεται με λιγότερο γραμμικά και περισσότερο κατανεμημένα μονοπάτια ανάπτυξης, στα οποία η αξία συν-δημιουργείται από πολλούς συμμετέχοντες εντός ψηφιακών οικοσυστημάτων (Nambisan, 2017).

Η ιστορική εξέλιξη της digital entrepreneurship έχει περιγραφεί ως διαδοχή «εποχών», από τις πρώτες μορφές επιχειρηματικότητας του web 1.0 μέχρι τις σημερινές μορφές που αξιοποιούν τεχνητή νοημοσύνη, big data, blockchain και IoT (Kraus et al., 2020; Kraus et al., 2021). Στις αρχικές φάσεις κυριαρχούσαν μοντέλα που εκμεταλλεύονταν κυρίως την ηλεκτρονική παρουσία και το online κανάλι πωλήσεων, ενώ στις νεότερες φάσεις αναπτύσσονται πολύπλοκα πλατφορμικά οικοσυστήματα, πολυπλευρές αγορές και data-driven υπηρεσίες, όπου η συνεχής ανάλυση και εκμετάλλευση δεδομένων αποτελεί κεντρικό πόρο για την επιχειρηματική δράση.

Στον χώρο των logistics, η digital entrepreneurship εκδηλώνεται μέσω νέων επιχειρήσεων που στηρίζονται σε ψηφιακές πλατφόρμες, τεχνητή νοημοσύνη, IoT και τεχνολογίες παρακολούθησης για να προσφέρουν υπηρεσίες όπως πλατφόρμες διασύνδεσης αποστολών και μεταφορέων, λύσεις

«έξυπνης» αποθήκης και καινοτόμα μοντέλα last-mile διανομής (Guerra, 2025; Invensis, 2025). Τέτοιες επιχειρήσεις λειτουργούν ως τεχνολογικά εντατικοί κόμβοι που συνδυάζουν δεδομένα από πολλαπλές πηγές και παρέχουν υπηρεσίες βελτιστοποίησης, διαφάνειας και παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η κβαντική υπολογιστική και οι quantum-inspired τεχνικές μπορούν να ιδωθούν ως αναδυόμενες ψηφιακές τεχνολογίες που δημιουργούν ένα νέο κύμα ευκαιριών digital entrepreneurship, ιδίως για νεοφυείς επιχειρήσεις που αναπτύσσουν λύσεις βελτιστοποίησης για logistics και εφοδιαστικές αλυσίδες (Phillipson, 2024; Quantum Economic Development Consortium, 2025). Η δυνατότητα ενσωμάτωσης κβαντικών ή quantum-inspired αλγορίθμων σε υφιστάμενες ψηφιακές πλατφόρμες logistics, σε συνδυασμό με cloud υποδομές και data lakes, μπορεί να αποτελέσει σημαντική πηγή διαφοροποίησης, αλλά και πεδίο νέων τεχνολογικών και επιχειρηματικών ρίσκων.

Έννοια	Σύντομος ορισμός	Κύρια εστίαση	Ενδεικτικό παράδειγμα στα logistics
Ψηφιοποίηση (digitization)	Μετατροπή αναλογικών δεδομένων και διαδικασιών σε ψηφιακή μορφή.	Τεχνική καταγραφή/κωδικοποίηση πληροφοριών.	Αντικατάσταση χειρόγραφων δελτίων αποστολής με ψηφιακά αρχεία και barcode/QR-codes.
Ψηφιακή καινοτομία (digital innovation)	Δημιουργία νέων ή ουσιαστικά βελτιωμένων προϊόντων, υπηρεσιών ή διαδικασιών με χρήση ψηφιακών τεχνολογιών (Fichman et al., 2014; Nambisan et al., 2017).	Στοχευμένες αλλαγές που αυξάνουν την αξία ή την αποδοτικότητα.	Ανάπτυξη πλατφόρμας πραγματικού χρόνου παρακολούθησης φορτίων με IoT αισθητήρες και analytics.
Ψηφιακός μετασχηματισμός (digital transformation)	Ολιστικός, στρατηγικός επανασχεδιασμός επιχειρησιακών διαδικασιών, δομών και κουλτούρας με βάση τις ψηφιακές τεχνολογίες (Vial, 2019).	Βαθείς οργανωσιακές αλλαγές, νέα επιχειρηματικά μοντέλα.	Μετάβαση μιας παραδοσιακής εταιρείας μεταφορών σε ολοκληρωμένη ψηφιακή πλατφόρμα διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας.
Digital entrepreneurship	Δημιουργία και ανάπτυξη νέων επιχειρήσεων που βασίζονται σε ψηφιακές τεχνολογίες για τη δημιουργία και διάθεση αξίας (Nambisan, 2017; Sussan & Acs, 2017).	Νέα ψηφιακά επιχειρηματικά μοντέλα, πλατφόρμες και οικοσυστήματα.	Νεοφυής επιχείρηση που προσφέρει ως υπηρεσία βελτιστοποίηση δρομολόγησης και last-mile διανομής μέσω cloud πλατφόρμας.

Πίνακας 4 Συνοπτική σύγκριση βασικών εννοιών που σχετίζονται με την ψηφιακή αλλαγή και την επιχειρηματικότητα στον χώρο των logistics, με έμφαση σε ορισμό, εστίαση και ενδεικτικές εφαρμογές (βασισμένο σε Fichman et al., 2014· Nambisan, 2017· Vial, 2019· Kraus et

2.3 Deep tech και επιστημονική επιχειρηματικότητα

Ο όρος deep tech χρησιμοποιείται για να περιγράψει καινοτομίες και επιχειρήσεις που βασίζονται σε ουσιαστικές επιστημονικές ή μηχανικές ανακαλύψεις και στοχεύουν σε ριζικούς μετασχηματισμούς αγορών ή/και σε λύσεις για σύνθετα κοινωνικοοικονομικά προβλήματα. Σε αντίθεση με πολλές «κλασικές» digital startups, οι deep-tech επιχειρήσεις δεν στηρίζονται πρωτίστως σε καινοτομία επιχειρηματικού μοντέλου ή marketing, αλλά σε έντονα τεχνολογικό και ερευνητικό υπόβαθρο, συχνά προερχόμενο από πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα ή εταιρικά εργαστήρια R&D. Τυπικά πεδία deep

tech περιλαμβάνουν την τεχνητή νοημοσύνη, τη βιοτεχνολογία, τη νανοτεχνολογία, τη ρομποτική και τις κβαντικές τεχνολογίες.

Οι deep-tech startups χαρακτηρίζονται από υψηλή ένταση έρευνας, μακρύτερους κύκλους ανάπτυξης και υψηλότερες τεχνικές αβεβαιότητες σε σύγκριση με συμβατικές ψηφιακές επιχειρήσεις. Η ανάπτυξη ενός ελάχιστου βιώσιμου προϊόντος μπορεί να απαιτεί πολυετή ερευνητική εργασία, εξειδικευμένες υποδομές (εργαστήρια, καθαρούς χώρους, κρυογενικά συστήματα κ.λπ.) και στελέχωση με προσωπικό υψηλής επιστημονικής εξειδίκευσης. Αυτό συνεπάγεται αυξημένες κεφαλαιακές ανάγκες και ανάγκη για «υπομονετικό κεφάλαιο» (patient capital), καθώς η απόσταση μεταξύ πρώτης τεχνολογικής απόδειξης (proof-of-concept) και εμπορικής βιωσιμότητας μπορεί να υπερβαίνει κατά πολύ τα συνηθισμένα χρονικά ορίζοντα των επενδυτών σε κλασικές digital startups.

Η επιστημονική επιχειρηματικότητα (science-based entrepreneurship) εστιάζει ακριβώς σε αυτή τη μετάβαση από ερευνητικά αποτελέσματα σε εμπορικά προϊόντα και υπηρεσίες, μέσω spin-offs, startups ή εταιρικών επιχειρηματικών πρωτοβουλιών. Στο πλαίσιο των deep-tech οικοσυστημάτων, καθοριστικό ρόλο διαδραματίζουν οι δεσμοί ανάμεσα σε πανεπιστήμια, δημόσιους φορείς χρηματοδότησης, μεγάλες επιχειρήσεις και εξειδικευμένους επενδυτές, καθώς και η ύπαρξη κατάλληλων δομών μεταφοράς τεχνολογίας, incubators και επιταχυντών με τεχνολογική εξειδίκευση. Πρόσφατες διεθνείς αναλύσεις σημειώνουν ότι επιτυχημένα deep-tech clusters αναπτύσσονται εκεί όπου συνυπάρχουν ισχυρή επιστημονική βάση, θεσμική υποστήριξη, επενδυτικό ενδιαφέρον και ώριμα δίκτυα συνεργασίας, στοιχεία που είναι ιδιαίτερα εμφανή στα οικοσυστήματα κβαντικών τεχνολογιών.

Οι κβαντικές τεχνολογίες αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα deep tech: συνδυάζουν απαιτητική βασική έρευνα, περίπλοκες υλικές υποδομές και υψηλό επιχειρηματικό ρίσκο, αλλά υπόσχονται δυνητικά μεγάλες επιπτώσεις σε τομείς όπως η υπολογιστική, οι επικοινωνίες, η ασφάλεια και η μέτρηση (sensing). Οι σχετικές startups καλούνται να ισορροπήσουν ανάμεσα σε μακροχρόνιες προσπάθειες τεχνολογικής ωρίμανσης και στην ανάγκη για σταδιακή δημιουργία αξίας και εσόδων, συχνά μέσω ενδιάμεσων προϊόντων, υβριδικών λύσεων ή συνεργασιών με μεγάλους βιομηχανικούς εταίρους. Η κατανόηση των ιδιαιτεροτήτων της deep-tech και επιστημονικής επιχειρηματικότητας είναι, συνεπώς, απαραίτητη για την ανάλυση του οικοσυστήματος κβαντικών startups και για την αξιολόγηση των ευκαιριών και των προκλήσεων που συνοδεύουν την είσοδό τους σε εφαρμογές όπως τα logistics και η εφοδιαστική αλυσίδα.

2.4 Επιχειρηματικά μοντέλα και startups

Η έννοια του επιχειρηματικού μοντέλου χρησιμοποιείται για να περιγράψει την «αρχιτεκτονική» μέσω της οποίας μια επιχείρηση δημιουργεί, παραδίδει και συλλαμβάνει αξία από τους πελάτες της. Σύμφωνα με τον Teece, ένα επιχειρηματικό μοντέλο αποτυπώνει τη λογική με την οποία η επιχείρηση καθορίζει τι θέλουν οι πελάτες, πώς θα οργανωθεί για να ικανοποιήσει αυτές τις ανάγκες και με ποιον τρόπο θα μετατρέψει τις πληρωμές τους σε κέρδη. Η διαμόρφωση ενός τέτοιου μοντέλου είναι ιδιαίτερα σημαντική σε περιβάλλοντα υψηλής αβεβαιότητας, όπως αυτά στα οποία δραστηριοποιούνται digital και deep-tech startups, όπου ο τρόπος δημιουργίας εσόδων, η δομή κόστους και η θέση στην αλυσίδα αξίας δεν είναι δεδομένα εκ των προτέρων.

Ο Osterwalder και ο Pigneur προτείνουν το Business Model Canvas ως ένα απλό, οπτικό εργαλείο για την περιγραφή επιχειρηματικών μοντέλων μέσα από εννέα δομικές συνιστώσες: τμήματα πελατών, πρόταση αξίας, κανάλια, σχέσεις με πελάτες, ροές εσόδων, βασικοί πόροι, βασικές δραστηριότητες, βασικοί συνεργάτες και δομή κόστους. Το Canvas λειτουργεί ως «γλώσσα εργασίας» που επιτρέπει σε ομάδες να συζητούν, να αμφισβητούν και να επανασχεδιάζουν επιχειρηματικά μοντέλα με

πιο **συστηματικό** τρόπο, κάτι ιδιαίτερα χρήσιμο για νεοφυείς επιχειρήσεις που χρειάζεται να δοκιμάζουν επαναληπτικά διαφορετικούς συνδυασμούς αξίας, πελατών και μηχανισμών εσόδων. Για ψηφιακές και πλατφορμικές startups, τα δομικά στοιχεία που σχετίζονται με τα τμήματα πελατών, τα κανάλια, τις ροές εσόδων και τους βασικούς συνεργάτες αποκτούν κεντρικό ρόλο, καθώς συνδέονται με φαινόμενα όπως τα network effects και τα multi-sided markets.

Η προσέγγιση Lean Startup του Ries συμπληρώνει τις παραπάνω έννοιες, αντιμετωπίζοντας το επιχειρηματικό μοντέλο ως μια δέσμη υποθέσεων που πρέπει να ελεγχθούν εμπειρικά μέσω του κύκλου build-measure-learn. Αντί για εκτενείς αρχικούς σχεδιασμούς, η startup αναπτύσσει ένα ελάχιστο βιώσιμο προϊόν (MVP), το οποίο χρησιμοποιείται για τη συλλογή δεδομένων από πραγματικούς χρήστες και την «επικυρωμένη μάθηση» ως προς το αν η πρόταση αξίας, ο στόχος-πελάτης και ο τρόπος σύλληψης αξίας λειτουργούν στην πράξη. Όταν τα δεδομένα μας δείχνουν ότι σημαντικές υποθέσεις δεν επαληθεύονται, η επιχείρηση καλείται να πραγματοποιήσει «ρίνοτ», δηλαδή μια στοχευμένη αλλαγή στο προϊόν ή στο επιχειρηματικό μοντέλο (π.χ. αλλαγή τμήματος πελατών, μηχανισμού εσόδων ή καναλιού), διατηρώντας παρ' όλα αυτά το συσσωρευμένο μάθημα.

Για digital και αρκετά για deep-tech/quantum startups, ο συνδυασμός αυτών των προσεγγίσεων είναι σημαντικός, καθώς οι τεχνολογικές και αγοραστικές αβεβαιότητες είναι πολύ υψηλές. Από τη μια πλευρά, απαιτείται μια σαφής, δομημένη αποτύπωση του επιχειρηματικού μοντέλου (π.χ. μέσω Canvas) ώστε να γίνει ρητή η λογική της δημιουργίας και σύλληψης αξίας, και από την άλλη, μια ευέλικτη διαδικασία συνεχούς πειραματισμού και αναθεώρησης (Lean Startup) που αναγνωρίζει ότι το αρχικό μοντέλο είναι κατ' ανάγκη προσωρινό. Ιδίως σε πεδία όπως οι κβαντικές τεχνολογίες, όπου οι εφαρμογές, τα πρότυπα και τα οικοσυστήματα διαμορφώνονται σταδιακά, η ικανότητα διαρκούς μάθησης και προσαρμογής επιχειρηματικών μοντέλων αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για τη μετάβαση από την τεχνολογική υπόσχεση σε βιώσιμες αγορές και ροές εσόδων.

2.5 Προκλήσεις και ιδιαιτερότητες των deep-tech/quantum startups

Οι deep-tech startups αντιμετωπίζουν συνήθως πολύ μεγαλύτερους χρόνους ανάπτυξης, υψηλή τεχνική αβεβαιότητα και έντονη κεφαλαιακή ένταση σε σύγκριση με «κλασικές» digital επιχειρήσεις. Η ανάπτυξη ενός προϊόντος απαιτεί μακρές περιόδους έρευνας, επαναλαμβανόμενο prototyping και συχνά δαπανηρές υλικές υποδομές, με αποτέλεσμα σημαντικό κεφάλαιο καταναλώνεται πριν υπάρξει σαφής εμπορική απόδειξη ή έσοδα. Αυτό δημιουργεί κενό χρηματοδότησης στα ενδιάμεσα στάδια (μεταξύ seed/grants και scale-up), όπου οι τεχνολογικοί κίνδυνοι παραμένουν υψηλοί, αλλά οι ανάγκες για επένδυση αυξάνονται.

Η πρόσβαση σε εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό αποτελεί κεντρικό, αλλά δυσεπίλυτο ζήτημα, καθώς οι deep-tech επιχειρήσεις χρειάζονται άτομα με συνδυασμό προηγμένων επιστημονικών δεξιοτήτων και ικανοτήτων επιχειρηματικής ανάπτυξης. Η ρυθμιστική αβεβαιότητα και η ανάγκη συμμόρφωσης με πολύπλοκα πρότυπα ασφάλειας, ποιότητας ή δεοντολογίας επιβραδύνουν τη διάθεση προϊόντων στην αγορά, ιδίως σε τομείς όπως ενέργεια, υγεία ή ασφάλεια υποδομών. Σε πολλές αγορές, η χαμηλή ετοιμότητα πελατών και η ανάγκη για εμφανή προσπάθεια «εκπαίδευσης» της αγοράς κάνουν την υιοθέτηση deep-tech λύσεων πιο αργή και αβέβαιη από ό,τι σε παραδοσιακές ψηφιακές υπηρεσίες.

Οι quantum startups συγκεντρώνουν όλες τις παραπάνω δυσκολίες σε ακόμη πιο έντονη μορφή, καθώς καλούνται να αναπτύξουν τεχνολογίες σε ένα πεδίο όπου η ίδια η φυσική υποδομή (π.χ. κβαντικοί επεξεργαστές, κρυογενικά συστήματα, ειδικά οπτικά) παραμένει ανώριμη και εξαιρετικά δαπανηρή. Η κλιμάκωση και σταθεροποίηση των qubits, η αντιμετώπιση του θορύβου και η έλλειψη ώριμου λογισμικού και ενδιάμεσων «στρωμάτων» λογισμικής υποδομής δυσκολεύουν την ανάπτυξη

εμπορικών εφαρμογών και απαιτούν στενή συνεργασία με πανεπιστήμια, μεγάλους τεχνολογικούς παρόχους και δημόσια προγράμματα. Επιπλέον, υπάρχει σημαντικό έλλειμμα ταλέντου σε επίπεδο μηχανικών, επιστημόνων και product managers με γνώσεις κβαντικής τεχνολογίας, κάτι που μπορεί να εντείνει την ανισότητα πρόσβασης, καθώς μεγάλοι οργανισμοί και κυβερνήσεις είναι σε καλύτερη θέση να προσελκύσουν αυτούς τους ανθρώπινους πόρους.

Χαρακτηριστικό	«Κλασική» Digital Startup	Deep-Tech / Quantum Startup
Βάση καινοτομίας	Επιχειρηματικό μοντέλο, UX, αγορά	Βασική επιστημονική / τεχνολογική ανακάλυψη
Χρόνος μέχρι MVP	6–18 μήνες (lean/agile)	3–7+ χρόνια (μακρά R&D, πιστοποιήσεις)
Κεφαλαιακές ανάγκες	Χαμηλές (cloud-native, SaaS)	Πολύ υψηλές (εργαστήρια, κρυογενικά)
Χρηματοδότηση	VC, angel, bootstrapping	Patient capital, grants, corporate VC
Τεχνική αβεβαιότητα	Μέτρια (will it sell?)	Πολύ υψηλή (will it work? + will it sell?)
Ανθρώπινο δυναμικό	Developers, designers, marketing	PhD φυσικοί, QC engineers
Παραδείγματα	Uber, Airbnb, Shopify	IonQ, Rigetti, Pasqal, Zapata

Πίνακας 5 Σύγκριση «κλασικών» digital startups και deep-tech/quantum startups (Giones & Brem, 2017 · Ίδια επεξεργασία)

Συνοπτικά, η εμπορική ωρίμανση των κβαντικών τεχνολογιών αναμένεται να είναι σταδιακή και άνιση ανά κλάδο, πράγμα που σημαίνει ότι πολλές quantum startups θα πρέπει για αρκετά χρόνια να ισορροπούν ανάμεσα σε ερευνητικά projects, πιλοτικές εφαρμογές και υβριδικά κλασικο-κβαντικά προϊόντα, πριν αποκτήσουν σταθερές και κλιμακώσιμες αγορές. Σε τομείς όπως τα logistics και οι εφοδιαστικές αλυσίδες, αυτό συνεπάγεται ότι η αξία θα προκύψει αρχικά από στοχευμένες βελτιώσεις (π.χ. βελτιστοποίηση δρομολόγησης, predictive maintenance, ασφάλεια δεδομένων) σε συνεργασία με υφιστάμενους βιομηχανικούς παίκτες, παρά από άμεση αντικατάσταση κλασικών συστημάτων.

2.6 Πλαίσια ανάλυσης για την καινοτομία σε κβαντικές τεχνολογίες

Η βιβλιογραφία για τις αναδυόμενες τεχνολογίες προτείνει τη χρήση κλιμάκων ωριμότητας όπως τα Technology Readiness Levels (TRLs) για την αποτύπωση της τεχνολογικής ωριμότητας από τις πρώιμες ερευνητικές ιδέες (TRL 1–2) μέχρι τα ώριμα προϊόντα και συστήματα (TRL 8–9). Στο πεδίο των κβαντικών τεχνολογιών, έχουν διατυπωθεί εξειδικευμένες κλίμακες Quantum Technology Readiness Levels (QTRLs), καθώς και συμπληρωματικές κλίμακες εμπορικής ετοιμότητας (Quantum Commercial Readiness Levels, QCRLs), ώστε να εκτιμάται όχι μόνο η τεχνική ωριμότητα ενός υποσυστήματος ή μιας πλατφόρμας, αλλά και η βαθμός ετοιμότητας της αγοράς και των επιχειρηματικών μοντέλων που τη συνοδεύουν. Η χρήση τέτοιων κλιμάκων επιτρέπει τη διαμόρφωση «οδικών χαρτών» (roadmaps) με σαφή ενδιάμεσα ορόσημα, απαιτούμενους πόρους και επενδυτικές ανάγκες, κάτι ιδιαίτερα σημαντικό για deep-tech/quantum startups που αντιμετωπίζουν μακρές περιόδους ανάπτυξης και υψηλό ρίσκο.

Την ίδια στιγμή, διεθνείς οργανισμοί όπως ο Παγκόσμιος Οικονομικό Φόρουμ έχουν προτείνει πλαίσια που συνδυάζουν την τεχνολογική ωριμότητα με τον κλαδικό αντίκτυπο, αξιολογώντας τις

τρεις κύριες κατηγορίες κβαντικών τεχνολογιών (quantum computing, quantum sensing, quantum communication/security) με βάση δείκτες όπως ωριμότητα, καμπύλη μάθησης, κόστος υλοποίησης, δυνατότητες κλιμάκωσης και ρίσκο. Σε πρόσφατες αναλύσεις για προηγμένη μεταποίηση και εφοδιαστικές αλυσίδες, προτείνεται ένα «πλαίσιο συνάφειας» (relevance framework) που βοηθά οργανισμούς να αναγνωρίσουν σε ποιες λειτουργίες της αλυσίδας αξίας (π.χ. σχεδιασμός, προγραμματισμός παραγωγής, logistics, predictive maintenance) μπορεί να υπάρξει ουσιαστικό όφελος από κβαντικούς υπολογιστές, αισθητήρες ή λύσεις κβαντικής ασφάλειας. Για τον χώρο των logistics ειδικότερα, το πλαίσιο αυτό εστιάζει σε εφαρμογές όπως βελτιστοποίηση πολύπλοκων δικτύων, ανθεκτικότητα εφοδιαστικών αλυσίδων και προσομοίωση σεναρίων υπό αβεβαιότητα, συχνά μέσω υβριδικών κλασικο-κβαντικών αλγορίθμων.

Η έννοια του «quantum-ready ecosystem» λειτουργεί ως μετα-πλαίσιο, στο οποίο η τεχνολογική ωριμότητα συνδέεται με οργανωσιακή ετοιμότητα, πολιτικές, υποδομές και ανθρώπινο κεφάλαιο. Σχετικές προσεγγίσεις προτείνουν να αξιολογείται η πρόοδος όχι μόνο σε επίπεδο hardware και λογισμικού, αλλά και ως προς τη διαθεσιμότητα εξειδικευμένων δεξιοτήτων, την ύπαρξη κατάλληλων υποδομών (cloud, εργαστήρια, testbeds), τη διαμόρφωση προτύπων και διαλειτουργικότητας, καθώς και την ένταση συνεργασιών μεταξύ βιομηχανίας, ακαδημαϊκών φορέων και δημόσιου τομέα. Για κλάδους όπως τα logistics και η εφοδιαστική αλυσίδα, η υιοθέτηση τέτοιων πλαισίων επιτρέπει πιο ρεαλιστική αποτίμηση του πότε και υπό ποιες προϋποθέσεις οι κβαντικές τεχνολογίες μπορούν να δημιουργήσουν μετρήσιμη αξία, καθώς και τον σχεδιασμό σταδιακών στρατηγικών μετάβασης από πιλοτικές εφαρμογές σε κλιμακωμένες λύσεις.

Στον Πίνακα 3 συνοψίζονται ενδεικτικά βασικά πλαίσια που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της ωριμότητας και της καινοτομίας σε κβαντικές τεχνολογίες και την αξιολόγηση της συνάφειάς τους με εφαρμογές όπως τα logistics και οι εφοδιαστικές αλυσίδες.

Πλαίσιο	Σύντομη περιγραφή	Τι μετρά	Χρήση για quantum/logistics
TRL / QTRL	Κλίμακες τεχνολογικής ωριμότητας για κβαντικές τεχνολογίες	Τεχνική ωριμότητα (από proof-of-concept μέχρι προϊόν)	Βοηθά να φανεί αν μια λύση είναι κατάλληλη για pilot ή για παραγωγική χρήση.
QCRL / Commercial readiness	Κλίμακες εμπορικής/αγοραστικής ωριμότητας	Business model, αγορά, πελάτες, ρίσκο υιοθέτησης	Δείχνει αν υπάρχει πραγματική αγορά για quantum λύση σε logistics.
Sector impact frameworks (WEF)	Πλαίσια συνάφειας ανά κλάδο και χρήση	Δυνητικό όφελος, κόστος, κλιμάκωση, ρίσκο ανά εφαρμογή	Επιλογή περιοχών υψηλής αξίας (π.χ. δρομολόγηση, ανθεκτικότητα supply chain).
Quantum-ready ecosystem	Πλαίσιο ετοιμότητας οικοσυστήματος	Δεξιότητες, υποδομές, πρότυπα, συνεργασίες	Βοηθά χώρες/οργανισμούς να δουν αν «σηκώνουν» υιοθέτηση quantum σε logistics.

Πίνακας 6 Ενδεικτικά πλαίσια ανάλυσης για την ωριμότητα, την εμπορική ετοιμότητα και τον κλαδικό αντίκτυπο των κβαντικών τεχνολογιών, με αναφορά σε εφαρμογές στη μεταποίηση και τις εφοδιαστικές αλυσίδες

Κεφάλαιο 3 - Το παγκόσμιο οικοσύστημα κβαντικών τεχνολογιών & startups

Οι κβαντικές τεχνολογίες διαμορφώνουν σταδιακά ένα νέο παγκόσμιο οικοσύστημα καινοτομίας, στο οποίο συνυπάρχουν ερευνητικά ιδρύματα, μεγάλες εταιρείες, εξειδικευμένοι επενδυτές και αυξανόμενος αριθμός startups (QURECA, 2024; EPO-OECD, 2025). Το οικοσύστημα αυτό καλύπτει τρεις κύριες κατηγορίες (κβαντικούς υπολογιστές, κβαντικές επικοινωνίες/ασφάλεια και κβαντικούς αισθητήρες), με μελέτες να εκτιμούν ότι η συνολική αγορά μπορεί να προσεγγίσει τα 90–100 δις. ευρώ έως το 2035, εφόσον επιτευχθεί τεχνολογική και εμπορική ωρίμανση (EPO-OECD, 2025; McKinsey, 2025). Πρόσφατη κοινή ανάλυση του European Patent Office και του OECD δείχνει ότι ο αριθμός οικογενειών διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας σε κβαντικές τεχνολογίες αυξήθηκε περίπου πέντε φορές την τελευταία δεκαετία, με τις ΗΠΑ, την Ευρώπη και την Ασία να συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος της σχετικής καινοτομίας, ενώ η μεγάλη πλειοψηφία των quantum startups έχει ιδρυθεί τα τελευταία δέκα χρόνια (EPO-OECD, 2025; The Landscape of the Quantum Start-up Ecosystem, 2022).

Υπό το πρίσμα αυτό, το Κεφάλαιο 3 εξετάζει πώς διαμορφώνεται και λειτουργεί το παγκόσμιο οικοσύστημα κβαντικών τεχνολογιών και startups, συνδέοντας εθνικές στρατηγικές, δημόσιες επενδύσεις, clusters και επιχειρηματική δραστηριότητα (OECD, 2025; European Commission, 2023). Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται: η παγκόσμια χαρτογράφηση του quantum ecosystem, οι κύριες κατηγορίες quantum startups, οι τάσεις χρηματοδότησης και οι υποστηρικτικοί μηχανισμοί όπως incubators και accelerators, ενδεικτικά παραδείγματα διεθνών εταιρειών και startups, καθώς και οι προοπτικές για την Ευρώπη και ειδικότερα για την Ελλάδα (Purohit et al., 2023; VivaTech, 2025).

3.1 Παγκόσμια χαρτογράφηση του οικοσυστήματος κβαντικών τεχνολογιών

Οι κβαντικές τεχνολογίες εντάσσονται στην αποκαλούμενη «δεύτερη κβαντική επανάσταση», κατά την οποία η αξιοποίηση φαινομένων όπως η υπέρθεση και η διεμπλοκή δεν περιορίζεται πλέον σε εργαστηριακό επίπεδο, αλλά συνδέεται με την ανάπτυξη πρακτικών εφαρμογών σε υπολογιστές, επικοινωνίες και αισθητήρες (OECD, 2025a; OECD, 2025b). Σταδιακά, ο τομέας μετακινείται από ένα καθαρά επιστημονικό παράδειγμα σε ένα υβριδικό μοντέλο επιστήμης-τεχνολογίας-αγοράς, όπου δημόσια ερευνητικά ιδρύματα, μεγάλες εταιρείες και νεοφυείς επιχειρήσεις συνδιαμορφώνουν τις τεχνολογικές και επιχειρηματικές κατευθύνσεις (EPO-OECD, 2025). Η μετάβαση αυτή συνοδεύεται από έντονη γεωπολιτική διάσταση, καθώς οι κβαντικές τεχνολογίες συνδέονται με ζητήματα εθνικής ασφάλειας, ευρύτερης αυτονομίας και τεχνολογικής κυριαρχίας, οδηγώντας ολόένα και περισσότερα κράτη στην υιοθέτηση ειδικών εθνικών στρατηγικών (OECD, 2025a; ECIPE, 2025). Σύμφωνα με πρόσφατες αναλύσεις, πάνω από τριάντα χώρες έχουν ανακοινώσει ή επικαιροποιήσει εθνικά σχέδια δράσης για τις κβαντικές τεχνολογίες, ενώ διαμορφώνονται υπερεθνικές πρωτοβουλίες συντονισμού σε Ευρώπη, Βόρεια Αμερική και Ασία (OECD, 2025a; OECD, 2025b).

Η κοινή μελέτη Mapping the Global Quantum Ecosystem του European Patent Office και του OECD επιχειρεί μια συστηματική χαρτογράφηση του διεθνούς οικοσυστήματος, αξιοποιώντας δεδομένα για πατέντες, επιχειρήσεις, επενδύσεις και ανθρώπινο δυναμικό (EPO-OECD, 2025). Τα ευρήματα δείχνουν ότι οι διεθνείς οικογένειες πατεντών σε κβαντικές τεχνολογίες αυξήθηκαν πολλαπλάσια μεταξύ 2005 και 2024, με την περίοδο μετά το 2015 να χαρακτηρίζεται από πολύ έντονη επιτάχυνση (EPO-OECD, 2025). Παράλληλα, η πλειονότητα των εταιρειών που δραστηριοποιούνται στον τομέα έχει ιδρυθεί την τελευταία δεκαετία, πράγμα που υποδηλώνει ότι το οικοσύστημα βρίσκεται ακόμη

σε πρώιμο, αλλά ταχέως αναπτυσσόμενο στάδιο, με μεγάλη συγκέντρωση δραστηριότητας σε λίγα κέντρα αριστείας (EPO-OECD, 2025; ECIPE, 2025). Η μελέτη σημειώνει επίσης ότι η κβαντική καινοτομία εξαρτάται κυρίως από στενές συνεργασίες μεταξύ δημόσιας έρευνας, startups και καθιερωμένων επιχειρήσεων, καθώς και από την ύπαρξη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού, το οποίο ήδη αποτελεί βασικό περιοριστικό πόρο (OECD, 2025b; EPO-OECD, 2025).

Σε επίπεδο δημόσιας πολιτικής, διαμορφώνονται διαφορετικά αλλά εν μέρει συγκλίνοντα μοντέλα εθνικών στρατηγικών (OECD, 2025a; OECD, 2025b). Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το National Quantum Initiative Act έθεσε θεσμικό πλαίσιο για συντονισμένη ομοσπονδιακή χρηματοδότηση, με έμφαση στη δημιουργία εθνικών κβαντικών κέντρων, στη συνεργασία με τη βιομηχανία και στη σύνδεση με προγράμματα άμυνας (OECD, 2025a). Η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω του προγράμματος Quantum Flagship και συναφών πρωτοβουλιών, επιδιώκει να διαμορφώσει μια «ομπρέλα» ερευνητικών και καινοτομικών δράσεων, συνδέοντάς τες με εθνικούς οδικούς χάρτες και επιμέρους clusters σε κράτη-μέλη (European Commission, 2023; OECD, 2025b). Στην Ασία, η Κίνα και η Ιαπωνία υλοποιούν μεγάλης κλίμακας προγράμματα με σαφείς ποσοτικούς στόχους, επενδύοντας τόσο σε υποδομές (π.χ. δίκτυα κβαντικών επικοινωνιών) όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές, ενώ περιφερειακοί παίκτες όπως η Σιγκαπούρη και η Αυστραλία αναπτύσσουν εθνικά κέντρα κβαντικών τεχνολογιών με έντονη κρατική καθοδήγηση (OECD, 2025a; OECD, 2025b).

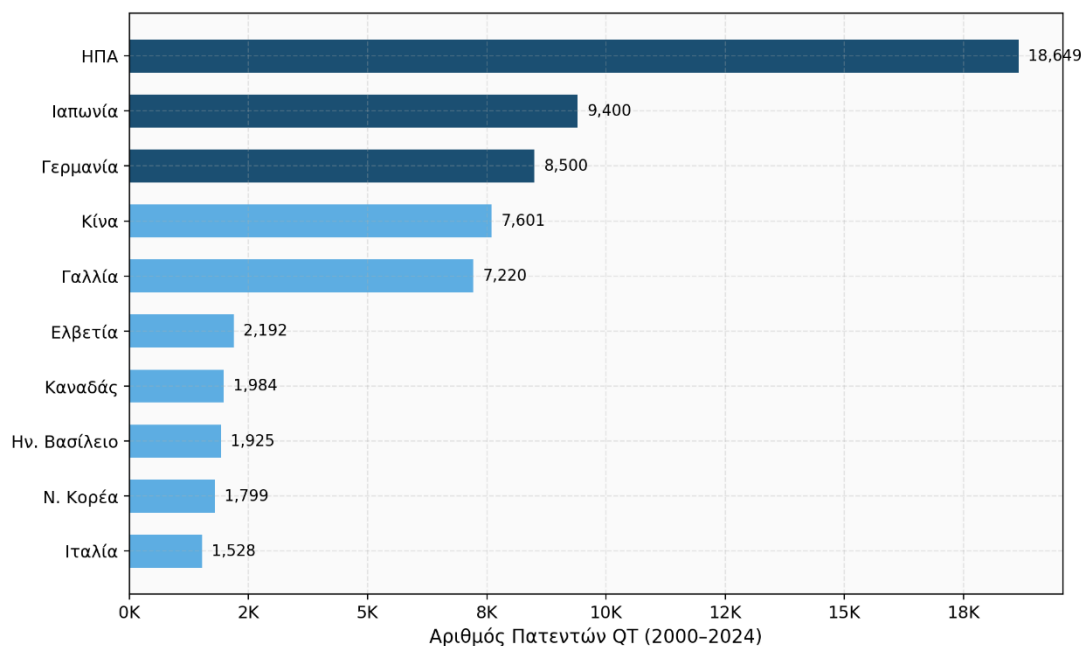
Οι δημόσιες επενδύσεις σε κβαντικές τεχνολογίες έχουν αυξηθεί εντυπωσιακά την τελευταία δεκαετία, τόσο σε απόλυτους όρους όσο και ως ποσοστό της συνολικής χρηματοδότησης έρευνας και καινοτομίας (OECD, 2025a; OECD, 2025b). Εκτιμάται ότι ο σωρευτικός όγκος επενδύσεων σε «core quantum firms» την περίοδο 2014–2024 προσεγγίζει τα 20 δισ. δολάρια, καλύπτοντας περίπου το 85% των καταγεγραμμένων διεθνών επενδύσεων στον κλάδο (EPO-OECD, 2025; McKinsey, 2025). Οι Ηνωμένες Πολιτείες απορροφούν πολύ μεγάλο ποσοστό της ιδιωτικής χρηματοδότησης, ενώ σε άλλες περιοχές (όπως η ηπειρωτική Ευρώπη) παρατηρείται ισχυρή ερευνητική βάση αλλά υστέρηση σε μεγάλης κλίμακας επενδυτικά σχήματα και σε ώριμα επιχειρηματικά μοντέλα (McKinsey, 2025; ECIPE, 2025). Στην Ευρώπη εργαλεία μικτής χρηματοδότησης, όπως το EIC Accelerator και τα Important Projects of Common European Interest (IPCEI), επιχειρούν να καλύψουν το χρηματοδοτικό κενό μεταξύ βασικής έρευνας και εμπορικής κλιμάκωσης, παρέχοντας επιχορηγήσεις και equity σε deep-tech και quantum startups (European Commission, 2023; OECD, 2025b).

Πέρα από το συνολικό ύψος επενδύσεων, μεγάλη σημασία έχει και η χωρική κατανομή τους, καθώς το παγκόσμιο οικοσύστημα οργανώνεται γύρω από πυκνά διεθνή clusters (ECIPE, 2025; EPO-OECD, 2025). Μελέτη για τα global quantum clusters δείχνει ότι πάνω από το 95% της χρηματοδότησης προς quantum εταιρείες κατευθύνεται σε επιχειρήσεις που εδρεύουν εντός τέτοιων clusters, ποσοστό που αυξήθηκε από περίπου 92% πριν το 2023, υποδηλώνοντας ισχυρή τάση γεωγραφικής συγκέντρωσης δραστηριότητας (ECIPE, 2025). Τα clusters αυτά ορίζονται ως γεωγραφικές συγκεντρώσεις πανεπιστημίων, ερευνητικών ινστιτούτων, μεγάλων εταιρειών και startups, οι οποίες συνδέονται μέσω κοινών υποδομών, ειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού και επενδυτικών μηχανισμών (ECIPE, 2025; EPO-OECD, 2025). Η ύπαρξη εξειδικευμένων οικοσυστημάτων λειτουργεί πολλαπλασιαστικά, διευκολύνοντας τη μεταφορά γνώσης, τη δημιουργία spin-offs, τη σύναψη συνεργασιών και την προσέλκυση ιδιωτικών κεφαλαίων, και οδηγεί σε περαιτέρω συγκέντρωση δραστηριότητας σε λίγες παγκόσμιες «μητροπόλεις» της κβαντικής καινοτομίας (ECIPE, 2025; OECD, 2025b).

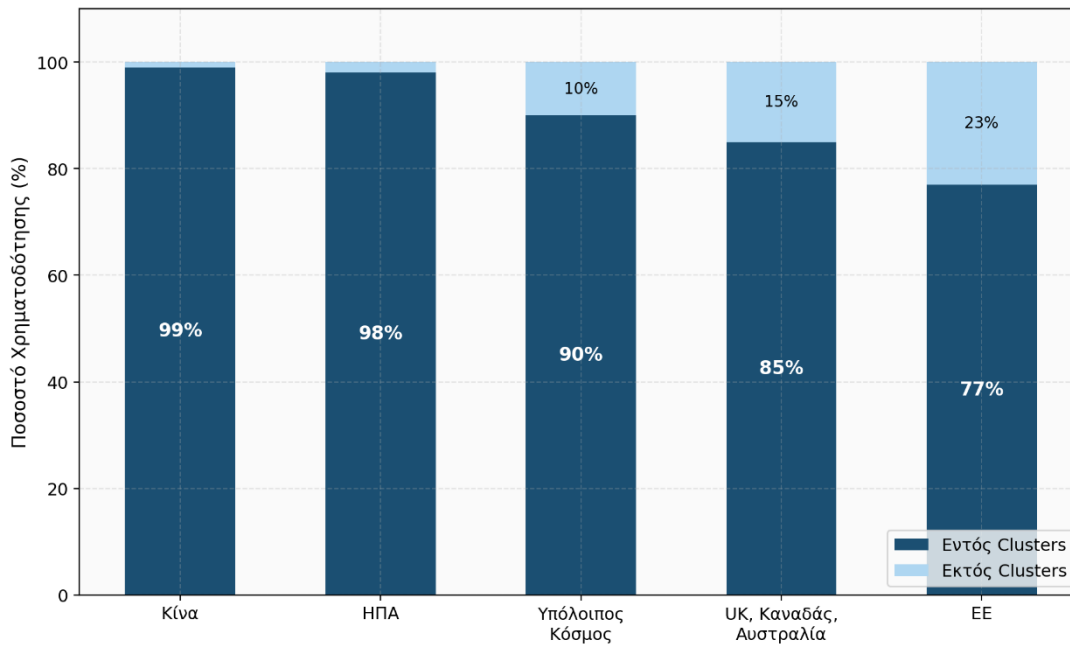
Βάσει αυτού, στην Ευρώπη αναδεικνύονται ισχυρά clusters στο Ηνωμένο Βασίλειο (άξονας Oxford-Cambridge-London), στη Γερμανία και την Ολλανδία (π.χ. Munich, Berlin, Delft), στη Γαλλία (περιοχή Paris-Saclay) και στη Φινλανδία, όπου συνδυάζονται μακρά ερευνητική παράδοση με την παρουσία εξειδικευμένων startups και μεγάλων βιομηχανικών εταιρών (ECIPE, 2025; European Commission, 2023). Στη Βόρεια Αμερική, η Bay Area, η Βοστώνη και το Waterloo στον Καναδά αποτελούν

χαρακτηριστικά παραδείγματα οικοσυστημάτων όπου venture capital, πανεπιστήμια και τεχνολογικοί κολοσσοί λειτουργούν συμπληρωματικά, δημιουργώντας περιβάλλον ευνοϊκό για την ταχεία κλιμάκωση νέων επιχειρηματικών σχημάτων (EPO-OECD, 2025; McKinsey, 2025). Στην Ασία, σημαντικά κέντρα διαμορφώνονται σε περιοχές της Κίνας, της Ιαπωνίας, της Σιγκαπούρης και της Αυστραλίας, συχνά με έντονη κρατική καθοδήγηση και μεγάλες δημόσιες επενδύσεις σε εθνικά «quantum centers», αντανakλώντας την πρόθεση αυτών των χωρών να τοποθετηθούν ως πρώιμοι ηγέτες στον κλάδο (OECD, 2025a; OECD, 2025b). Αναλύσεις πολιτικής επισημαίνουν τον κίνδυνο δημιουργίας ενός «quantum divide» μεταξύ χωρών που διαθέτουν ανεπτυγμένα clusters και εκείνων που παραμένουν περιφερειακοί καταναλωτές τεχνολογίας, γεγονός που ενισχύει τη σημασία διεθνών σχημάτων συνεργασίας και μεταφοράς τεχνογνωσίας (ECIPE, 2025; OECD, 2025b).

Σε επίπεδο λειτουργίας, το παγκόσμιο οικοσύστημα κβαντικών τεχνολογιών παραμένει σε φάση ταυτόχρονης ωρίμανσης και αβεβαιότητας (OECD, 2025a; EPO-OECD, 2025). Από τη μία πλευρά, η αύξηση των πατεντών, των startups και των επενδύσεων συνιστά ένδειξη ισχυρής δυναμικής και φάσης «κβαντικού ενθουσιασμού», ενώ οι κυβερνήσεις αναγνωρίζουν όλο και περισσότερο την ανάγκη στοχευμένης στήριξης (EPO-OECD, 2025; McKinsey, 2025). Από την άλλη πλευρά, οι τεχνολογικές προκλήσεις, τα εμπόδια στη βιομηχανική υιοθέτηση και οι περιορισμοί σε ανθρώπινο δυναμικό και σημαντικές εφοδιαστικές αλυσίδες δημιουργούν ένα περιβάλλον υψηλής αβεβαιότητας για επιχειρήσεις και επενδυτές (OECD, 2025b; OECD, 2025a). Οι τάσεις αυτές καθιστούν αναγκαία μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση πολιτικής, που θα συνδυάζει τη στήριξη της έρευνας με μέτρα για την ανάπτυξη αγορών, τη διαχείριση κινδύνων και την ενίσχυση της διεθνούς συνεργασίας, στοιχεία που επηρεάζουν άμεσα και τη διαμόρφωση των οικοσυστημάτων κβαντικών startups που αναλύονται στο επόμενο υποκεφάλαιο (OECD, 2025b; ECIPE, 2025).



Σχήμα 3 Κατανομή πατεντών κβαντικών τεχνολογιών ανά χώρα, 2000–2024 (OECD, 2025 · ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 4 Συγκέντρωση χρηματοδότησης εντός κβαντικών clusters ανά γεωγραφική περιοχή (ECIPE, 2025 · ίδια επεξεργασία)

Χώρα/Περιοχή	Δημ. Επένδυση	Startups	Βασικοί Παίκτες	Εστίαση
ΗΠΑ	>\$5 δισ.	>200	IBM, Google, IonQ, Rigetti	Full-stack, εμπορική ωρίμανση
ΕΕ	>€7 δισ.	>150	Pasqal, IQM, Quandela	Αυτονομία, open science
Κίνα	>\$15 δισ.	-	Baidu, Alibaba, Origin QC	Quantum comms, ασφάλεια
Καναδάς	>\$1 δισ.	~40	Xanadu, D-Wave	Photonics, software
Ην. Βασίλειο	£2.5 δισ.	~40	Oxford QC, Cambridge QC	Hardware, QC hubs
Ελλάδα	Περιορισμένη	-	ΕΚΠΑ, ΕΜΠ, ΑΠΘ	Ακαδημαϊκή, EU Flagship

Πίνακας 7 Παγκόσμιο οικοσύστημα κβαντικών τεχνολογιών (OECD, 2025; Seskir et al., 2022 · ίδια επεξεργασία)

3.2 Κατηγορίες και χαρακτηριστικά των quantum startups

Η διεθνής βιβλιογραφία έχει αρχίσει τα τελευταία χρόνια να χαρτογραφεί συστηματικά το αναδυόμενο οικοσύστημα των κβαντικών startups, επιχειρώντας να ορίσει τόσο το τι συνιστά «quantum start-up» όσο και τις κύριες κατηγορίες στις οποίες αυτές μπορούν να ταξινομηθούν (Seskir & Korkmaz, 2022; McKinsey, 2025). Ένα βασικό κριτήριο είναι ότι οι εταιρείες αυτές έχουν ως κύρια εστίαση τις κβαντικές τεχνολογίες, είτε στο επίπεδο της βασικής υποδομής είτε στο επίπεδο εφαρμογών και υπηρεσιών, και όχι απλώς περιστασιακή αξιοποίησή τους σε επιμέρους έργα (Seskir & Korkmaz, 2022). Εκτός αυτού, τα περισσότερα quantum startups εντάσσονται στην κατηγορία των deep-tech επιχειρήσεων, καθώς απαιτούν έντονη ερευνητική δραστηριότητα, μακροχρόνιους κύκλους ανάπτυξης προϊόντος και υψηλές αρχικές επενδύσεις πριν την επίτευξη σημαντικών εσόδων

(McKinsey, 2025). Αυτή η ιδιαιτερότητα διαφοροποιεί το προφίλ τους από κλασικές ψηφιακές startups και επηρεάζει τόσο τα επιχειρηματικά μοντέλα όσο και τις ανάγκες χρηματοδότησης.

Μια από τις πιο αναλυτικές μελέτες, το *The Landscape of the Quantum Start-up Ecosystem*, προτείνει μια τυπολογία έξι βασικών κατηγοριών κβαντικών startups, με βάση το τεχνολογικό αντικείμενο και τη θέση τους στην αλυσίδα αξίας (Seskir & Korkmaz, 2022). Συγκεκριμένα, οι συγγραφείς διακρίνουν: (i) complementary technologies, (ii) quantum computing (hardware), (iii) quantum computing (software / application / simulation), (iv) quantum cryptography / communication, (v) quantum sensing and metrology και (vi) supporting companies (Seskir & Korkmaz, 2022). Η ταξινόμηση αυτή επιτρέπει αφενός την κατανόηση του πού συγκεντρώνεται η επιχειρηματική δραστηριότητα και αφετέρου την ανάλυση των διαφορετικών προκλήσεων που αντιμετωπίζουν οι εταιρείες σε κάθε κατηγορία. προσφέρει ένα χρήσιμο πλαίσιο για τη συσχέτιση των startups με τα επιστημονικά πεδία, τις απαιτήσεις υποδομής και τις πιθανές αγορές-στόχους.

Οι εταιρείες quantum computing hardware αποτελούν την πιο «βαριά» τεχνολογικά κατηγορία, εστιάζοντας στην ανάπτυξη φυσικών πλατφορμών κβαντικών bits (qubits), συστημάτων ελέγχου και υποστηρικτικών υποδομών (Seskir & Korkmaz, 2022; McKinsey, 2025). Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται startups που αναπτύσσουν υπεραγωγικά qubits, παγιδευμένα ιόντα, φωτονικές πλατφόρμες ή εναλλακτικές αρχιτεκτονικές, καθώς και επιχειρήσεις που εξειδικεύονται σε κεντρικές τεχνολογίες, όπως κρυογενικά συστήματα, ενισχυτές μικροκυμάτων και συστήματα σταθεροποίησης (Seskir & Korkmaz, 2022). Οι εταιρείες αυτές χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλό CAPEX, έντονη εξάρτηση από επιστημονικές συνεργασίες και μακροχρόνιο ορίζοντα μέχρι την εμπορική ωρίμανση, με αποτέλεσμα να βασίζονται συχνά σε μεγάλους γύρους χρηματοδότησης και συνεργασίες με βιομηχανικούς εταίρους (McKinsey, 2025). Πέρα από αυτό, αποτελούν συχνά «άγκυρες» για την ανάπτυξη τοπικών οικοσυστημάτων, γύρω από τις οποίες συγκεντρώνονται προμηθευτές, ερευνητικοί εταίροι και εξειδικευμένα ταλέντα.

Δίπλα στις hardware εταιρείες αναπτύσσεται ένα ταχύτατα διεκρινόμενο οικοσύστημα startups που δραστηριοποιούνται στο quantum computing software, στις εφαρμογές και στη προσομοίωση (Seskir & Korkmaz, 2022; Oezratty, 2022). Οι εταιρείες αυτές αναπτύσσουν λογισμικό, αλγορίθμους και πλατφόρμες που επιτρέπουν την εφαρμογή των κβαντικών υπολογιστών σε συγκεκριμένες εφαρμογές, από τη βελτιστοποίηση και τη μηχανική μάθηση μέχρι τη χημική προσομοίωση και την ανάλυση χρηματοοικονομικού κινδύνου (McKinsey, 2025; Specter Insights, 2025). Συχνά υιοθετούν μοντέλα «quantum-as-a-service», παρέχοντας πρόσβαση σε κβαντικούς πόρους μέσω cloud και προσφέροντας εξειδικευμένες υπηρεσίες συμβουλευτικής για την ενσωμάτωση κβαντικών αλγορίθμων σε υφιστάμενες ροές εργασίας (McKinsey, 2025). Λόγω της χαμηλότερης ανάγκης για βαριά φυσική υποδομή, τα software-oriented quantum startups μπορούν να ιδρυθούν και να αναπτυχθούν σε μεγαλύτερο αριθμό γεωγραφικών περιοχών, αλλά παραμένουν εξαρτημένα από την πρόσβαση σε κατάλληλα hardware backends και από τη γενικότερη ωρίμανση της αγοράς.

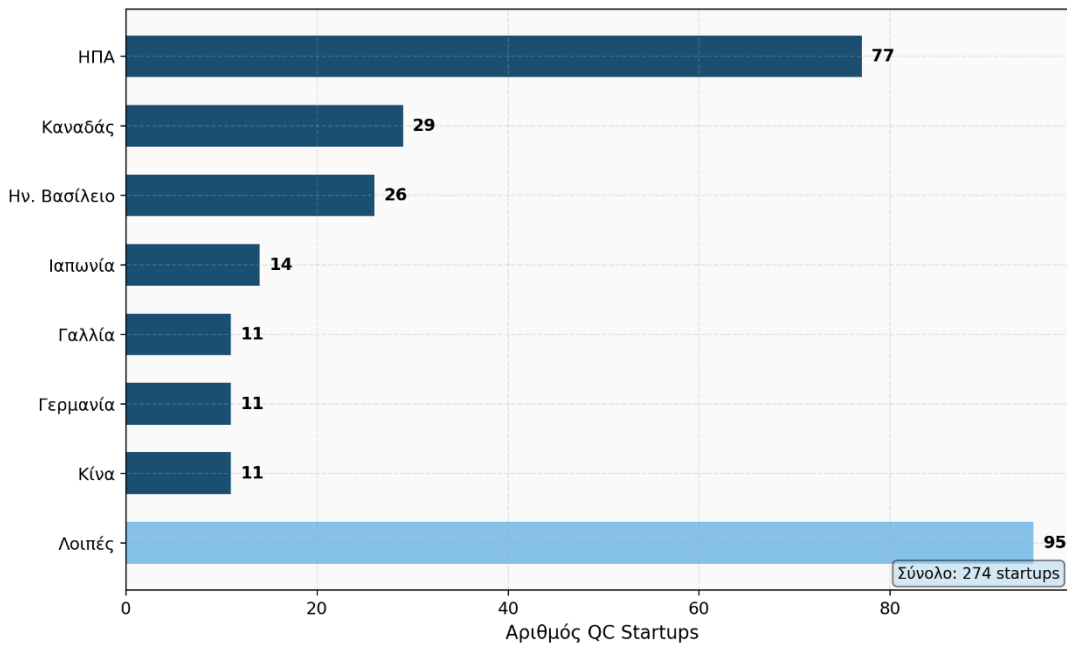
Μια τρίτη σημαντική κατηγορία αφορά τις startups που εστιάζουν στην κβαντική κρυπτογραφία και τις κβαντικές επικοινωνίες, που στηρίζονται σε φαινόμενα όπως η διεμπλοκή και η αρχή της αβεβαιότητας για την ανάπτυξη ασφαλών συστημάτων μετάδοσης πληροφοριών (Seskir & Korkmaz, 2022). Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται εταιρείες που αναπτύσσουν συστήματα quantum key distribution (QKD), δίκτυα κβαντικών επικοινωνιών και σχετικές υποδομές, καθώς και εταιρείες που παρέχουν λύσεις «post-quantum» κρυπτογραφίας και υβριδικές αρχιτεκτονικές ασφαλείας (OECD, 2025b; McKinsey, 2025). Η ζήτηση για τέτοιες λύσεις συνδέεται τόσο με την αυξανόμενη ευαισθησία σε θέματα κυβερνοασφάλειας όσο και με τις ανησυχίες για τη μελλοντική ικανότητα κβαντικών υπολογιστών να «σπάσουν» υφιστάμενα κρυπτογραφικά πρωτόκολλα (OECD, 2025b). Ωστόσο, η

υιοθέτηση σχετικών προϊόντων εξαρτάται κυρίως από ρυθμιστικές εξελίξεις, πρότυπα και τη διάθεση των οργανισμών να επενδύσουν προληπτικά σε υποδομές κβαντικής ασφάλειας.

Αντίστοιχα, ουσιώδη ανάπτυξη παρατηρείται στον χώρο των quantum sensing and metrology startups, οι οποίες βασίζονται σε τις κβαντικές ιδιότητες για την επίτευξη πολύ ακριβών μετρήσεων σε πεδία όπως η χρονομέτρηση, η ναυσυλλογή, οι γεωφυσικές μετρήσεις και η ιατρική απεικόνιση (Seskir & Korkmaz, 2022; OECD, 2025b). Εταιρείες αυτής της κατηγορίας αναπτύσσουν, για παράδειγμα, ατομικά ρολόγια νέας γενιάς, κβαντικούς μαγνητομέτρους ή αισθητήρες βαρύτητας, με εφαρμογές σε αμυντικά συστήματα, δορυφορικές υποδομές, βιομηχανική παρακολούθηση και υγειονομική τεχνολογία (OECD, 2025b). Σε αντίθεση με τον χώρο του quantum computing, όπου η πρακτική «κβαντική υπεροχή» παραμένει εν μέρει μελλοντικός στόχος, αρκετές εφαρμογές κβαντικής αίσθησης βρίσκονται πιο κοντά στην εμπορική χρήση, δημιουργώντας ευκαιρίες για ταχύτερη είσοδο στην αγορά (McKinsey, 2025). Αυτό κάνει τα sensing startups έναν από τους πιο υποσχόμενους υποτομείς για πρώιμη δημιουργία αξίας και πιλοτικά έργα με βιομηχανικούς και δημόσιους φορείς.

Οι κατηγορίες complementary technologies και supporting companies περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα επιχειρήσεων που παρέχουν βασικές «ενδιάμεσες» τεχνολογίες, εξειδικευμένες υπηρεσίες ή υποστηρικτικές λειτουργίες για το σύνολο του κβαντικού οικοσυστήματος (Seskir & Korkmaz, 2022). Στις complementary technologies ανήκουν, για παράδειγμα, εταιρείες που αναπτύσσουν κρυογενικά συστήματα, ειδικούς ανιχνευτές, οπτικά και ηλεκτρονικά υποσυστήματα ή λογισμικό προσομοίωσης κβαντικών συστημάτων, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από πολλαπλές κατηγορίες quantum παικτών (Seskir & Korkmaz, 2022; Oezratty, 2022). Οι supporting companies, μπορεί να εξειδικεύονται σε υπηρεσίες εκπαίδευσης, συμβουλευτικής, ανάπτυξης ανθρώπινου δυναμικού ή σε ρόλο integrator, συνδέοντας διαφορετικά τεχνολογικά δομικά στοιχεία σε ολοκληρωμένες λύσεις για τελικούς πελάτες (McKinsey, 2025). Αν και αυτές οι εταιρείες συχνά δεν βρίσκονται στο επίκεντρο της δημόσιας συζήτησης, αποτελούν σημαντικό στοιχείο για τη βιωσιμότητα και την κλιμάκωση του κβαντικού οικοσυστήματος στο σύνολό του.

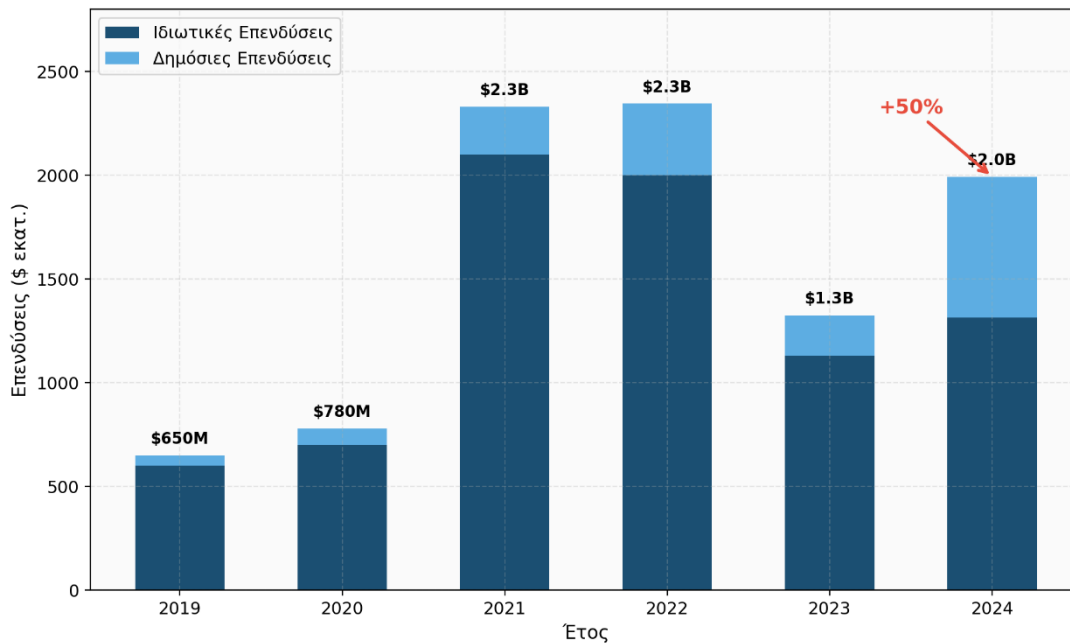
Τα εμπειρικά δεδομένα δείχνουν ότι η μεγάλη πλειονότητα των quantum startups έχει ιδρυθεί την τελευταία δεκαετία και ότι ένα μέρος τους εντοπίζεται σε λίγες χώρες, με κυρίαρχες τις ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο και τον Καναδά (Seskir & Korkmaz, 2022; McKinsey, 2025). Η κατανομή ανά κατηγορία διαφοροποιείται γεωγραφικά: σε ορισμένες χώρες υπερισχύουν οι hardware εταιρείες, ενώ σε άλλες κυριαρχούν τα software, communication ή sensing startups, αντανakλώντας τη διαθεσιμότητα υποδομών, τη δομή της βιομηχανικής βάσης και τις εθνικές προτεραιότητες πολιτικής (Seskir & Korkmaz, 2022; OECD, 2025b). Επιπλέον, η ένταση της startup δραστηριότητας φαίνεται να συνδέεται με την ύπαρξη εθνικών πρωτοβουλιών και την πρόσβαση σε εξειδικευμένη χρηματοδότηση, με ορισμένες μελέτες να υποστηρίζουν ότι χαμηλά επίπεδα κβαντικών startups σε μια χώρα μπορεί να αποτελέσουν προάγγελο μελλοντικής υιοθέτησης εθνικών στρατηγικών, οι οποίες στη συνέχεια ενισχύουν τη δημιουργία νέων εταιρειών (Seskir & Korkmaz, 2022). Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, η κατανόηση των κατηγοριών και χαρακτηριστικών των quantum startups είναι σημαντική για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών πολιτικών στήριξης, αλλά και για την αποτίμηση των προοπτικών ανάπτυξης σε επιμέρους εθνικά και περιφερειακά οικοσυστήματα.



Σχήμα 5 Γεωγραφική κατανομή κβαντικών startups ανά χώρα (Seskir et al., 2022 · Ίδια επεξεργασία)

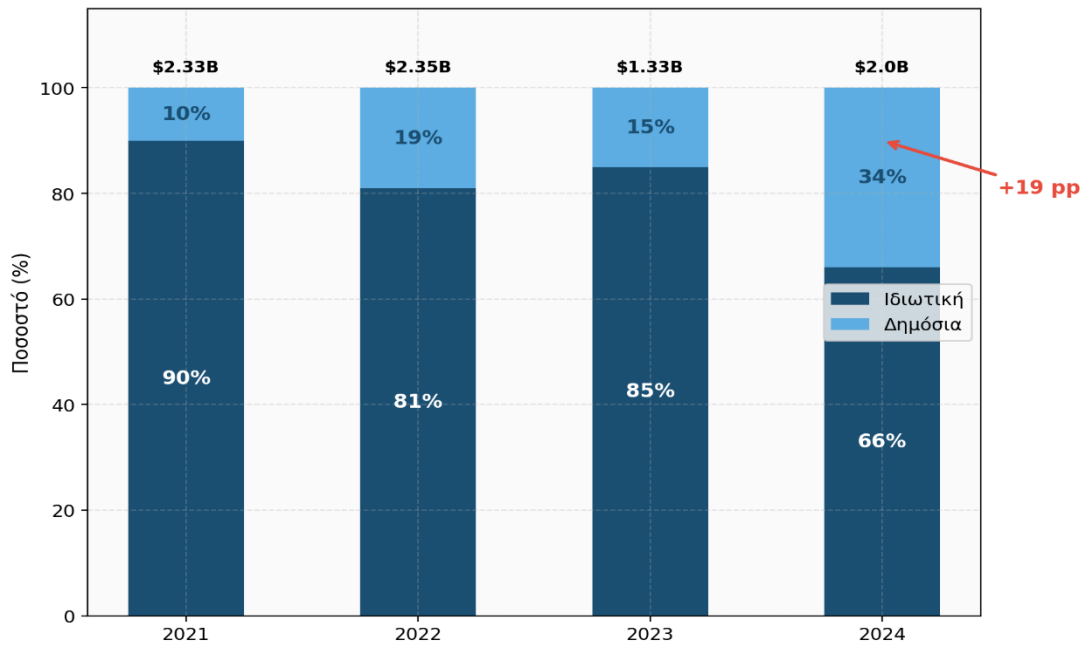
3.3 Τάσεις χρηματοδότησης και υποστηρικτικοί μηχανισμοί για τις quantum startups

Η χρηματοδότηση των quantum startups ακολουθεί έντονα ανοδική πορεία την τελευταία πενταετία, με τις διεθνείς επενδύσεις να αυξάνονται τόσο σε όγκο όσο και σε μέγεθος γύρων. Εκτιμάται ότι μόνο το 2024 οι επενδύσεις σε κβαντικές startups ξεπέρασαν τα 2 δισ. δολάρια, σημειώνοντας αύξηση περίπου 50% σε σχέση με το 2023, ενώ το 2025 καταγράφηκε περαιτέρω επιτάχυνση, με την αγορά να εισέρχεται σε φάση κεφαλαιουχικής εντατικοποίησης και πιο ώριμων επενδυτικών σχημάτων. Η ενεργή αυτή τάση ερμηνεύεται ως ένδειξη ενισχυμένης εμπιστοσύνης των επενδυτών στην τεχνολογική ωρίμανση του κλάδου και στις μεσο-μεγάλης εμβέλειας προοπτικές δημιουργίας αξίας, παρά τις υφιστάμενες τεχνολογικές και αγοραστικές αβεβαιότητες.

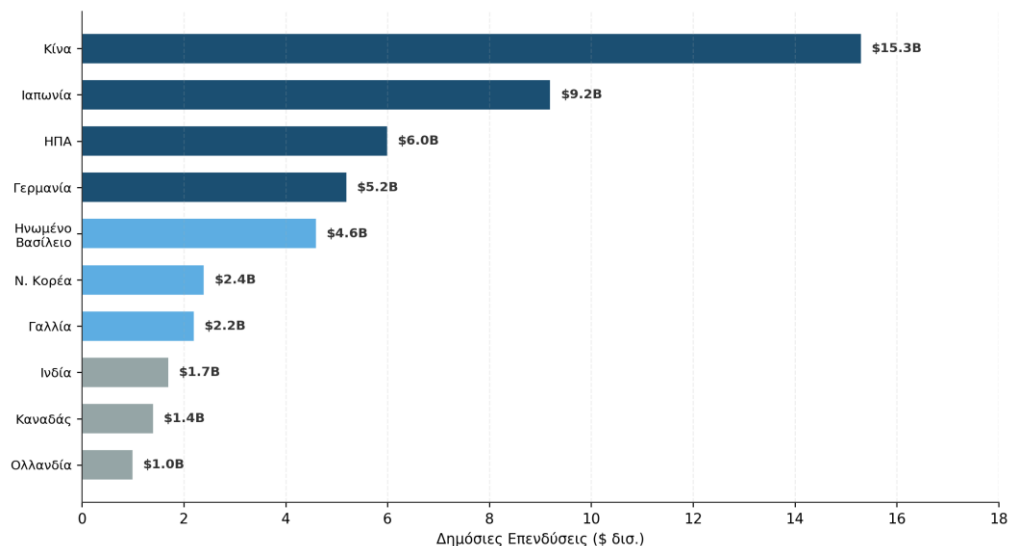


Σχήμα 6 Εξέλιξη ιδιωτικών και δημοσίων επενδύσεων σε κβαντικές startups, 2019–2024 (McKinsey, 2024 · Ίδια επεξεργασία)

Σε επίπεδο ιδιωτικής χρηματοδότησης, τα μοντέλα venture capital και private equity εξακολουθούν να αποτελούν τις κυριότερες πηγές κεφαλαίων για τις quantum startups, με σαφή όμως μετατόπιση προς μεγαλύτερους, μεταγενέστερους γύρους (Series B και άνω). Αναλύσεις για το 2024–2025 δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος της χρηματοδότησης συγκεντρώνεται σε λίγους «πρωταθλητές» του κλάδου, με ορισμένες εταιρείες hardware, όπως οι PsiQuantum και Quantinuum, να απορροφούν σημαντικό ποσοστό του συνολικού επενδυμένου κεφαλαίου, συχνά μέσω γύρων που συνδυάζουν ιδιωτικά κεφάλαια και δημόσια στήριξη. Αυξάνεται ο ρόλος του corporate venture capital, καθώς μεγάλες τεχνολογικές και χρηματοπιστωτικές εταιρείες δημιουργούν θεματικά funds ή συμμετέχουν σε γύρους χρηματοδότησης, επιδιώκοντας βασική πρόσβαση σε τεχνογνωσία και μελλοντικές εφαρμογές κβαντικών τεχνολογιών. Αυτό οδηγεί σε ένα πιο σύνθετο επενδυτικό τοπίο, όπου συνυπάρχουν κλασικά VC funds, εταιρικά σχήματα και υβριδικά μοντέλα δημόσιου-ιδιωτικού co-funding.



Σχήμα 7 Ποσοστιαία κατανομή ιδιωτικής και δημόσιας χρηματοδότησης κβαντικών τεχνολογιών, 2021–2024 (McKinsey, 2024; OECD, 2025 · ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 8 Δημόσιες επενδύσεις σε κβαντικές τεχνολογίες ανά χώρα, \$ δισ. (McKinsey QT Monitor, 2025 · ίδια επεξεργασία)

Παράλληλα με την ιδιωτική χρηματοδότηση, η δημόσια στήριξη παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των όρων εισόδου και ανάπτυξης των quantum startups. Τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται ειδικά χρηματοδοτικά εργαλεία για deep-tech και κβαντικές τεχνολογίες, τα οποία συνδυάζουν επιχορηγήσεις, δάνεια και συμμετοχικά κεφάλαια, μειώνοντας τον κίνδυνο για ιδιώτες επενδυτές και διευκολύνοντας τη μετάβαση από το εργαστήριο στην αγορά. Στην ευρωπαϊκή περίπτωση, χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το EIC Accelerator, που παρέχει blended finance (grant + equity) σε επιλεγμένες startups υψηλής τεχνολογίας, περιλαμβάνοντας τακτικά κβαντικές εταιρείες σε κύκλους χρηματοδότησης με προϋπολογισμούς εκατοντάδων εκατομμυρίων ευρώ. Αντίστοιχα, σε εθνικό επίπεδο, προγράμματα στήριξης deep-tech επιχειρήσεων και σχήματα

συμπληρωματικής χρηματοδότησης με εθνικά ή περιφερειακά ταμεία επιχειρούν να γεφυρώσουν το «χρηματοδοτικό κενό» της πρώιμης φάσης, ιδίως για εταιρείες με έντονη ερευνητική συνιστώσα.

Σημαντικό ρόλο στο οικοσύστημα χρηματοδότησης και ανάπτυξης των quantum startups διαδραματίζουν επίσης εξειδικευμένα incubators και accelerators, τα οποία συνδυάζουν πρόσβαση σε κεφάλαιο με παροχή υποστηρικτικών υπηρεσιών. Τα προγράμματα αυτά παρέχουν, πέρα από μικρή αρχική χρηματοδότηση, πρόσβαση σε εξειδικευμένη τεχνική υποστήριξη, σε κβαντικό hardware μέσω συνεργασιών με παρόχους cloud ή ερευνητικά κέντρα, καθώς και σε διεθνή δίκτυα μέντορων, επενδυτών και πιθανών πελατών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν θεματικά accelerators για quantum και advanced AI, όπως το QAI Ventures, αλλά και ευρύτερες πλατφόρμες και καταλόγοι, που χαρτογραφούν εκατοντάδες accelerators, incubators και επενδυτές με εξειδίκευση σε κβαντικές και φωτονικές τεχνολογίες, διευκολύνοντας την αντιστοίχιση μεταξύ startups και κατάλληλων υποστηρικτικών μηχανισμών. Για πολλές νεοφυείς επιχειρήσεις, η συμμετοχή σε τέτοια προγράμματα αποτελεί ουσιαστικό βήμα για την ωρίμανση του επιχειρηματικού μοντέλου, την απόκτηση αξιοπιστίας απέναντι σε επενδυτές και την πρόσβαση σε πρώιμους πελάτες.

Παρά την αύξηση της διαθεσιμότητας κεφαλαίων και υποστηρικτικών μηχανισμών, η χρηματοδότηση των quantum startups παραμένει άνισα κατανομημένη, τόσο γεωγραφικά όσο και διατομεακά. Οι μεγάλες οικονομίες με ανεπτυγμένα ερευνητικά οικοσυστήματα και επενδυτικά κέντρα (ΗΠΑ, Ηνωμένο Βασίλειο, Καναδάς, ορισμένα κράτη-μέλη της ΕΕ) απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος των ιδιωτικών επενδύσεων, ενώ πολλές χώρες με αναδυόμενα οικοσυστήματα αντιμετωπίζουν σημαντικά εμπόδια πρόσβασης σε εξειδικευμένη χρηματοδότηση (McKinsey, 2025; OECD, 2025b). Η συγκέντρωση κεφαλαίων σε λίγες μεγάλες hardware εταιρείες περιορίζει την ποσότητα κεφαλαίων που είναι διαθέσιμα για νεότερες ή πιο ριψοκίνδυνες εταιρείες λογισμικού και εφαρμογών, δημιουργώντας τον κίνδυνο ενός «στενού λαιμού» στη διαφοροποίηση του οικοσυστήματος. Οι εξελίξεις αυτές καθιστούν αναγκαίο έναν πιο προσαρμοσμένο σχεδιασμό πολιτικών και επενδυτικών βασικών, που να λαμβάνουν υπόψη τις ιδιαιτερότητες των κβαντικών τεχνολογιών ως deep-tech πεδίου και να ενισχύουν συμπληρωματικά εργαλεία, όπως τα εξειδικευμένα accelerators, τα συνεργατικά σχήματα δημόσιου-ιδιωτικού co-funding και οι θεματικές πρωτοβουλίες για την ανάπτυξη ανθρώπινου δυναμικού.

3.4 Ενδεικτικά παραδείγματα διεθνών εταιρειών και quantum startups

Η χαρτογράφηση του παγκόσμιου οικοσυστήματος κβαντικών τεχνολογιών φέρνει στο προσκήνιο έναν σχετικά μικρό αριθμό μεγάλων εταιρειών και έναν αυξανόμενο αριθμό εξειδικευμένων startups που λειτουργούν ως «άγκυρες» για το πεδίο (McKinsey, 2025; The Quantum Insider, 2025). Στην κορυφή της αλυσίδας αξίας βρίσκονται επιχειρήσεις όπως η IBM, η Google Quantum AI, η Microsoft, η IonQ, η Quantinuum, η D-Wave, η Pasqal και η Xanadu, οι οποίες συνδυάζουν ανάπτυξη hardware, πλατφόρμες λογισμικού και οικοσυστήματα συνεργασιών με βιομηχανικούς πελάτες (McKinsey, 2025; Spinqanta, 2025). Οι εταιρείες αυτές καθορίζουν κατά κύριο λόγο τους τεχνολογικούς οδικούς χάρτες, θέτοντας στόχους για τον αριθμό και την ποιότητα των qubits, για τη μείωση του θορύβου και για τη μετάβαση σε σενάρια «κβαντικού πλεονεκτήματος» σε πραγματικές εφαρμογές (The Quantum Insider, 2025).

Στο επίπεδο των startups hardware, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν εταιρείες που αναπτύσσουν εναλλακτικές πλατφόρμες κβαντικών υπολογιστών, πέρα από τις κυρίαρχες υπεραγώγιμες αρχιτεκτονικές (Seskir & Korkmaz, 2022; McKinsey, 2025). Χαρακτηριστικά παραδείγματα περιλαμβάνουν εταιρείες που βασίζονται σε παγιδευμένα ιόντα, ουδέτερα άτομα ή φωτονικές πλατφόρμες, αλλά και επιχειρήσεις που εξειδικεύονται σε ζωτικά υποσυστήματα, όπως κρυογενικά ψυγεία, ενισχυτές, ελεγκτές και εξειδικευμένα οπτικά (Seskir & Korkmaz, 2022). Οι εταιρείες αυτές

συχνά υιοθετούν full-stack προσεγγίσεις, συνδυάζοντας την ανάπτυξη hardware με εξειδικευμένο λογισμικό και εφαρμογές, και αντλούν χρηματοδότηση μέσω μεγάλων γύρων στους οποίους συμμετέχουν τόσο κλασικά venture capital funds όσο και corporate επενδυτές (McKinsey, 2025; Spinqunta, 2025). Η γεωγραφική τους κατανομή αντικατοπτρίζει την ύπαρξη ισχυρών clusters, με ουσιώδεις συγκεντρώσεις στη Βόρεια Αμερική και στη Δυτική Ευρώπη, αλλά και αυξανόμενη παρουσία σε Ιαπωνία, Κίνα και άλλες ασιατικές αγορές (Seskir & Korkmaz, 2022; McKinsey, 2025).

Στον χώρο του λογισμικού και των εφαρμογών έχουν αναδειχθεί startups που αναπτύσσουν πλατφόρμες quantum-as-a-service, εργαλεία ανάπτυξης αλγορίθμων και εξειδικευμένες λύσεις για συγκεκριμένους κλάδους (Seskir & Korkmaz, 2022; Oezratty, 2022). Εταιρείες όπως η Zapata Computing και η 1QBit συνεργάζονται με βιομηχανικούς εταίρους για εφαρμογές σε χρηματοοικονομική βελτιστοποίηση, logistics και σχεδιασμό υλικών, που βασίζονται σε κβαντικούς ή κβαντικά εμπνευσμένους αλγορίθμους (McKinsey, 2025; Traction Technology, 2022). Άλλες startups αναπτύσσουν low-code ή no-code πλατφόρμες για τον σχεδιασμό κβαντικών κυκλωμάτων, εργαλεία προσομοίωσης ή orchestrators που επιτρέπουν τη διαχείριση υβριδικών κβαντο-κλασικών αρχιτεκτονικών πάνω από πολλαπλά hardware backends (Oezratty, 2022; Specter Insights, 2025). Έτσι λειτουργούν ως «γέφυρα» μεταξύ των μεγάλων παρόχων hardware και των τελικών χρηστών, μειώνοντας τα εμπόδια εισόδου για επιχειρήσεις που θέλουν να πειραματιστούν με κβαντικές εφαρμογές.

Μια επιμέρους, αλλά ολοένα σημαντικότερη κατηγορία αποτελείται από startups που συνδυάζουν κβαντικές τεχνολογίες με τεχνητή νοημοσύνη και υψηλής απόδοσης υπολογισμό (AI/HPC), στοχεύοντας σε σύνθετες εφαρμογές όπως η κυβερνοασφάλεια, η ναυσιπλοΐα, οι βιοεπιστήμες και η ανάλυση δεδομένων (SandboxAQ, 2025; McKinsey, 2025). Τέτοιες εταιρείες συχνά δεν περιορίζονται σε «καθαρά» κβαντικό hardware, αλλά αξιοποιούν υβριδικές προσεγγίσεις, κβαντικά εμπνευσμένους αλγορίθμους και προηγμένες τεχνικές προσομοίωσης, τοποθετώντας τον εαυτό τους ως παρόχους ολοκληρωμένων λύσεων για επιχειρήσεις (SandboxAQ, 2025; Traction Technology, 2022). στον χώρο της κβαντικής αίσθησης και των κβαντικών αισθητήρων εμφανίζονται εταιρείες που στοχεύουν εφαρμογές σε αεροδιαστημική, ιατρική, ενέργεια και βιομηχανική παρακολούθηση, αν και το τοπίο αυτό παραμένει πιο κατακερματισμένο και λιγότερο ορατό σε σχέση με το computing (Seskir & Korkmaz, 2022; OECD, 2025b).

Τέλος, οι συνεργασίες μεταξύ μεγάλων εταιρειών και startups αποτελούν κεντρικό στοιχείο της επιχειρηματικής ευρύτερης στον κβαντικό χώρο (McKinsey, 2025; Traction Technology, 2022). Μεγάλες βιομηχανίες στους τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, των χρηματοοικονομικών, της εφοδιαστικής αλυσίδας και της φαρμακοβιομηχανίας έχουν ξεκινήσει πιλοτικά έργα με κβαντικές εταιρείες, διερευνώντας εφαρμογές σε βελτιστοποίηση δρομολόγησης, προσομοίωση υλικών, ανάλυση κινδύνου και ανακάλυψη φαρμάκων (Traction Technology, 2022; OpenQASE, 2025). Τέτοιες συνεργασίες, συχνά υπό τη μορφή joint labs ή στρατηγικών συμφωνιών, επιτρέπουν στις startups να δοκιμάσουν λύσεις σε πραγματικά δεδομένα και περιβάλλοντα, ενώ παρέχουν στους μεγάλους οργανισμούς πρόσβαση σε τεχνολογίες αιχμής και σε εξειδικευμένη τεχνογνωσία (OpenQASE, 2025; McKinsey, 2025). Ωστόσο, η κλίμακα και η βιωσιμότητα πολλών από αυτές τις πρωτοβουλίες παραμένει κυρίως πειραματική, με σημαντική απόσταση μέχρι την ευρεία βιομηχανική υιοθέτηση, κάτι που κάνει αναγκαία τη συστηματική αποτίμηση των πιλοτικών έργων και τη διάχυση καλών πρακτικών (McKinsey, 2025; OECD, 2025b).

3.5 Προοπτικές για την Ευρώπη και ειδικότερα για την Ελλάδα

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει εισέλθει σε μια σημαντική δεκαετία για τις κβαντικές τεχνολογίες, θέτοντας ως στόχο να καταστεί «quantum industrial powerhouse» και παγκόσμιος ηγέτης μέχρι το 2030, με

σαφή ορίζοντα συνέχισης επενδύσεων τουλάχιστον έως το 2035 (European Commission, 2025; OECD, 2025b). Η Quantum Europe Strategy, που υιοθετήθηκε το 2025, οικοδομεί πάνω σε προηγούμενες πρωτοβουλίες όπως το Quantum Flagship και η EuroQCI και επιχειρεί να ενοποιήσει ερευνητικές, βιομηχανικές και αμυντικές δράσεις σε ένα συνεκτικό πλαίσιο πολιτικής (European Commission, 2025; European Commission, 2026). Παρά την ισχυρή επιστημονική βάση, η ίδια η Επιτροπή αναγνωρίζει ότι η Ευρώπη βρίσκεται πίσω σε σχέση με τις ΗΠΑ και ορισμένες ασιατικές οικονομίες στη γρήγορη κλιμάκωση startups, στη δημιουργία μεγάλων βιομηχανικών «πρωταθλητών» και στην προσέλκυση ιδιωτικών επενδύσεων μεγάλης κλίμακας (OECD, 2025b; McKinsey, 2025).

Η Quantum Europe Strategy δομείται γύρω από πέντε διασυνδεόμενους πυλώνες: (i) έρευνα και καινοτομία, (ii) κβαντικές υποδομές, (iii) ενίσχυση του οικοσυστήματος επιχειρήσεων, (iv) space και dual-use εφαρμογές και (v) ανάπτυξη κβαντικών δεξιοτήτων (European Commission, 2025). Ο πρώτος πυλώνας στοχεύει στη διατήρηση και ενίσχυση της ευρωπαϊκής αριστείας στην κβαντική επιστήμη, με έμφαση σε μακροπρόθεσμη χρηματοδότηση ερευνητικών κέντρων, διεπιστημονικές συνεργασίες και μηχανισμούς μεταφοράς τεχνολογίας από πανεπιστήμια προς επιχειρήσεις (OECD, 2025b; European Commission, 2025). Ο δεύτερος πυλώνας επικεντρώνεται στη δημιουργία κβαντικών υποδομών πανευρωπαϊκής εμβέλειας (υπολογιστικών εγκαταστάσεων, δικτύων κβαντικών επικοινωνιών και πλατφορμών αισθητήρων), οι οποίες θα λειτουργούν ως κοινές δοκιμαστικές βάσεις (open quantum testbeds) για ερευνητές, startups και βιομηχανικούς χρήστες (European Commission, 2025; Post-Quantum, 2025).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για το παρόν κεφάλαιο έχει ο τρίτος πυλώνας, «Strengthening the Quantum Ecosystem», ο οποίος αφορά άμεσα τις προοπτικές για τις ευρωπαϊκές κβαντικές startups. Η στρατηγική αναγνωρίζει ότι η τεχνολογική ηγεσία δεν εξαρτάται μόνο από ερευνητικές υποδομές, αλλά από τη δημιουργία ενός ζωντανού οικοσυστήματος επιχειρήσεων, επενδυτών και βιομηχανικών εταιρών που θα μετατρέπουν τις ερευνητικές ιδέες σε εμπορικά προϊόντα και υπηρεσίες (European Commission, 2025; Post-Quantum, 2025). Προβλέπονται μέτρα όπως η ανάπτυξη ανοικτών testbeds και quantum competence centers, η ενίσχυση των clusters και των εταιρικών-startup συνεργασιών, η χρήση της δημόσιας προμήθειας ως «lead market» για πρώιμες κβαντικές λύσεις, καθώς και δράσεις προστασίας της ευρωπαϊκής πνευματικής ιδιοκτησίας και αποτροπής εξαγορών που θα οδηγούσαν σε απώλεια ζωτικών τεχνολογιών (Post-Quantum, 2025; Quantum Basel, 2025). Στο ίδιο πνεύμα, η στρατηγική συζητά τη δημιουργία ενός ειδικού ταμείου «Quantum Sovereignty Growth Fund» για την κάλυψη των αναγκών scale-up χρηματοδότησης, τονίζοντας την ανάγκη για σταθερή δημόσια χρηματοδότηση της τάξης των 2 δισ. ευρώ ετησίως (The Quantum Insider, 2025; Post-Quantum, 2025).

Ο τέταρτος πυλώνας εστιάζει στις space και dual-use εφαρμογές, αναγνωρίζοντας ότι οι κβαντικές τεχνολογίες θα διαδραματίσουν ρόλο στην ασφάλεια, την άμυνα και τη διαστημική πολιτική της ΕΕ (OECD, 2025b; European Commission, 2025). Εδώ εντάσσονται πρωτοβουλίες όπως το EuroQCI, το οποίο στοχεύει στη δημιουργία μιας πανευρωπαϊκής κβαντικής υποδομής επικοινωνιών, και αντίστοιχα έργα που συνδυάζουν κβαντικούς αισθητήρες και κβαντική πλοήγηση για εφαρμογές σε σημαντικές υποδομές, μεταφορές και ενέργεια (European Commission, 2026; Petrus-EuroQCI, 2025). Τέλος, ο πέμπτος πυλώνας αφορά την ανάπτυξη δεξιοτήτων, με προγράμματα εκπαίδευσης, διαδρομές διττής εκπαίδευσης (dual education), πανευρωπαϊκά δίκτυα κινητικότητας και δράσεις για την προσέλκυση ταλέντου από τρίτες χώρες, προκειμένου να αντιμετωπιστεί το διαπιστωμένο έλλειμμα εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού (OECD, 2025b; European Commission, 2025).

Μέσα σε αυτό το ευρωπαϊκό πλαίσιο, η Ελλάδα κατατάσσεται στις αναδυόμενες, αλλά ταχέως εξελισσόμενες περιπτώσεις, με ιδιαίτερη έμφαση στον τομέα των κβαντικών επικοινωνιών και της κβαντικής ασφάλειας (OECD, 2025b; HellasQCI, 2023). Η εθνική στρατηγική δεν έχει ακόμα τη μορφή

ολοκληρωμένης «Quantum Strategy» αντίστοιχης μεγάλων κρατών-μελών, αν και τα τελευταία χρόνια έχουν υλοποιηθεί κυρίως βήματα μέσω στοχευμένων έργων, συμμετοχής σε ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες και ανάδειξης ελληνικών φορέων σε ηγετικούς ρόλους (HellasQCI, 2025; GRNET, 2025). Κομβική περίπτωση αποτελεί το έργο HellasQCI, το οποίο, στο πλαίσιο της EuroQCI, αναπτύσσει την Εθνική Κβαντική Υποδομή Επικοινωνιών, αποτελώντας τον ελληνικό «πυλώνα» του ευρωπαϊκού κβαντικού δικτύου ασφαλών επικοινωνιών (HellasQCI, 2023; GRNET, 2024).

Το HellasQCI στοχεύει στην ανάπτυξη ενός δικτύου περίπου 650 χιλιομέτρων οπτικών ινών με Quantum Key Distribution, που θα συνδέει Αθήνα, Θεσσαλονίκη και Ηράκλειο, διασυνδέοντας δημόσιες αρχές, φορείς εθνικής ασφάλειας, πανεπιστήμια και ιδιωτικούς παρόχους (HellasQCI, 2023). Το δίκτυο περιλαμβάνει πάνω από 20 κόμβους κβαντικής επικοινωνίας και δεκάδες συνδέσεις WAN και MAN, ενώ συμπληρώνεται από τρεις οπτικούς επίγειους σταθμούς (Optical Ground Stations), δηλαδή Χελμός, Χολομώντας και Σκίνακας, που επιτρέπουν δορυφορικές συνδέσεις QKD και συνέργειες με ευρωπαϊκά διαστημικά προγράμματα (HellasQCI, 2025; GRNET, 2025). Εκτός από την επιχειρησιακή του διάσταση, το έργο λειτουργεί ως εθνικό testbed για έρευνα και καινοτομία, παρέχοντας σε ελληνικά πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα και επιχειρήσεις τη δυνατότητα να δοκιμάσουν νέες τεχνολογίες κβαντικής κρυπτογραφίας, post-quantum cryptography και υβριδικά σχήματα ασφάλειας σε πραγματικές συνθήκες (HellasQCI, 2025; HellasQCI, 2023).

Η σημασία της Ελλάδας στο ευρωπαϊκό πλαίσιο ενισχύεται περαιτέρω από την ανάληψη ηγετικών ρόλων σε διασυνοριακά έργα όπως το SEEWQCI και το TransEuroOGS, τα οποία επεκτείνουν το εθνικό δίκτυο σε έναν γενικότερο «Balkan Quantum Corridor» και σε πανευρωπαϊκές δορυφορικές υποδομές (GRNET, 2025; Petrus-EuroQCI, 2025). Το SEEWQCI, με συντονιστή την Ελλάδα, στοχεύει στη διασύνδεση των εθνικών κβαντικών υποδομών Ελλάδας, Κύπρου, Βουλγαρίας και Ολλανδίας μέσω περισσότερων από 29 διασυνοριακών συνδέσεων και αξιοποίησης του ευρωπαϊκού δορυφόρου EAGLE-1, ενισχύοντας τον ρόλο της χώρας ως περιφερειακού κόμβου κβαντικών επικοινωνιών στη Νοτιοανατολική Ευρώπη (GRNET, 2025). Στο ίδιο πλαίσιο, η φιλοξενία του συνεδρίου QCI Days 2025 στην Αθήνα και η επιτυχής επίδειξη διαλειτουργικότητας πολυεθνικού κβαντικού δικτύου σε πραγματικό χρόνο βελτιώνουν την εικόνα της Ελλάδας ως «φάρου» κβαντικών επικοινωνιών στην Ευρώπη, όπως φαίνεται και σε ειδικές αναφορές (Netweek, 2025; HellasQCI, 2025).

Πέρα από τις υποδομές, το ελληνικό οικοσύστημα εμφανίζει αυξανόμενη κινητικότητα σε επίπεδο έρευνας και ανθρώπινου δυναμικού, με πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα να δραστηριοποιούνται σε τομείς όπως η κβαντική κρυπτογραφία, τα κβαντικά δίκτυα, η θεωρία υπολογισμού και οι κβαντικά εμπνευσμένοι αλγόριθμοι (Netweek, 2025; OECD, 2025b). το γενικότερο ελληνικό οικοσύστημα νεοφυών επιχειρήσεων παρουσιάζει σημάδια ωρίμανσης, με αύξηση των επενδύσεων σε deep-tech και των συνεργασιών μεταξύ ερευνητικών φορέων και επιχειρήσεων, αν και η παρουσία «καθαρά» κβαντικών startups παραμένει προς το παρόν πολύ περιορισμένη (Found.ation, 2024). Μελέτες για το ελληνικό startup οικοσύστημα αναφέρουν πως η επόμενη φάση ανάπτυξης θα εξαρτηθεί από τη δυνατότητα προσέλκυσης εξειδικευμένων επενδυτικών σχημάτων, την ενίσχυση μηχανισμών μεταφοράς τεχνολογίας και τη διασύνδεση με ευρωπαϊκά προγράμματα όπως το EIC Accelerator και τα IPCEI (Found.ation, 2024; European Commission, 2023).

Παρά τα θετικά αυτά βήματα, η Ελλάδα εξακολουθεί να αντιμετωπίζει σημαντικές διαρθρωτικές προκλήσεις για τη συγκρότηση ώριμου κβαντικού οικοσυστήματος. Μεταξύ αυτών συγκαταλέγονται η μικρή ελάχιστη μάζα ερευνητών σε ορισμένα υποπεδία των κβαντικών τεχνολογιών, η απουσία ανεπτυγμένων τεχνολογικών clusters με «άγκυρες» κβαντικές εταιρείες, η περιορισμένη εμπειρία των εγχώριων επενδυτών σε πολύ μακροπρόθεσμα deep-tech εγχειρήματα και η ανάγκη για συνεκτική εθνική στρατηγική που να υπερβαίνει την αποσπασματική υλοποίηση μεμονωμένων έργων (OECD,

2025b; ECIPE, 2025). Οι διεθνείς εμπειρίες από χώρες με ισχυρά quantum clusters δείχνουν ότι η επιτυχής ανάπτυξη απαιτεί συνδυασμό μακρόπνοης πολιτικής δέσμευσης, σταθερής χρηματοδότησης, αποτελεσματικών μηχανισμών συνεργασίας δημόσιου-ιδιωτικού τομέα και στοχευμένων δράσεων για την προσέλκυση και διατήρηση ταλέντου (OECD, 2025b; EPO-OECD, 2025).

Συνεπώς, οι προοπτικές της Ελλάδας στο ευρωπαϊκό κβαντικό οικοσύστημα θα εξαρτηθούν κατά βάση από την ικανότητα να κεφαλαιοποιήσει τον ρόλο της στις κβαντικές επικοινωνίες και να τον μετατρέψει σε ευρύτερη αναπτυξιακή βασική, η οποία θα συνδέει υποδομές, έρευνα και επιχειρηματικότητα. Αυτό σημαίνει, μεταξύ άλλων, διαμόρφωση εθνικού πλαισίου για τις κβαντικές τεχνολογίες σε συνέργεια με την Quantum Europe Strategy· στόχευση σε niche τομείς όπου η χώρα διαθέτει συγκριτικά πλεονεκτήματα (π.χ. ασφαλείς επικοινωνίες, κυβερνοασφάλεια, εφαρμογές σε ναυτιλία, ενέργεια και βασικές υποδομές)· ενίσχυση των μηχανισμών στήριξης deep-tech και προσέλκυσης εξειδικευμένων επενδυτών· και ενεργή συμμετοχή σε ευρωπαϊκά σχήματα διακυβέρνησης και standardisation (European Commission, 2025; OECD, 2025b). Μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να επιτρέψει στην Ελλάδα να μεταβεί από τον ρόλο του «ταχέως αναδυόμενου παίκτη» σε αυτόν του περιφερειακού κόμβου κβαντικών τεχνολογιών στη Νοτιοανατολική Ευρώπη, συμβάλλοντας στη συνολική ευρωπαϊκή φιλοδοξία για τεχνολογική κυριαρχία στο κβαντικό πεδίο.

Κεφάλαιο 4 - Επιχειρηματικά μοντέλα και υιοθέτηση κβαντικής υπολογιστικής

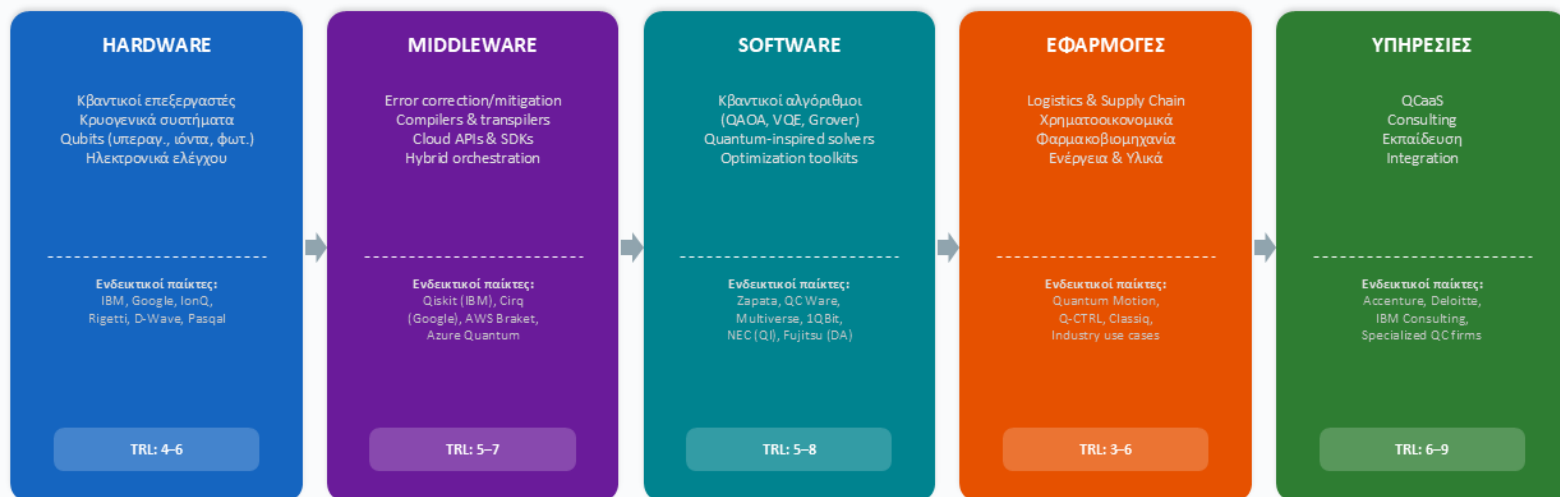
Η κβαντική υπολογιστική μετακινείται σταδιακά από το πεδίο της ευρύτερης έρευνας προς σενάρια πρακτικής αξιοποίησης, δημιουργώντας νέες δυνατότητες για παραγωγή επιχειρηματικής αξίας αλλά και ανάγκη αναθεώρησης υφιστάμενων επιχειρηματικών μοντέλων (McKinsey, 2025; World Economic Forum, 2026). Πρόσφατες μελέτες εκτιμούν ότι μέχρι το 2035 η μεγαλύτερη αγορά κβαντικών τεχνολογιών μπορεί να φθάσει συνολικά σε έσοδα έως και 97 δις. δολαρίων, με την κβαντική υπολογιστική να αποτελεί το μεγαλύτερο τμήμα, ενώ η συνολική οικονομική αξία που μπορεί να δημιουργηθεί για τελικούς χρήστες σε κλάδους όπως τα χρηματοοικονομικά, τα χημικά, οι βιοεπιστήμες και η κινητικότητα εκτιμάται σε εκατοντάδες δισεκατομμύρια έως και περίπου 1 τρισ. δολάρια (McKinsey, 2025; The Quantum Insider, 2024). Η διάκριση ανάμεσα στην αξία που καρπώνονται οι τελικοί χρήστες και στα έσοδα των ίδιων των παρόχων κβαντικής τεχνολογίας είναι κεντρική: σημαντική μερίδα των μελετών δείχνει ότι το μεγαλύτερο μέρος του οφέλους θα αποτυπωθεί ως βελτίωση απόδοσης, μείωση κόστους και νέες ροές εσόδων σε κλαδικές εφαρμογές, ενώ ένα μικρότερο, αλλά ταχέως αναπτυσσόμενο μέρος θα αφορά άμεσα έσοδα παρόχων hardware, λογισμικού και υπηρεσιών (McKinsey, 2025; Spinqanta, 2025).

Για να χρησιμοποιηθούν οι δυνατότητες αυτές, δεν αρκεί η τεχνολογική ωρίμανση· απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλων value propositions, καινοτόμων επιχειρηματικών μοντέλων και ρεαλιστικών στρατηγικών υιοθέτησης τόσο από μεγάλες επιχειρήσεις όσο και από νεοφυείς εταιρείες (Deloitte, 2025; IBM, 2025). Στο πλαίσιο αυτό, το παρόν κεφάλαιο εστιάζει σε πέντε διαστάσεις: πρώτον, στον τρόπο με τον οποίο οι κβαντικοί υπολογιστές μπορούν να δημιουργήσουν αξία μέσα από συγκεκριμένες κατηγορίες εφαρμογών και κλαδικά σενάρια χρήσης (4.1)· δεύτερον, στα μοντέλα επιχειρηματικής καινοτομίας που αναδύονται γύρω από την κβαντική υπολογιστική, όπως τα μοντέλα as-a-service, πλατφορμών και συμβουλευτικών υπηρεσιών (4.2)· τρίτον, στις στρατηγικές υιοθέτησης που διαμορφώνουν οι μεγάλες επιχειρήσεις μέσα από πειραματικά έργα, συνεργασίες και χρήση cloud-based κβαντικών υπηρεσιών (4.3)· τέταρτον, στις ευκαιρίες και τα ρίσκα που

αντιμετωπίζουν οι νεοφυείς επιχειρήσεις, με έμφαση στο πνευματικό κεφάλαιο, στη χρονική στιγμή εισόδου και στο ρυθμιστικό περιβάλλον (4.4)· και, τέλος, σε ένα προτεινόμενο εννοιολογικό πλαίσιο ανάλυσης για startups στον χώρο της κβαντικής υπολογιστικής, το οποίο επιχειρεί να συνθέσει τα προηγούμενα σε ένα εργαλείο σχεδιασμού μεγάλης κλίμακας (4.5).

Στην ανάλυση που ακολουθεί υιοθετούμε μια διπλή οπτική: αφενός, του τελικού χρήστη/βιομηχανικού κλάδου που ενδιαφέρεται για απτά επιχειρηματικά αποτελέσματα και, αφετέρου, του παρόχου κβαντικών λύσεων ή startup που επιδιώκει να διαμορφώσει βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα σε ένα περιβάλλον υψηλής τεχνολογικής και αγοραστικής αβεβαιότητας (McKinsey, 2025; Deloitte, 2025). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο γεγονός ότι η περίοδος μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 2020 αναμένεται να χαρακτηρίζεται από «ενδιάμεση» υιοθέτηση, όπου υβριδικά κβαντο-κλασικά σχήματα, κβαντικά εμπνευσμένοι αλγόριθμοι και υπηρεσίες προετοιμασίας (quantum readiness) θα συνυπάρχουν με σταδιακά πιο ισχυρές κβαντικές υποδομές (IBM, 2025; Berkeley CMR, 2025). Οι επιχειρήσεις καλούνται έτσι να τοποθετηθούν ουσιαστικά σε ένα φάσμα που εκτείνεται από την απλή παρακολούθηση εξελίξεων έως την ενεργή επένδυση σε ικανότητες, πειραματισμούς και συνεργασίες, προκειμένου να είναι σε θέση να εκμεταλλευτούν τις μελλοντικές δυνατότητες όταν οι τεχνολογίες ωριμάσουν.

Στις επόμενες ενότητες, το κεφάλαιο διερευνά αρχικά τις κύριες κατηγορίες δημιουργίας αξίας από την κβαντική υπολογιστική (4.1), στη συνέχεια αναλύει τα κυριότερα επιχειρηματικά μοντέλα που διαμορφώνονται γύρω από αυτές τις κατηγορίες (4.2) και καταλήγει στις στρατηγικές υιοθέτησης και στο ειδικό πλαίσιο ανάλυσης για κβαντικές startups (4.3–4.5), προετοιμάζοντας το έδαφος για τις μελέτες περίπτωσης του πέμπτου κεφαλαίου.



Επιχειρηματικά Μοντέλα: QCaaS (as-a-Service) · Platform / Marketplace · Consulting & Integration · Hybrid μοντέλα

Υποστηρικτικό Οικοσύστημα

Κυβερνητικές Στρατηγικές
(EU Flagship, NSF, DARPA)

Ακαδημαϊκή Έρευνα
(Πανεπιστήμια, Labs, Spin-offs)

Venture Capital
(Patient capital, Corporate VC)

Incubators & Accelerators
(CDL, Duality)

TRL = Technology Readiness Level (1–9). Οι εκτιμήσεις αντικατοπτρίζουν τη μέση ωριμότητα ανά κατηγορία (2024–2025).

Σχήμα 9 Αλυσίδα αξίας κβαντικής υπολογιστικής (IBM, 2021; McKinsey, 2025 · Ίδια επεξεργασία)

4.1 Πώς μπορεί να δημιουργηθεί αξία από κβαντικούς υπολογιστές (value propositions)

Η επιχειρηματική αξία της κβαντικής υπολογιστικής δεν προκύπτει απλώς από τη γενική «υπολογιστική ισχύ», αλλά από συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων όπου οι κβαντικοί αλγόριθμοι μπορούν να προσφέρουν ουσιαστικό πλεονέκτημα έναντι κλασικών μεθόδων, είτε με τη μορφή σημαντικά ταχύτερων υπολογισμών είτε με τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων που μέχρι σήμερα θεωρούνταν πρακτικά μη επιλύσιμα (McKinsey, 2025; Colobridge, 2025). Η διεθνής βιβλιογραφία και οι αναλύσεις αγοράς συγκλίνουν στη διάκριση τεσσάρων βασικών αρχέτυπων χρήσης: (i) προσομοίωση κβαντικών συστημάτων, (ii) επίλυση σύνθετων προβλημάτων βελτιστοποίησης, (iii) ενίσχυση τεχνικών μηχανικής μάθησης και ανάλυσης δεδομένων και (iv) εφαρμογές σε ασφάλεια και κρυπτογραφία (BCG, 2025; McKinsey, 2025). Σε κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες, η κβαντική υπολογιστική υπόσχεται διαφορετικά είδη «value propositions» για τις επιχειρήσεις: από βελτιώσεις στην αποδοτικότητα και τη διαχείριση κινδύνου μέχρι την ανακάλυψη νέων προϊόντων και επιχειρηματικών μοντέλων.

Μια πρώτη διάκριση που προτείνεται στη βιβλιογραφία είναι μεταξύ «quantum-enabled» βελτιώσεων υφιστάμενων διαδικασιών και «quantum-only» εφαρμογών που καθίστανται εφικτές μόνο μέσω κβαντικών υπολογιστών (McKinsey, 2025; Quantum Insider, 2024). Στην πρώτη κατηγορία εντάσσονται περιπτώσεις όπου κβαντικοί ή κβαντικά εμπνευσμένοι αλγόριθμοι μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση υπαρχόντων εργασιών, όπως η βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου, η δρομολόγηση σε logistics ή οι Monte Carlo προσομοιώσεις σε χρηματοοικονομικά μοντέλα, προσφέροντας βελτιώσεις λίγων ποσοστιαίων μονάδων σε δείκτες όπως το λειτουργικό περιθώριο ή η χρήση κεφαλαίου (McKinsey, 2023; Colobridge, 2025). Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν εφαρμογές όπου η κβαντική προσομοίωση επιτρέπει την εξερεύνηση χώρων κατάστασης τόσο μεγάλου μεγέθους ώστε η κλασική προσέγγιση είναι πρακτικά απαγορευτική, όπως ο λεπτομερής σχεδιασμός νέων μορίων και υλικών ή η ακριβέστερη μοντελοποίηση πολύπλοκων φυσικών φαινομένων (McKinsey, 2025; Entrée Capital, 2025). Η διάκριση αυτή είναι σημαντική για την ιεράρχηση επενδύσεων, καθώς οι «quantum-only» χρήσεις συνδέονται με πιο μακροπρόθεσμη, αλλά δυνητικά δραματική, δημιουργία νέας αξίας.

Η πρώτη και ίσως πιο χαρακτηριστική κατηγορία value proposition αφορά την προσομοίωση κβαντικών συστημάτων, που έχει άμεση συνάφεια με κλάδους όπως τα χημικά, η φαρμακοβιομηχανία και η επιστήμη υλικών (BCG, 2025; McKinsey, 2025). Κβαντικοί υπολογιστές υπόσχονται να μοντελοποιήσουν με μεγαλύτερη ακρίβεια και ταχύτητα τη συμπεριφορά πολύπλοκων μοριακών δομών, επιτρέποντας την ανακάλυψη νέων φαρμάκων, καταλυτών, μπαταριών και ειδικών υλικών με βελτιωμένα χαρακτηριστικά (McKinsey, 2025; Entrée Capital, 2025). Η δυνατότητα αυτή μπορεί να μειώσει δραστικά τον χρόνο και το κόστος R&D, να επιτρέψει στοχευμένες δοκιμές σε μικρότερο αριθμό υποψηφίων μορίων και να αποδώσει ανταγωνιστικά πλεονεκτήματα σε εταιρείες που θα εκμεταλλευτούν πρώιμα τέτοια εργαλεία (McKinsey, 2025). Η αξία για τις επιχειρήσεις προκύπτει τόσο από την ταχύτερη είσοδο προϊόντων στην αγορά όσο και από την πρόσβαση σε ποιοτικά καλύτερα ή εντελώς νέα προϊόντα, τα οποία μπορεί να είναι δυσπρόσιτα μέσω κλασικών μεθόδων.

Η δεύτερη μεγάλη κατηγορία αφορά προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία απαντώνται σε πληθώρα κλάδων, από την εφοδιαστική αλυσίδα και τις μεταφορές μέχρι τη βιομηχανική παραγωγή και τα χρηματοοικονομικά (BCG, 2025; QuantumComputer.blog, 2025). Πολλά από αυτά τα προβλήματα χαρακτηρίζονται από μεγάλο αριθμό μεταβλητών και περιορισμών (combinatorial

optimization), όπου οι κλασικοί αλγόριθμοι συχνά καταφεύγουν σε προσεγγιστικές λύσεις ή απαιτούν ουσιώδες υπολογιστικό χρόνο (Colobridge, 2025). Οι κβαντικοί και κβαντικά εμπνευσμένοι αλγόριθμοι υπόσχονται να επιταχύνουν τη διαδικασία αναζήτησης βέλτιστων ή near-optimal λύσεων, επιτρέποντας καλύτερη δρομολόγηση στόλων, βελτιστοποίηση παραγωγικού προγραμματισμού ή αποδοτικότερη κατανομή κεφαλαίου σε σύνθετα χαρτοφυλάκια (Quantum Computer Blog, 2025; BQR, 2026). Για τις επιχειρήσεις, αυτό μεταφράζεται σε value propositions που σχετίζονται με μείωση κόστους, βελτίωση αξιοπιστίας παραδόσεων, καλύτερη χρήση περιουσιακών στοιχείων και ενίσχυση της ανθεκτικότητας των εφοδιαστικών αλυσίδων, ακόμη και πριν επιτευχθεί πλήρης «κβαντική υπεροχή» (World Economic Forum, 2025).

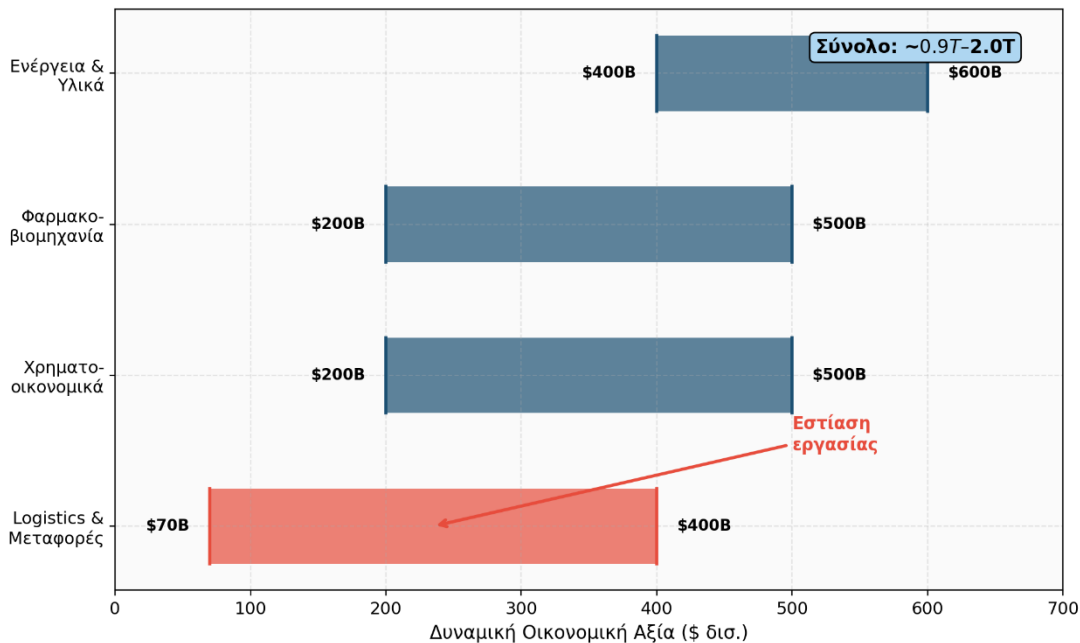
Η κβαντική υπολογιστική μπορεί να λειτουργήσει ως επιταχυντής σε σενάρια μηχανικής μάθησης και ανάλυσης δεδομένων, δημιουργώντας value propositions που αφορούν την ταχύτερη ή ακριβέστερη ανίχνευση μοτίβων σε μεγάλους, πολύπλοκους όγκους δεδομένων (McKinsey, 2025; BQR, 2026). Η βιβλιογραφία αναφέρει ως ενδεικτικές περιπτώσεις τη βελτίωση της ανίχνευσης απάτης μέσω κβαντικής μηχανικής μάθησης, την προχωρημένη τμηματοποίηση πελατών, τη βελτιστοποίηση βασικών algorithmic trading και την ταχύτερη εκτέλεση πολύπλοκων Monte Carlo προσομοιώσεων σε αγορές και κίνδυνο (Entrée Capital, 2025; BQR, 2026). Αν και πολλές από τις προτεινόμενες τεχνικές βρίσκονται ακόμη σε ερευνητικό ή πιλοτικό στάδιο, οι πρώιμες δοκιμές δείχνουν ότι, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορούν να επιτύχουν καλύτερη ισορροπία μεταξύ ακρίβειας, ταχύτητας και κατανάλωσης πόρων σε σύγκριση με κλασικά μοντέλα (McKinsey, 2025). Από επιχειρηματική σκοπιά, η αξία συνδέεται με τη βελτίωση της ποιότητας αποφάσεων, τη μείωση λειτουργικού κινδύνου και την ανάπτυξη νέων δεδομενοκεντρικών υπηρεσιών, ιδιαίτερα σε κλάδους όπως τα χρηματοοικονομικά, το λιανεμπόριο και οι τηλεπικοινωνίες.

Τέταρτον, οι εφαρμογές σε ασφάλεια και κρυπτογραφία συνιστούν ένα ιδιαίτερο, αλλά ουσιαστικά ζωτικό πεδίο δημιουργίας αξίας (Colobridge, 2025; World Economic Forum, 2025). Από τη μία πλευρά, η προοπτική κβαντικών υπολογιστών ικανών να «σπάσουν» ευρέως χρησιμοποιούμενα κρυπτογραφικά πρωτόκολλα δημιουργεί σοβαρούς κινδύνους για την ασφάλεια δεδομένων, οι οποίοι ήδη ωθούν οργανισμούς προς υιοθέτηση post-quantum cryptography (PQC) και προς αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των κρίσιμων υποδομών τους (Colobridge, 2025). Από την άλλη πλευρά, η ανάπτυξη κβαντικά ασφαλών αρχιτεκτονικών, η χρήση Quantum Key Distribution και η υιοθέτηση υβριδικών λύσεων ασφάλειας μπορούν να αποτελέσουν σημαντικό ανταγωνιστικό πλεονέκτημα για εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε τομείς υψηλής ρύθμισης, όπως οι χρηματοοικονομικές υπηρεσίες, η υγεία και οι υποδομές (World Economic Forum, 2025). Η αξία εδώ δεν αποτυπώνεται κυρίως σε πρόσθετα έσοδα, αλλά σε αποφυγή ζημιών, συμμόρφωση με ρυθμιστικές απαιτήσεις και ενίσχυση εμπιστοσύνης στην αγορά.

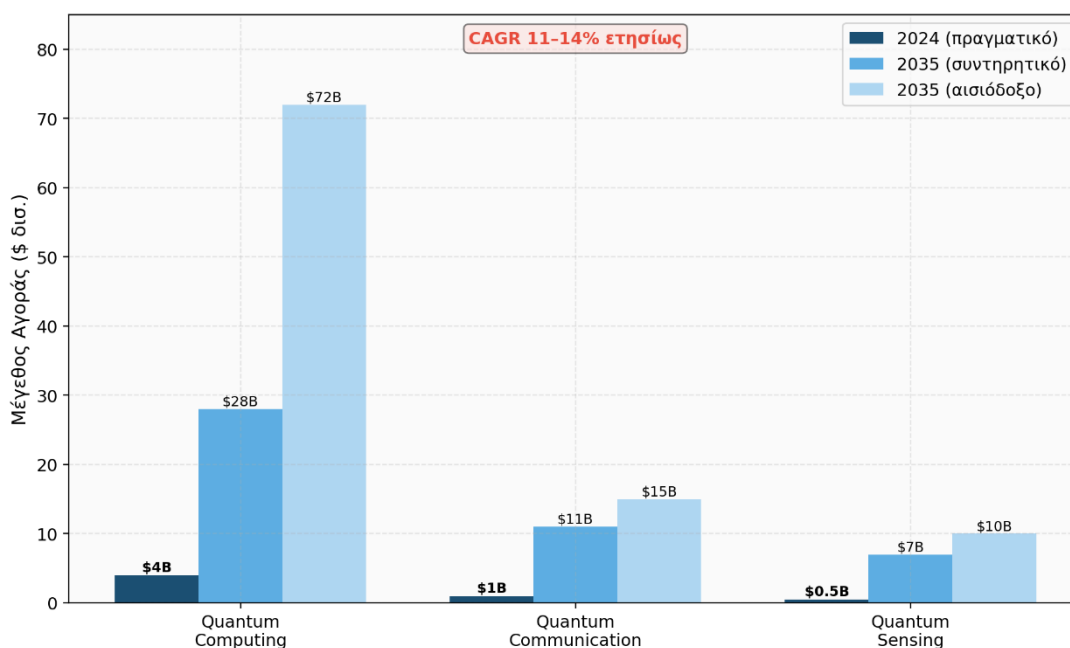
τέσσερις αυτές τεχνολογικές κατηγορίες, οι μελέτες δείχνουν και μια πιο «ενδιάμεση» μορφή αξίας, που συνδέεται με την οργανωσιακή μάθηση και την προετοιμασία για την κβαντική εποχή (IBM, 2025; World Economic Forum, 2026). Η συμμετοχή σε πιλοτικά έργα, η δημιουργία μικρών εσωτερικών ομάδων κβαντικής τεχνολογίας και η ανάπτυξη συνεργασιών με παρόχους, πανεπιστήμια και startups επιτρέπουν στις επιχειρήσεις να αποκτήσουν πρώιμη εμπειρία, να κατανοήσουν καλύτερα ποια use cases έχουν νόημα για τις δικές τους ανάγκες και να τοποθετηθούν ευνοϊκά όταν η τεχνολογία ωριμάσει (Deloitte, 2025; Berkeley CMR, 2025). Η αξία αυτών των δράσεων μπορεί να είναι λιγότερο άμεσα μετρήσιμη, αλλά συνδέεται με απτά οφέλη όπως η προσέλκυση και διατήρηση ταλέντου, η βελτίωση της καινοτομικής κουλτούρας και η ενίσχυση της ικανότητας γρήγορης προσαρμογής σε μελλοντικές κβαντικές εξελίξεις.

Τέλος, οι εκτιμήσεις για τη δυνητική αξία ανά κλάδο τονίζουν ότι η κβαντική υπολογιστική δεν θα είναι ομοιόμορφα αξιόλογη για όλες τις επιχειρήσεις, αλλά θα δημιουργήσει «νησίδες» υψηλής αξίας

σε συγκεκριμένους τομείς (McKinsey, 2023; BCG, 2025). Για παράδειγμα, στον χρηματοοικονομικό κλάδο, η δυνητική αξία από κβαντικές εφαρμογές εκτιμάται σε εκατοντάδες δισεκατομμύρια δολάρια, κυρίως μέσω βελτιωμένης διαχείρισης κινδύνου και βελτιστοποίησης κεφαλαίου, ενώ σε κλάδους όπως η χημική βιομηχανία και οι βιοεπιστήμες η αξία συνδέεται κυρίως με την ανακάλυψη νέων προϊόντων και τη μείωση του κόστους R&D (McKinsey, 2023; Colobridge, 2025). Οι επιχειρήσεις, επομένως, καλούνται να αξιολογήσουν σε ποιο βαθμό ανήκουν σε κλάδους «υψηλού value at stake» και να προσαρμόσουν ανάλογα τη στρατηγική τους για την κβαντική υπολογιστική, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο τις τεχνικές δυνατότητες αλλά και τη χρονική διάσταση, τη διαθεσιμότητα ταλέντου και τις ρυθμιστικές εξελίξεις.



Σχήμα 10 Εκτιμώμενη δυνητική οικονομική αξία κβαντικής υπολογιστικής ανά κλάδο (McKinsey, 2024; IBM IBV, 2022 · Ίδια επεξεργασία)



Σχήμα 11 Εκτιμώμενο μέγεθος αγοράς κβαντικών τεχνολογιών, 2024 vs 2035 (McKinsey, 2024 · ίδια επεξεργασία)

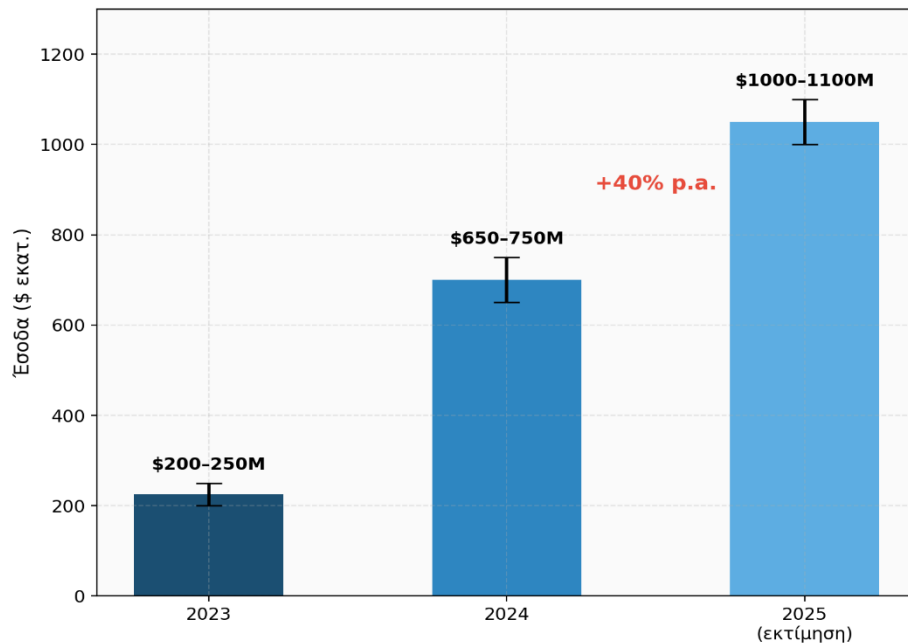
4.2 Business model innovation με βάση κβαντικές τεχνολογίες

Η εμπορική εκμετάλλευση της κβαντικής υπολογιστικής συνοδεύεται από την εμφάνιση νέων επιχειρηματικών μοντέλων, τα οποία επιχειρούν να μεταφράσουν μια βαριά, εξειδικευμένη τεχνολογία σε υπηρεσίες και πλατφόρμες προσβάσιμες σε ευρύτερο φάσμα επιχειρήσεων (The Business Research Company, 2023; McKinsey, 2025). Καθώς το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας κβαντικού hardware παραμένει εξαιρετικά υψηλό, η αγορά τείνει να οργανωθεί γύρω από μοντέλα τύπου as-a-service, πλατφορμών και εξειδικευμένων συμβουλευτικών υπηρεσιών, με σκοπό τη μείωση των εμποδίων εισόδου και τη σταδιακή καλλιέργεια ζήτησης (Navistrata Analytics, 2025; Credence Research, 2025). Οι εξελίξεις αυτές θυμίζουν σε αρκετό βαθμό την πορεία ωρίμανσης του cloud computing, όπου η μετάβαση από on-premise υποδομές σε υπηρεσίες IaaS/SaaS επέτρεψε σε πολλούς περισσότερους οργανισμούς να εκμεταλλευτούν προηγμένες υπολογιστικές δυνατότητες χωρίς να επωμιστούν το αντίστοιχο επενδυτικό βάρος.

Μοντέλο	Περιγραφή	Παραδείγματα
QCaaS	Cloud πρόσβαση σε κβαντικούς επεξεργαστές. Αγορά: \$3-4.5B → \$20B+	IBM Quantum, Amazon Braket, Azure Quantum
Platforms	Οικοσυστήματα αλγορίθμων. Multi-hardware, αποφυγή lock-in	Classiq, Strangeworks, QC Ware
Consulting	Αξιολόγηση readiness, πιλοτικά projects, εκπαίδευση	Deloitte, McKinsey, Accenture
Hybrid	Κβαντικές ρουτίνες σε κλασικά pipelines. NISQ εποχή	Multiverse, QunaSys, Pasqal

Πίνακας 8 Επιχειρηματικά μοντέλα κβαντικής υπολογιστικής (McKinsey, 2025; IBM, 2022 · ίδια επεξεργασία)

Κεντρικό ρόλο στο νέο αυτό τοπίο διαδραματίζει το μοντέλο Quantum Computing-as-a-Service (QCaaS ή QaaS), το οποίο επιτρέπει σε επιχειρήσεις και ερευνητές να αποκτήσουν απομακρυσμένη πρόσβαση σε κβαντικούς επεξεργαστές και σε σχετικό λογισμικό μέσω cloud, χωρίς να απαιτείται ιδιόκτητη υποδομή (Navistrata Analytics, 2025; Simpliaxis, 2025). Στο QCaaS μοντέλο, οι πάροχοι προσφέρουν quantum backends, προσομοιωτές, SDKs και εργαλεία ενορχήστρωσης μέσα από τυποποιημένα interfaces, συνήθως με σχήματα τιμολόγησης pay-per-use, συνδρομητικά πακέτα ή εταιρικά συμβόλαια, επιτρέποντας σε μικρές και μεγάλες επιχειρήσεις να πειραματιστούν με κβαντικούς αλγορίθμους χωρίς μεγάλες αρχικές επενδύσεις (Simpliaxis, 2025; Credence Research, 2025). Οι σχετικές αγορές παρουσιάζουν υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης: εκτιμάται ότι η παγκόσμια αγορά QCaaS, η οποία ανήλθε σε 3–4,5 δισ. δολάρια το 2024–2025, μπορεί να υπερβεί τα 20 δισ. δολάρια πριν το τέλος της δεκαετίας, καταγράφοντας σύνθετους ετήσιους ρυθμούς ανάπτυξης άνω του 30–40% (The Business Research Company, 2023; ResearchAndMarkets, 2025).



Σχήμα 12 Εξέλιξη εσόδων Quantum Computing-as-a-Service (QCaaS), 2023–2025 (McKinsey, 2024; SpinQ, 2025 · ίδια επεξεργασία)

Πέρα από το QCaaS, αναπτύσσονται επιχειρηματικά μοντέλα πλατφορμών, όπου οι πάροχοι δεν περιορίζονται στην παροχή πρόσβασης σε hardware, αλλά δημιουργούν ολοκληρωμένα οικοσυστήματα που συνδέουν διαφορετικούς τύπους χρηστών και τεχνολογικών «στρωμάτων» (Specter Insights, 2025; Quantum Insider, 2025). Οι πλατφόρμες αυτές παρέχουν περιβάλλοντα ανάπτυξης, βιβλιοθήκες αλγορίθμων, εργαλεία διαχείρισης υβριδικών κβαντο-κλασικών εργασιών και, συχνά, «αγορές» (marketplaces) για εξειδικευμένα modules ανά κλάδο, επιδιώκοντας να δημιουργήσουν δικτυακά αποτελέσματα μέσω της συσσώρευσης προγραμματιστών, ερευνητικών ομάδων και επιχειρηματικών χρηστών (Specter Insights, 2025). Έτσι, ο πάροχος πλατφόρμας λειτουργεί ως «διαμεσολαβητής» μεταξύ hardware vendors, ανεξάρτητων προγραμματιστών και τελικών χρηστών, αντλώντας αξία τόσο από τέλη χρήσης όσο και από έσοδα συνεργασιών, προωθητικών ενεργειών και πρόσθετων υπηρεσιών υποστήριξης (Spinquantum, 2025). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό αυτού του μοντέλου είναι ότι επιτρέπει την παράλληλη συνύπαρξη πολλαπλών hardware τεχνολογιών, δημιουργώντας ευελιξία για τους χρήστες και μειώνοντας τον κίνδυνο «κλειδώματος» σε ένα μόνο τεχνολογικό μονοπάτι.

Σημαντικό συμπλήρωμα στα as-a-service και platform μοντέλα αποτελούν οι εξειδικευμένες συμβουλευτικές και υπηρεσίες ολοκλήρωσης (consulting και integration), οι οποίες απευθύνονται κυρίως σε μεγάλες επιχειρήσεις που δεν διαθέτουν εσωτερική τεχνογνωσία για να σχεδιάσουν και να υλοποιήσουν αυτόνομα στρατηγικές υιοθέτησης κβαντικής υπολογιστικής (QuantumShift, 2025; QubitValue, 2025). Οι πάροχοι τέτοιων υπηρεσιών προσφέρουν τυπικά ένα «end-to-end» φάσμα δραστηριοτήτων, από την αξιολόγηση ετοιμότητας (quantum readiness assessment), τον εντοπισμό και την ιεράρχηση use cases, μέχρι το σχεδιασμό οδικών χαρτών, την επιλογή τεχνολογικών συνεργατών και την υλοποίηση πιλοτικών έργων (QuantumShift, 2025). Σε πιο ώριμες φάσεις, οι ίδιοι φορείς αναλαμβάνουν ρόλο integrator, σχεδιάζοντας αρχιτεκτονικές που συνδυάζουν κβαντικούς και κλασικούς πόρους, προσαρμόζοντας workflows και εκπαιδεύοντας προσωπικό, ενώ συχνά συνάπτουν και συμβάσεις συνεχούς υποστήριξης ή managed services (QubitValue, 2025). Το

επιχειρηματικό μοντέλο βασίζεται σε έσοδα από συμβουλευτικά έργα, εκπαιδεύσεις και, ενίοτε, συμμετοχή στην παραγόμενη αξία μέσω μακροχρόνιων συνεργασιών ή shared-risk συμβολαίων.

καθαρές κατηγορίες QaaS, platforms και consulting, η αγορά τείνει να διαμορφώσει υβριδικά επιχειρηματικά μοντέλα, όπου οι εταιρείες συνδυάζουν πολλαπλές ροές εσόδων και ρόλους μέσα στο οικοσύστημα (OA Quantum Labs, 2025; Spinqanta, 2025). Ορισμένες startups, για παράδειγμα, προσφέρουν εξειδικευμένες λύσεις σε συγκεκριμένους κλάδους (όπως η επιστήμη υλικών ή η βελτιστοποίηση logistics, αξιοποιώντας QCaaS υποδομές τρίτων, δικές τους βιβλιοθήκες αλγορίθμων και συμβουλευτικές υπηρεσίες για co-development με μεγάλους πελάτες (OA Quantum Labs, 2025). Άλλοι παίκτες τοποθετούνται ως «οριζόντιοι» πάροχοι εργαλείων (tooling), εστιάζοντας σε compilers, workflow managers ή εργαλεία ασφάλειας τύπου «quantum-entropy-as-a-service», τα οποία μπορούν να ενσωματωθούν σε πολλαπλές πλατφόρμες (Specter Insights, 2025). Αυτή η ποικιλομορφία αντικατοπτρίζει την πρώιμη φάση της αγοράς, όπου διαφορετικές στρατηγικές συνεξετάζονται, ενώ οι ίδιοι οι πάροχοι προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν τον κίνδυνο μέσω διαφοροποίησης των εσόδων τους.

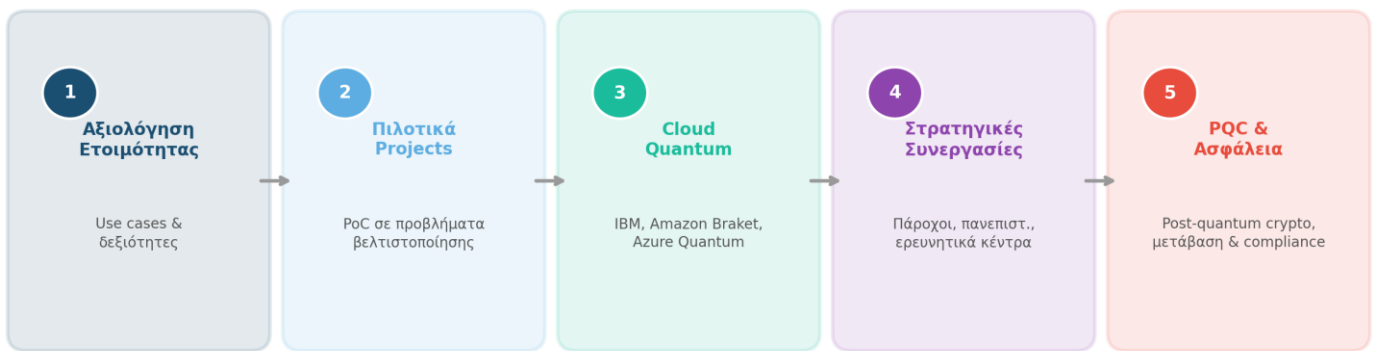
Ένα αξιόλογο στοιχείο καινοτομίας στα κβαντικά επιχειρηματικά μοντέλα είναι η ενσωμάτωση υβριδικών κβαντο-κλασικών αρχιτεκτονικών, τόσο σε τεχνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο (Spinqanta, 2025; Credence Research, 2025). Πολλές λύσεις προσφέρονται όχι ως «καθαρά» κβαντικές, αλλά ως services που εντάσσουν κβαντικές ρουτίνες μέσα σε γενικότερες κλασικές pipelines, με την τιμολόγηση να αντανakλά τη συνολική αξία της λύσης και όχι μόνο τον κβαντικό χρόνο χρήσης (Navistrata Analytics, 2025; Simprliaxis, 2025). Αυτό επιτρέπει την εμπορική αξιοποίηση κβαντικών ή κβαντικά εμπνευσμένων αλγορίθμων ήδη στην τρέχουσα NISQ φάση, δημιουργώντας value propositions που βασίζονται στην ολοκληρωμένη λύση (π.χ. βελτιστοποίηση εφοδιαστικής) και όχι στην τεχνολογία per se. Για τους παρόχους, η υβριδική αυτή προσέγγιση λειτουργεί ως γέφυρα ανάμεσα στην παρούσα τεχνολογική πραγματικότητα και τις μελλοντικές fault-tolerant πλατφόρμες, ενώ για τους πελάτες μειώνει τον αντιληπτό τεχνολογικό και επενδυτικό κίνδυνο.

Η εξέλιξη των επιχειρηματικών μοντέλων στην κβαντική υπολογιστική πρέπει να ιδωθεί σε συνάρτηση με τη γενικότερη εξέλιξη της «quantum οικονομίας» και τη διαμόρφωση ενός πολυεπίπεδου οικοσυστήματος, στο οποίο συνυπάρχουν hardware vendors, cloud providers, πλατφόρμες, εξειδικευμένοι ISVs και συμβουλευτικοί οργανισμοί (Quantum CT, 2025; Spinqanta, 2025). Καθώς η αγορά ωριμάζει, είναι πιθανό να παρατηρηθεί συγκέντρωση σε ορισμένα επίπεδα (π.χ. σε παρόχους QCaaS) και διαφοροποίηση σε άλλα (π.χ. σε κλαδικές εφαρμογές και εξειδικευμένα consulting), με τις επιχειρήσεις να καλούνται να επιλέξουν ουσιαστικά σε ποιο «στρώμα» της στοίβας θέλουν να τοποθετηθούν και ποιο μοντέλο δημιουργίας και σύλληψης αξίας ανταποκρίνεται καλύτερα στα συγκριτικά τους πλεονεκτήματα.

4.3 Στρατηγικές υιοθέτησης για μεγάλες επιχειρήσεις (pilots, partnerships, cloud quantum services)

Η υιοθέτηση κβαντικής υπολογιστικής από μεγάλες επιχειρήσεις ακολουθεί, σύμφωνα με πρόσφατα ουσιαστικά roadmaps, μια σταδιακή διαδικασία που συνδυάζει αξιολόγηση ετοιμότητας, πιλοτικά έργα, ανάπτυξη ικανοτήτων και ενσωμάτωση υβριδικών κβαντο-κλασικών αρχιτεκτονικών (CloudAngles, 2024; Xavier Pakkam Isaac, 2025). Στην τρέχουσα φάση ωρίμανσης, η επικρατούσα σύσταση είναι οι επιχειρήσεις να περιορίσουν τις άμεσες επενδύσεις σε ελεγχόμενα pilots μέσω cloud-based πλατφορμών και να εστιάσουν στην οικοδόμηση οργανωσιακής γνώσης και στην προετοιμασία για μελλοντική κλιμάκωση, αντί για μαζική υιοθέτηση ή ανάπτυξη ιδιόκτητων κβαντικών υποδομών (EM360, 2025; IBM, 2025).

Πολλά πλαίσια προτείνουν μια φάση-κατά-φάση προσέγγιση στην υιοθέτηση, η οποία ξεκινά με αξιολόγηση ετοιμότητας (readiness assessment), συνεχίζεται με πιλοτικές εφαρμογές και καταλήγει σε επιλεκτική κλιμάκωση των πιο επιτυχημένων use cases (CloudAngles, 2024; World Economic Forum, 2025). Σε μια τυπική εκδοχή, η βραχυπρόθεσμη φάση (0–12 μήνες) περιλαμβάνει χαρτογράφηση δεδομένων και διαδικασιών, εντοπισμό προβλημάτων υψηλής υπολογιστικής έντασης, εκτίμηση δεξιοτήτων και δημιουργία μικρών διεπιστημονικών ομάδων, καθώς και πρώτο κύμα proof-of-concept projects σε περιορισμένο εύρος (CloudAngles, 2024). Η μεσοπρόθεσμη φάση (1–3 έτη) εστιάζει στην επέκταση επιτυχημένων pilots, στην ενσωμάτωση κβαντικών workflows σε υπάρχουσες υποδομές και στην ανάπτυξη εσωτερικής τεχνογνωσίας, ενώ μακροπρόθεσμο (3–5 έτη και άνω) στόχος είναι η επιχειρησιακή ενσωμάτωση όσων κβαντικών εφαρμογών αποδειχθούν αξιόπιστες και οικονομικά αποδοτικές, ιδίως σε κλάδους με υψηλό «value at stake» (CloudAngles, 2024; World Economic Forum, 2025).



Σχήμα 13 Στάδια υιοθέτησης κβαντικής υπολογιστικής σε οργανισμούς (McKinsey, 2025; IBM IBV, 2022; WEF, 2025 · ίδια επεξεργασία)

Στο επίκεντρο των βασικών υιοθέτησης βρίσκονται τα πιλοτικά έργα (pilots), τα οποία λειτουργούν ως μηχανισμοί μάθησης και αποτίμησης πραγματικής αξίας σε συγκεκριμένα επιχειρησιακά προβλήματα (EM360, 2025; WJARR, 2025). Οι αναλύσεις συστήνουν την επιλογή use cases που συνδυάζουν τεχνική καταλληλότητα (υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα, σαφές quantum-relevant component) με επιχειρησιακή σημασία και δυνατότητα μέτρησης αποτελεσμάτων, όπως η βελτιστοποίηση δικτύων logistics, η επιτάχυνση Monte Carlo προσομοιώσεων σε χρηματοοικονομικά μοντέλα ή η στοχευμένη προσομοίωση μοριακών δομών στην R&D (WJARR, 2025; Entrée Capital, 2025). Η διεξαγωγή των pilots μέσω cloud-based quantum πλατφορμών επιτρέπει τον έλεγχο κόστους, τη γρήγορη εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών παρόχων και hardware τεχνολογιών και τη χρήση υβριδικών κβαντο-κλασικών pipelines, μειώνοντας το τεχνολογικό ρίσκο (EM360, 2025; WJARR, 2025).

Η επιλογή των κατάλληλων cloud quantum υπηρεσιών αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της ευρύτερης, καθώς η συντριπτική πλειονότητα των επιχειρήσεων αναμένεται να χρησιμοποιήσει κβαντικούς πόρους μέσω cloud και όχι μέσω ιδιόκτητων συστημάτων (WJARR, 2025; Quantum CT, 2025). Το προτεινόμενο Quantum-Cloud Hybrid Adoption Model (QCHAM) περιγράφει μια αρχιτεκτονική τριών επιπέδων: (i) Quantum Computing-as-a-Service (QCaaS) για κλιμακώσιμη πρόσβαση σε διάφορους κβαντικούς επεξεργαστές, (ii) Hybrid Quantum-Classical Orchestration (HQCO) για βέλτιστη κατανομή φορτίων ανάμεσα σε κβαντικά και κλασικά συστήματα και (iii) Quantum-Resilient Security (QRS) για ενσωμάτωση post-quantum κρυπτογραφίας και κβαντικά ενισχυμένης ασφάλειας (WJARR, 2025; Quantum CT, 2025). Στην πράξη, αυτό μεταφράζεται σε στρατηγικές multi-cloud ή hybrid-cloud, όπου οι επιχειρήσεις συνδυάζουν υπηρεσίες από μεγάλους παρόχους cloud με εξειδικευμένες quantum

πλατφόρμες, διασφαλίζοντας ευελιξία, αποφυγή lock-in και καλύτερη εφαρμογή των διαθέσιμων hardware τεχνολογιών.

Το ίδιο σημαντικές με τους pilots είναι οι στρατηγικές συνεργασίες (partnerships) που αναπτύσσουν οι μεγάλες επιχειρήσεις με ένα ευρύ φάσμα φορέων του κβαντικού οικοσυστήματος: παρόχους τεχνολογίας, πανεπιστήμια, ερευνητικά κέντρα, consortia και νεοφυείς επιχειρήσεις (World Economic Forum, 2025; CloudAngles, 2024). Πολλές αναλύσεις προτείνουν τη δημιουργία εσωτερικών «quantum steering committees» ή ομάδων ευρύτερης, οι οποίες αναλαμβάνουν να χαρτογραφήσουν το οικοσύστημα συνεργατών, να συμμετάσχουν σε κλαδικά ή διατομεακά consortia και να εξασφαλίσουν την ύπαρξη ενός C-level «sponsor» που θα διασφαλίζει τη σύνδεση των πειραματικών έργων με τις ευρύτερες επιχειρηματικές προτεραιότητες (World Economic Forum, 2025). Ομοίως, προωθείται η σύναψη στρατηγικών συμμαχιών με παρόχους quantum cloud, με στόχο την από κοινού ανάπτυξη λύσεων, την πρόσβαση σε roadmaps hardware και τη συμμετοχή σε κοινά προγράμματα εκπαίδευσης και ανάπτυξης δεξιοτήτων (WJARR, 2025; EM360, 2025).

Ένας επιπλέον άξονας των βασικών υιοθέτησης αφορά την ασφάλεια και τη συμμόρφωση, ιδίως υπό το πρίσμα των χρονοδιαγραμμάτων για τη μετάβαση σε post-quantum cryptography (PQC) που τίθενται από ρυθμιστικές αρχές (EM360, 2025; OECD, 2025b). Σε πολλές περιπτώσεις, οι συστάσεις σημειώνουν ότι η «ασφάλεια πρέπει να προηγείται» και ότι οι επιχειρήσεις οφείλουν πρώτα να χαρτογραφήσουν τα κρυπτογραφικά τους assets, να ευθυγραμμιστούν με τα νέα πρότυπα PQC και να σχεδιάσουν τη μετάβαση των βασικών συστημάτων τους, πριν από την ευρεία υιοθέτηση κβαντικών εφαρμογών σε άλλους τομείς (EM360, 2025). Αντίστοιχα, τα πλαίσια όπως το QCHAM εντάσσουν την κβαντική ανθεκτικότητα (quantum-resilient security) ως τρίτο πυλώνα, δίπλα στο QCaaS και το HQCO, υπογραμμίζοντας ότι η κβαντική υιοθέτηση δεν μπορεί να αγνοεί τους κινδύνους που η ίδια η τεχνολογία δημιουργεί για την ασφάλεια (WJARR, 2025; Quantum CT, 2025).

Σαν τελευταία παρατήρηση, οι στρατηγικές υιοθέτησης κβαντικής υπολογιστικής για μεγάλες επιχειρήσεις απαιτούν συνεχή εξισορρόπηση μεταξύ επείγουσας δράσης και ρεαλισμού (World Economic Forum, 2025; Berkeley CMR, 2025). Από τη μία πλευρά, τα deadlines για τη μετάβαση σε PQC, οι πρώτες επιτυχείς υλοποιήσεις σε logistics, χρηματοοικονομικά και φαρμακοβιομηχανία και η ταχεία εξέλιξη των hardware roadmaps δημιουργούν πίεση για έγκαιρη προετοιμασία και συμμετοχή (EM360, 2025; WJARR, 2025). Από την άλλη πλευρά, η αβεβαιότητα ως προς το ποια τεχνολογικά μονοπάτια θα επικρατήσουν, οι περιορισμοί των NISQ συστημάτων και η ανάγκη για πειθαρχημένη διαχείριση επενδυτικών πόρων επιβάλλουν μια σταδιακή και πειραματική προσέγγιση, με σαφή κριτήρια επιτυχίας, μηχανισμούς ανατροφοδότησης και στενή σύνδεση μεταξύ τεχνικών πειραμάτων και επιχειρηματικών αποτελεσμάτων (CloudAngles, 2024; World Economic Forum, 2025). Εδώ, οι επιχειρήσεις που θα καταφέρουν να συνδυάσουν έγκαιρα pilots, στοχευμένες συνεργασίες και προνοητική διαχείριση ασφάλειας και δεξιοτήτων είναι πιθανό να βρεθούν σε πλεονεκτική θέση όταν η κβαντική υπολογιστική περάσει από την πειραματική στη συστηματική επιχειρησιακή χρήση.

4.4 Πλαίσιο ανάλυσης για startups στο χώρο της κβαντικής υπολογιστικής

Η διεθνής συζήτηση για την εμπορική χρήση της κβαντικής υπολογιστικής δείχνει ότι οι νεοφυείς επιχειρήσεις δεν μπορούν να βασιστούν σε γραμμικά, «κλασικά» μοτίβα ανάπτυξης, αλλά χρειάζονται ειδικά προσαρμοσμένες βασικές που λαμβάνουν υπόψη τον υψηλό βαθμό τεχνολογικής αβεβαιότητας, τον έντονο κεφαλαιουχικό χαρακτήρα του πεδίου και τη μακρά χρονική διάρκεια ωρίμανσης (McKinsey, 2025; World Economic Forum, 2025). Για να αναλυθεί συστηματικά η θέση και οι επιλογές μιας quantum startup, προτείνεται εδώ ένα τετραδιάστατο εννοιολογικό πλαίσιο, το

οποίο συνθέτει ευρήματα από τη βιβλιογραφία για deep-tech και quantum επιχειρηματικότητα με μια δομημένη προσέγγιση σχεδιασμού μεγάλης κλίμακας (National Academies, 2019; MIT Sloan, 2023). Το προτεινόμενο πλαίσιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο αναλυτικά, για τη χαρτογράφηση υπαρχόντων επιχειρηματικών σχημάτων, όσο και κανονιστικά, ως εργαλείο σχεδιασμού για νέες startups στον χώρο της κβαντικής υπολογιστικής.

Η πρώτη διάσταση του πλαισίου αφορά τη θέση της startup στην κβαντική στοίβα (quantum stack), διακρίνοντας μεταξύ τεσσάρων βασικών επιπέδων: (i) hardware και close-to-hardware τεχνολογίες, (ii) middleware / εργαλεία ανάπτυξης, (iii) εφαρμογές και λογισμικό σε επίπεδο κλάδων και (iv) υπηρεσίες και οικοσυστήματα (National Academies, 2019; McKinsey, 2025). Startups στο hardware επίπεδο επωμίζονται υψηλές τεχνολογικές και χρηματοδοτικές απαιτήσεις, αλλά έχουν τη δυνατότητα να διαμορφώσουν θεμελιώδη standards και να αποκτήσουν ισχυρή πνευματική ιδιοκτησία, ενώ εταιρείες σε επίπεδο middleware και εργαλείων προσανατολίζονται στη δημιουργία οριζόντιων λύσεων (όπως compilers, orchestrators, SDKs) που μπορούν να υποστηρίξουν πολλαπλά hardware backends (McKinsey, 2025). Στο επίπεδο εφαρμογών, οι startups εστιάζουν σε συγκεκριμένους κλάδους (π.χ. χρηματοοικονομικά, logistics, φαρμακοβιομηχανία), μέσω κβαντικών ή κβαντικά εμπνευσμένων αλγορίθμων για την επίλυση σαφώς καθορισμένων επιχειρηματικών προβλημάτων, ενώ στο επίπεδο υπηρεσιών και οικοσυστημάτων δραστηριοποιούνται εταιρείες που προσφέρουν consulting, integration, εκπαίδευση ή λειτουργούν ως πλατφόρμες διασύνδεσης μεταξύ τεχνολογικών παρόχων και τελικών χρηστών (Quantum Innovation, 2023; QAI Ventures, 2023).

Η δεύτερη διάσταση σχετίζεται με την επιλογή και τη διαμόρφωση της αγοράς-στόχου και της αξιακής πρότασης (value proposition), δίνοντας έμφαση στη σαφή απάντηση στο ερώτημα «ποιο πρόβλημα λύνει η startup καλύτερα από τις κλασικές λύσεις;» (World Economic Forum, 2025; Quantum Innovation, 2023). Εδώ είναι χρήσιμη η υιοθέτηση μιας «value-chain» οπτικής: η startup οφείλει να εντοπίσει σε ποιο σημείο της αλυσίδας αξίας ενός κλάδου δημιουργείται ο μεγαλύτερος πόνος (pain point), ποιες είναι οι υφιστάμενες κλασικές προσεγγίσεις και με ποιον τρόπο η κβαντική τεχνολογία μπορεί να προσφέρει είτε δραστικά βελτιωμένη απόδοση είτε νέες δυνατότητες (Quantum Innovation, 2023). Στο πλαίσιο αυτό, προτείνεται η κατηγοριοποίηση των value propositions σε τρεις βασικές ομάδες: (i) επιτάχυνση ή βελτίωση υφιστάμενων αναλυτικών/υπολογιστικών διαδικασιών (π.χ. optimization, ML), (ii) δυνατότητα σχεδιασμού νέων προϊόντων/υπηρεσιών (π.χ. νέα φάρμακα, υλικά) και (iii) ενίσχυση ασφάλειας, συμμόρφωσης και ανθεκτικότητας (π.χ. PQC, QKD) (World Economic Forum, 2025). Η σαφής τοποθέτηση σε μια ή περισσότερες από αυτές τις κατηγορίες είναι βασική τόσο για την αξιολόγηση της δυνητικής αγοράς όσο και για την επικοινωνία με επενδυτές και πελάτες.

Η τρίτη διάσταση του πλαισίου αφορά το επιχειρηματικό μοντέλο και τη στρατηγική σύλληψης αξίας (business model & value capture), όπου οι quantum startups καλούνται να επιλέξουν (ή να συνδυάσουν) μεταξύ διακριτών μοντέλων όπως as-a-service, πλατφόρμα, licensing IP και consulting (McKinsey, 2025; Applied Quantum, 2025). Startups που εστιάζουν σε λογισμικό και εφαρμογές μπορούν να υιοθετήσουν μοντέλα συνδρομής (subscription) ή χρήσης (usage-based), χρησιμοποιώντας QCaaS υποδομές τρίτων και παρέχοντας προστιθέμενη αξία μέσω εξειδικευμένων αλγορίθμων, domain knowledge και εργαλείων ενσωμάτωσης (Applied Quantum, 2025). Αντίθετα, εταιρείες με ισχυρή τεχνολογική βάση μπορεί να βασιστούν σε licensing της πνευματικής τους ιδιοκτησίας, σε συνεπενδύσεις με βιομηχανικούς εταίρους ή σε μεικτά μοντέλα όπου μέρος της αξίας αποτυπώνεται σε έσοδα από υπηρεσίες και μέρος σε equity συμμετοχές και στρατηγικά συμβόλαια (McKinsey, 2025; Quantum Business Playbook, 2024). Στο πλαίσιο του προτεινόμενου framework, το επιχειρηματικό μοντέλο πρέπει να αξιολογείται σε συνάρτηση με τη θέση στη στοίβα και τη φύση της αγοράς-στόχου: για παράδειγμα, hardware startups τείνουν να χρειάζονται μεγάλες, μεγάλης

εμβέλειας στρατηγικές συνεργασίες, ενώ application-level startups μπορούν πιο εύκολα να αναπτυχθούν με ευέλικτα SaaS ή QaaS μοντέλα.

Η τέταρτη διάσταση αφορά τον χρονισμό και τη διαχείριση ρίσκου (timing & risk posture), αναγνωρίζοντας ότι οι quantum startups δραστηριοποιούνται σε ένα περιβάλλον όπου ο ρυθμός τεχνολογικής προόδου, τα χρονοδιαγράμματα υιοθέτησης από την αγορά και η εξέλιξη της ρυθμιστικής πλαισίωσης είναι εξαιρετικά αβέβαια (National Academies, 2019; World Economic Forum, 2025). Με βάση insights από deep-tech στρατηγικές, μπορεί να διακριθούν τέσσερα αρχέτυπα στάσης απέναντι στον κίνδυνο: «orchestrators» που επενδύουν επιθετικά για να διαμορφώσουν το πεδίο, «facilitators» που εστιάζουν σε υποστηρικτικές τεχνολογίες, «scouts» που στοχεύουν σε νωρίς βιώσιμες niches και «observers» που επιδιώκουν να διατηρήσουν ευελιξία με περιορισμένη έκθεση (MIT Sloan, 2023). Οι quantum startups, ανάλογα με τους πόρους, τη γεωγραφία και το επίπεδο μαθηματικής/τεχνικής εξειδίκευσης, καλούνται να επιλέξουν συνειδητά σε ποιο από αυτά τα αρχέτυπα θέλουν να ενταχθούν και να σχεδιάσουν ανάλογα το go-to-market πλάνο τους, λαμβάνοντας υπόψη και τη χρονική ακολουθία «NISQ προς fault-tolerant» ως αναγκαίο παράγοντα (National Academies, 2019).

Συνοψίζοντας, το προτεινόμενο πλαίσιο ανάλυσης για κβαντικές startups μπορεί να αποτυπωθεί σε έναν τετραδιάστατο «Quantum Startup Strategy Canvas», όπου κάθε startup χαρτογραφείται ως προς: (1) θέση στην κβαντική στοίβα, (2) αγορά-στόχο και τύπο value proposition, (3) επιχειρηματικό μοντέλο και μηχανισμούς σύλληψης αξίας και (4) χρονισμό και στάση απέναντι στον κίνδυνο. Η χρήση ενός τέτοιου canvas επιτρέπει στους ιδρυτές και στους επενδυτές να εντοπίσουν ασυνεπείς επιλογές (π.χ. υψηλού ρίσκου hardware στρατηγική με περιορισμένα κεφάλαια και ασαφή αγορά-στόχο), να συγκρίνουν εναλλακτικά σενάρια τοποθέτησης και να σχεδιάσουν σταδιακές πορείες εξέλιξης, στις οποίες η startup μπορεί να ξεκινήσει από ένα επίπεδο της στοίβας ή μια niche αγορά και, καθώς ωριμάζουν η τεχνολογία και η ζήτηση, να μετακινηθεί ή να επεκτείνει τη δραστηριότητά της (Quantum Innovation, 2023; Applied Quantum, 2025). Σε συνδυασμό με τα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής, το πλαίσιο αυτό φιλοδοξεί να προσφέρει ένα εργαλείο ανάλυσης και σχεδιασμού μεγάλης κλίμακας ειδικά προσαρμοσμένο στις ιδιαιτερότητες της κβαντικής υπολογιστικής ως πεδίου deep-tech επιχειρηματικότητας.

Κεφάλαιο 5 - Case study: Κβαντικοί υπολογιστές στα logistics

Το πέμπτο κεφάλαιο εστιάζει στην εφαρμογή των κβαντικών και quantum-inspired υπολογιστικών τεχνικών στον χώρο των logistics και της εφοδιαστικής αλυσίδας, λειτουργώντας ως γέφυρα ανάμεσα στο θεωρητικό υπόβαθρο των προηγούμενων κεφαλαίων και σε δύο συγκεκριμένες, πρακτικές μελέτες περίπτωσης. Η διεθνής βιβλιογραφία δείχνει ότι τα logistics αποτελούν έναν από τους κλάδους με τη μεγαλύτερη πιθανότητα να εκμεταλλευτούν πρώιμα κβαντικούς αλγόριθμους για βελτιστοποίηση και διαχείριση κινδύνου, λόγω της υψηλής πολυπλοκότητας των δικτύων, της αβεβαιότητας και της πίεσης για μείωση κόστους και εκπομπών. (IBM Institute for Business Value, 2022; McKinsey & Company, 2024, 2025)

Αρχικά, παρουσιάζεται συνοπτικά ο κλάδος των logistics και της εφοδιαστικής αλυσίδας, με έμφαση στις κύριες λειτουργίες (μεταφορές, αποθήκευση, last-mile διανομή και λιμενικές επιχειρήσεις) και στα κύρια λειτουργικά προβλήματα δρομολόγησης, χωρητικότητας και διαχείρισης διαταραχών που

αντιμετωπίζουν οι επιχειρήσεις σε ένα παγκοσμιοποιημένο και ευμετάβλητο περιβάλλον. (IBM Institute for Business Value, 2022) Στη συνέχεια, αναλύονται τα κλασικά προβλήματα βελτιστοποίησης στα logistics, όπως το Vehicle Routing Problem (VRP) και οι παραλλαγές του, τα προβλήματα last-mile delivery, φορτοεκφόρτωσης και σχεδιασμού δικτύου, καθώς και οι κυρίαρχες κλασικές προσεγγίσεις επίλυσής τους μέσω ακριβών μεθόδων, heuristics και metaheuristics. (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023)

Το τρίτο μέρος του κεφαλαίου εισάγει τις τεχνολογικές λύσεις που βασίζονται σε κβαντικούς και quantum-inspired αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται ενδεικτικά παραδείγματα χρήσης quantum annealing σε προβλήματα logistics, όπως οι εφαρμογές της D-Wave σε λιμενικά περιβάλλοντα και σε σύνθετα προβλήματα δρομολόγησης και κατανομής πόρων, καθώς και περιπτώσεις quantum-inspired ή vector annealing, όπως το πρόγραμμα της NEC Fielding για βελτιστοποίηση διανομών και δρομολογίων. (NEC Corporation, 2019; Streif et al., 2023) Παράλληλα, συζητούνται υβριδικές κβαντο-κλασικές προσεγγίσεις (π.χ. QAOA, variational methods) όπως αυτές περιγράφονται τόσο στη θεωρητική βιβλιογραφία της NISQ εποχής όσο και σε στρατηγικά κείμενα βιομηχανικών φορέων. (Preskill, 2018; IBM, 2021)

Το τέταρτο και κεντρικό τμήμα του κεφαλαίου αποτελείται από δύο μελέτες περίπτωσης. Η πρώτη είναι ένα εκτενές case study πάνω σε εφαρμογή κβαντικών τεχνικών σε πρόβλημα last-mile logistics, βασισμένο σε συνεργασία της IBM με βιομηχανικό κατασκευαστή εμπορικών οχημάτων και σε εφαρμογές δρομολόγησης σε αστικό περιβάλλον. Η μελέτη περίπτωσης εστιάζει στη δρομολόγηση στόλου με εκατοντάδες έως χιλιάδες στάσεις σε μεγαλουπόλεις όπως η Νέα Υόρκη, υπό περιορισμούς χρονικών παραθύρων, χωρητικότητας και επιπέδων εξυπηρέτησης, και καταγράφει τη χρήση υβριδικής κλασικής-κβαντικής αρχιτεκτονικής για τη βελτίωση κόστους και αξιοπιστίας. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024) Η ανάλυση δομείται συστηματικά: ξεκινά από την περιγραφή του οργανισμού και του επιχειρησιακού προβλήματος, προχωρά στη μαθηματική μοντελοποίησή του ως προβλήματος VRP με χρονικά παράθυρα και περιορισμούς πόρων, αναλύει την τεχνολογική λύση και τον ρόλο των κβαντικών εργαλείων, παρουσιάζει τα ποσοτικά αποτελέσματα και, τέλος, εξετάζει τις επιπτώσεις στο επιχειρηματικό μοντέλο και την καινοτομία της εταιρείας. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2021)

Το κεφάλαιο κλείνει με τις ευκαιρίες που δημιουργούνται για νεοφυείς επιχειρήσεις στον χώρο των logistics από την ωρίμανση κβαντικών και quantum-inspired τεχνολογιών. Βασιζόμενο σε διεθνείς αναλύσεις για την πορεία των quantum startups, το επενδυτικό τοπίο και τα οικοσυστήματα καινοτομίας, παρουσιάζει προοπτικές για υπηρεσίες “quantum optimization-as-a-service” προς 3PL παρόχους και last-mile startups, πιθανές στρατηγικές συνεργασίες με hyperscalers (AWS Braket, IBM Quantum, Microsoft Azure Quantum), καθώς και εμπόδια εισόδου και κατευθύνσεις για MVP στρατηγικές σε μια υποθετική quantum-logistics startup. (Seskir et al., 2022; OECD, 2025; McKinsey & Company, 2024, 2025) Με αυτόν τον τρόπο, το Κεφάλαιο 5 επιχειρεί να καταδείξει όχι μόνο την τεχνική σκοπιμότητα των κβαντικών μεθόδων στα logistics, αλλά και τη δυνατότητά τους να αναδιαμορφώσουν υφιστάμενα επιχειρηματικά μοντέλα και να ενεργοποιήσουν νέες μορφές επιχειρηματικής αξίας. (IBM, 2021; IBM Institute for Business Value, 2022)

5.1 Ο κλάδος των logistics και της εφοδιαστικής αλυσίδας

Ο κλάδος των logistics αποτελεί βασικό υποσύνολο της ευρύτερης εφοδιαστικής αλυσίδας, εστιάζοντας στον αποτελεσματικό προγραμματισμό, εκτέλεση και έλεγχο της ροής αγαθών, πληροφοριών και συναφών υπηρεσιών από το σημείο προέλευσης έως τον τελικό πελάτη. Σε αντίθεση με την έννοια της supply chain, που περιλαμβάνει αποφάσεις σχεδιασμού δικτύου, sourcing και διακυβέρνησης σχέσεων με προμηθευτές, τα logistics έχουν περισσότερο τακτικό και

επιχειρησιακό χαρακτήρα, με κεντρική έμφαση στη μεταφορά, την αποθήκευση και τον χειρισμό των προϊόντων. (DHL, 2024; ThroughPut Inc., 2025) Η σημασία του κλάδου ενισχύεται σε ένα περιβάλλον παγκοσμιοποιημένων αγορών, αυξανόμενης πολυπλοκότητας των δικτύων και έντονης πίεσης για μείωση κόστους και χρόνων παράδοσης, αλλά και για βελτίωση της βιωσιμότητας. (IBM Institute for Business Value, 2022)

Σε μακροοικονομικό επίπεδο, η θαλάσσια μεταφορά αποτελεί τον κυριότερο τρόπο μετακίνησης φορτίων διεθνώς, με εκτιμήσεις να αναφέρουν ότι περίπου το 80–90% του όγκου του παγκόσμιου εμπορίου σε αγαθά μεταφέρεται δια θαλάσσης. (OECD, 2024; International Chamber of Shipping, 2023) Οι θαλάσσιες μεταφορές συνδέουν ηπείρους και μεγάλα λιμενικά hubs, τα οποία λειτουργούν ως κομβικά σημεία μεταφόρτωσης και ενοποίησης φορτίων, πριν αυτά εισέλθουν σε χερσαία δίκτυα μεταφοράς. Την ίδια στιγμή, η ραγδαία άνοδος του ηλεκτρονικού εμπορίου και των προσδοκιών για ταχείες παραδόσεις έχει αυξήσει σημαντικά το βάρος της λεγόμενης last-mile διανομής, δηλαδή του τελευταίου σκέλους μεταφοράς από το τοπικό κέντρο διανομής στον τελικό παραλήπτη. (IBM Institute for Business Value, 2022; Route4Me, 2024)

Οι κύριες λειτουργίες των logistics μπορούν σχηματικά να ομαδοποιηθούν σε τέσσερις κατηγορίες: μεταφορές, αποθήκευση και διαχείριση αποθεμάτων, last-mile διανομή και λιμενικά logistics. Οι μεταφορές καλύπτουν τη μετακίνηση προϊόντων μεταξύ κόμβων της αλυσίδας (όπως εργοστάσια, κεντρικές αποθήκες και περιφερειακά κέντρα διανομής) μέσω οδικών, σιδηροδρομικών, θαλάσσιων ή αεροπορικών μέσων, με στόχο την επίτευξη ενός βέλτιστου συμβιβασμού μεταξύ κόστους, χρόνου και αξιοπιστίας. (DHL, 2024; IBM, 2024) Η αποθήκευση και η διαχείριση αποθεμάτων αφορούν τον σχεδιασμό και τη λειτουργία αποθηκών, cross-docking κέντρων και hubs, καθώς και την αποφασιστική ισορροπία μεταξύ επιπέδων αποθεμάτων και επιθυμημένου επιπέδου εξυπηρέτησης. (ThroughPut Inc., 2025)

Η last-mile διανομή αποτελεί το πιο πελατοκεντρικό τμήμα της εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς αφορά την τελική παράδοση των προϊόντων από ένα κέντρο διανομής σε σπίτια, καταστήματα ή σημεία παραλαβής. (Route4Me, 2024; Wikipedia, 2024) Χαρακτηρίζεται από υψηλή ένταση εργασίας, μεγάλη αβεβαιότητα στη ζήτηση, γεωγραφική διασπορά παραληπτών και πληθώρα επιχειρησιακών περιορισμών (χρονικά παράθυρα παράδοσης, περιορισμοί πρόσβασης, κυκλοφοριακές συνθήκες), γεγονός που την καθιστά δυσανάλογα ακριβή: μελέτες εκτιμούν ότι μπορεί να αντιστοιχεί σε πάνω από το ήμισυ του συνολικού κόστους μεταφοράς. (Route4Me, 2024) Από την άλλη πλευρά, τα port logistics επικεντρώνονται στην αποδοτική διαχείριση φορτίων εντός των λιμένων (από την εκφόρτωση πλοίων και τη διαχείριση τερματικών εμπορευματοκιβωτίων, μέχρι τον συντονισμό με χερσαίες μεταφορές και τελωνειακές διαδικασίες), λειτουργώντας ως κρίκος για την ομαλή ροή του διεθνούς εμπορίου. (Unisco, 2025; International Chamber of Shipping, 2023)

Πέρα από τις επιμέρους λειτουργίες, οι σύγχρονες αλυσίδες εφοδιασμού αντιμετωπίζουν αξιόλογες προκλήσεις που σχετίζονται με τη δρομολόγηση, τον προγραμματισμό χωρητικότητας και τη διαχείριση διαταραχών. Η αύξηση της μεταβλητότητας στη ζήτηση, τα συχνά φαινόμενα συμφόρησης σε λιμάνια και οδικά δίκτυα, καθώς και η πιθανότητα ακραίων συμβάντων (όπως πανδημίες, γεωπολιτικές κρίσεις ή φυσικές καταστροφές) καθιστούν την κλασική, σειριακή λήψη αποφάσεων ανεπαρκή. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024) Για τον λόγο αυτό, οι επιχειρήσεις στρέφονται σε προηγμένα μοντέλα βελτιστοποίησης, εργαλεία ανάλυσης δεδομένων και ψηφιακούς “control towers” προκειμένου να αυξήσουν τη διαφάνεια, την ταχύτητα αντίδρασης και την ανθεκτικότητα των logistics τους. (IBM, 2021; IBM, 2024)

Σε αυτή τη βάση, η κλιμάκωση της πολυπλοκότητας των logistics, τόσο σε επίπεδο μεγέθους δικτύων όσο και σε βαθμό αλληλεξαρτήσεων, δημιουργεί ένα «υπολογιστικό κενό» μεταξύ των

επιχειρησιακών αναγκών και των δυνατοτήτων των κλασικών μεθόδων βελτιστοποίησης. (IBM Institute for Business Value, 2022) Αυτό το κενό είναι που επιχειρούν να καλύψουν οι κβαντικές και quantum-inspired τεχνολογίες, οι οποίες εξετάζονται στις επόμενες υποενότητες ως δυνητικοί καταλύτες για πιο αποδοτική δρομολόγηση, καλύτερη αξιοποίηση χωρητικότητας και ευφύεστερη διαχείριση διαταραχών στα σύγχρονα logistics. (Preskill, 2018; IBM, 2021)

5.2 Προβλήματα βελτιστοποίησης στα logistics

Τα περισσότερα σύνθετα επιχειρησιακά ερωτήματα στα logistics, από τον σχεδιασμό δρομολογίων οχημάτων μέχρι τη χωροθέτηση αποθηκών και την εκχώρηση πόρων σε τερματικά, μπορούν να διατυπωθούν ως προβλήματα βελτιστοποίησης, στα οποία ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση κόστους ή χρόνου υπό ένα σύνολο περιορισμών. (Kumar & Panneerselvam, 2012) Κοινό χαρακτηριστικό πολλών από αυτά τα προβλήματα είναι ότι ανήκουν στην κατηγορία των NP-hard προβλημάτων, κάτι που σημαίνει ότι ο χρόνος επίλυσής τους αυξάνεται εκθετικά με το μέγεθος της εισόδου και ότι η εύρεση βέλτιστης λύσης για μεγάλα, ρεαλιστικά instances είναι πρακτικά αδύνατη με ακριβείς μεθόδους. (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023)

5.2.1 Vehicle Routing Problem και παραλλαγές

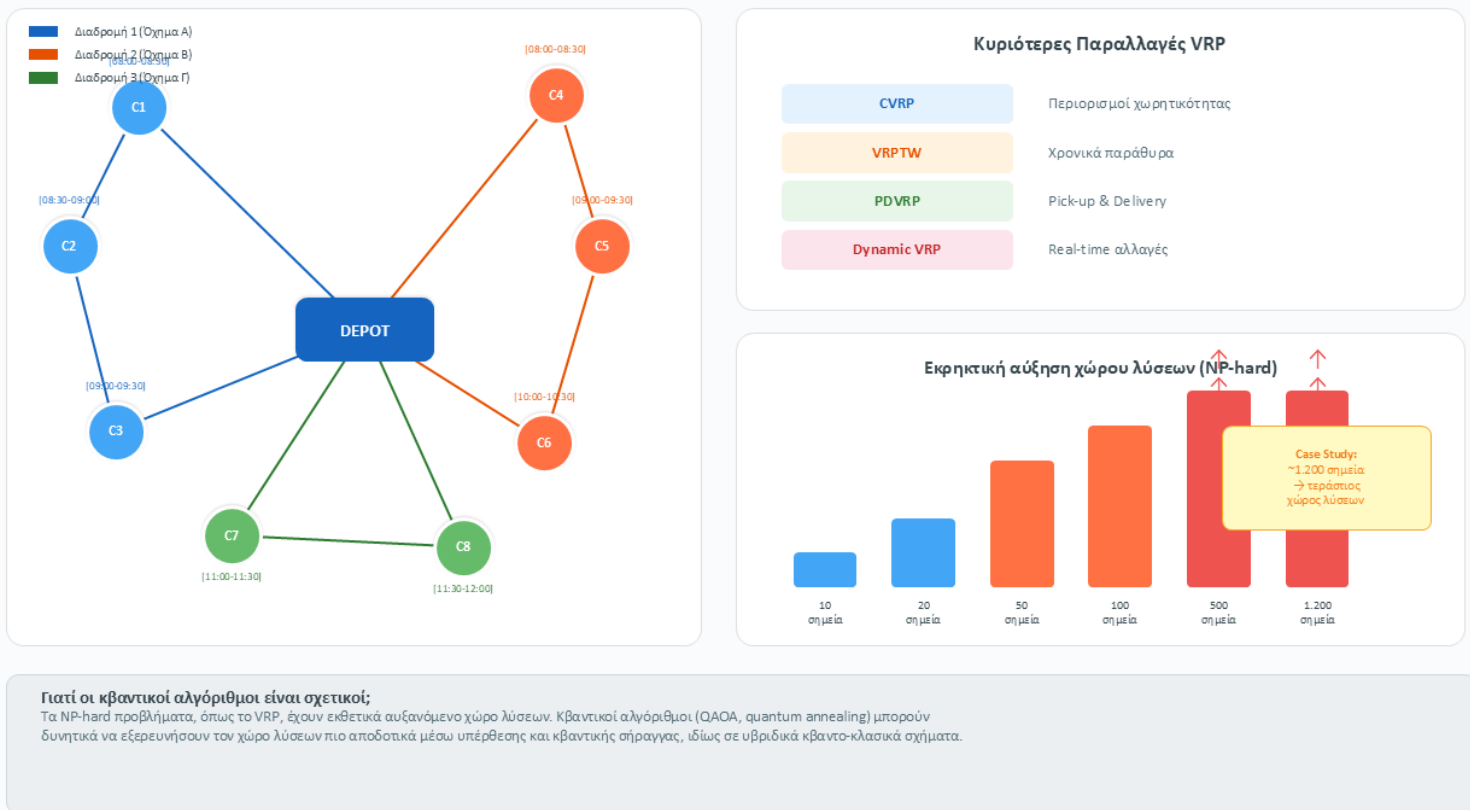
Το Vehicle Routing Problem (VRP) αποτελεί το κλασικότερο πρόβλημα δρομολόγησης στόλου και βρίσκεται στον πυρήνα πολλών εφαρμογών logistics. Στη βασική του μορφή, μια επιχείρηση διαθέτει έναν στόλο οχημάτων που ξεκινούν από ένα ή περισσότερα depots και πρέπει να εξυπηρετήσουν ένα σύνολο πελατών με γνωστές απαιτήσεις ζήτησης, ελαχιστοποιώντας τη συνολική απόσταση ή το κόστος διαδρομής, ενώ τηρούνται περιορισμοί χωρητικότητας των οχημάτων. (Kumar & Panneerselvam, 2012) Ακόμη και αυτή η «απλή» εκδοχή αποδεικνύεται NP-hard, καθώς γενικεύει το γνωστό Traveling Salesman Problem, για το οποίο δεν είναι γνωστός πολυωνυμικός αλγόριθμος βέλτιστης επίλυσης. (Kumar & Panneerselvam, 2012)

Στην πράξη, οι επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν πλουσιότερες παραλλαγές του VRP, όπως το Capacitated VRP (CVRP), όπου κάθε όχημα έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα, και το VRP with Time Windows (VRPTW), στο οποίο οι πελάτες πρέπει να εξυπηρετηθούν εντός προκαθορισμένων χρονικών παραθύρων. (He et al., 2023) Άλλες εκδοχές περιλαμβάνουν pick-up and delivery προβλήματα, όπου τα οχήματα συλλέγουν και παραδίδουν φορτία σε διαφορετικά σημεία, ή στοχαστικά VRP, όπου η ζήτηση ή οι χρόνοι ταξιδιού είναι αβέβαιοι. (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023) Σε περιβάλλοντα last-mile, τα προβλήματα αυτά γίνονται ακόμη πιο περίπλοκα λόγω του μεγάλου πλήθους στάσεων, της κυκλοφοριακής συμφόρησης και της ανάγκης για dynamic re-routing, ιδίως υπό συνθήκες διαταραχών. (IBM Institute for Business Value, 2022)

Πέρα από τις κλασικές παραλλαγές CVRP και VRPTW, η διεθνής βιβλιογραφία έχει αναπτύξει ένα ευρύ φάσμα «πλούσιων» VRP προβλημάτων (rich VRPs), τα οποία ενσωματώνουν ρεαλιστικές επιχειρησιακές ιδιαιτερότητες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το Pickup and Delivery VRP (PDVRP), όπου τα οχήματα καλούνται όχι μόνο να παραδώσουν προϊόντα, αλλά και να συλλέξουν φορτία από ορισμένους πελάτες, συχνά με περιορισμούς ακολουθίας (π.χ. πρώτα παραλαβή, μετά παράδοση) και εξισορρόπησης φόρτου. (Kumar & Panneerselvam, 2012) Άλλη σημαντική κατηγορία είναι τα Stochastic VRPs, στα οποία μέρος των παραμέτρων (όπως η ζήτηση, οι χρόνοι ταξιδιού ή η διαθεσιμότητα πελατών) μοντελοποιούνται ως τυχαίες μεταβλητές, απαιτώντας λύσεις που είναι «καλές κατά μέσο όρο» και όχι μόνο σε ένα ντετερμινιστικό σενάριο. (He et al., 2023)

Σημαντικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης τα λεγόμενα Green VRPs, όπου στο objective ενσωματώνονται περιβαλλοντικοί δείκτες, όπως οι εκπομπές CO₂ ή η κατανάλωση καυσίμου, σε συνδυασμό με κλασικές μετρικές κόστους. Σε αυτά τα μοντέλα, η επιλογή διαδρομών και τύπων

οχημάτων δεν καθορίζει μόνο το οικονομικό κόστος, αλλά και την περιβαλλοντική επίδοση της αλυσίδας, κάτι ιδιαίτερα κρίσιμο για επιχειρήσεις που έχουν δεσμεύσεις ESG. (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023) Συνολικά, η πληθώρα παραλλαγών δείχνει ότι το VRP δεν είναι ένα μόνο πρόβλημα, αλλά μια ολόκληρη οικογένεια μοντέλων που προσπαθούν να αποτυπώσουν με ακρίβεια τις ανάγκες των σύγχρονων logistics. (He et al., 2023)



Σχήμα 14 Vehicle Routing Problem: depot, πελάτες, χρονικά παράθυρα και εκθετική πολυπλοκότητα (Ιδια επεξεργασία)

5.2.2 Last-mile delivery και φορτοεκφόρτωση

Στην last-mile διανομή, το ζητούμενο είναι η δρομολόγηση και ο προγραμματισμός στόλου οχημάτων ή μικρο-στόλων (π.χ. vans, cargo-bikes) που εξυπηρετούν μεγάλο αριθμό παραληπτών σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, με στόχο τη μείωση χρόνων παράδοσης και κόστους, αλλά και τη βελτιστοποίηση δεικτών εξυπηρέτησης. (Route4Me, 2024) Το πρόβλημα συχνά διατυπώνεται ως VRPTW με επιπλέον επιχειρησιακούς κανόνες (π.χ. μέγιστη διάρκεια βάρδιας οδηγού, περιορισμοί πρόσβασης σε ζώνες χαμηλών εκπομπών), με αποτέλεσμα ο χώρος λύσεων να είναι τεράστιος και πολυδιάστατος. (He et al., 2023; IBM Institute for Business Value, 2022)

Στο περιβάλλον των λιμένων και των logistics φορτοεκφόρτωσης, τα προβλήματα βελτιστοποίησης αφορούν, μεταξύ άλλων, τον προγραμματισμό γερανογεφυρών (crane scheduling), τη διαχείριση θέσεων αποθήκευσης containers (yard management) και τον συντονισμό με οδικές και σιδηροδρομικές αφίξεις, προβλήματα που συχνά διατυπώνονται ως συνδυασμός job-shop

scheduling, assignment και routing. (Streif et al., 2023) Η πολυπλοκότητα αυξάνεται όταν ληφθούν υπόψη αβεβαιότητες όπως καθυστερήσεις πλοίων, καιρικές συνθήκες και περιορισμοί ασφαλείας, οδηγώντας σε μεγάλης κλίμακας μεικτά ακέραια προβλήματα βελτιστοποίησης. (Streif et al., 2023; IBM Institute for Business Value, 2022)

Στο πλαίσιο της last-mile διανομής, ένα πρακτικό παράδειγμα πολυπλοκότητας είναι η παράδοση προϊόντων σε πυκνά αστικά κέντρα με περιορισμούς πρόσβασης (π.χ. pedestrian zones, low-emission zones) και μεταβαλλόμενες κυκλοφοριακές συνθήκες. Εκεί, οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι που θεωρούν στατικές ταχύτητες ταξιδιού αποδίδουν λύσεις που μπορεί να είναι θεωρητικά καλές, αλλά πρακτικά μη επιλέξιμες λόγω αιχμών κυκλοφορίας ή έργων οδοποιίας. (Route4Me, 2024) Γι' αυτό, σύγχρονα last-mile συστήματα ενσωματώνουν δυναμικά δεδομένα, όπως real-time traffic και πληροφορίες για καθυστερήσεις, μετατρέποντας το πρόβλημα σε ενεργό VRP (dynamic VRP), όπου οι διαδρομές μπορεί να πρέπει να αναθεωρούνται κατά τη διάρκεια της ημέρας. (He et al., 2023; IBM Institute for Business Value, 2022)

Σε λιμενικά περιβάλλοντα, τα προβλήματα φορτοεκφόρτωσης συνδέονται στενά με την έννοια των «στενώσεων» (bottlenecks). Για παράδειγμα, ο προγραμματισμός γερανογεφυρών σε τερματικό containers πρέπει να λάβει υπόψη όχι μόνο τον αριθμό των διαθέσιμων γερανών, αλλά και περιορισμούς ασφαλείας, μέγιστο αριθμό ταυτόχρονων κινήσεων σε κάθε πλοίο και διαθεσιμότητα χώρου στην ξηρά. (Streif et al., 2023) Ανάλογα με τη δομή του τερματικού, τα προβλήματα αυτά μπορούν να διατυπωθούν ως job-shop ή flow-shop scheduling προβλήματα, με επιπλέον constraints από την πλευρά των χερσαίων μεταφορών (φορτηγά, τρένα) και των χρονοθυρίδων (time slots) που έχουν κλείσει οι μεταφορείς. (Streif et al., 2023; IBM Institute for Business Value, 2022) Η προσπάθεια συντονισμού όλων αυτών των παραγόντων οδηγεί σε μοντέλα που είναι routing, scheduling και assignment, με αντίστοιχη αύξηση της υπολογιστικής δυσκολίας.

5.2.3 Σχεδιασμός δικτύου και capacity planning

Πέρα από την καθημερινή δρομολόγηση, κεντρικό πεδίο βελτιστοποίησης αποτελεί ο στρατηγικός σχεδιασμός δικτύου και ο προγραμματισμός χωρητικότητας. Ο σχεδιασμός δικτύου (network design) περιλαμβάνει αποφάσεις όπως ο αριθμός, η τοποθεσία και ο ρόλος αποθηκών και κέντρων διανομής, η επιλογή μεταφορικών τρόπων και οι ροές προϊόντων μεταξύ κόμβων, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ή τη μεγιστοποίηση του επιπέδου εξυπηρέτησης. (Kumar & Panneerselvam, 2012; McKinsey & Company, 2024) Τα underlying μαθηματικά μοντέλα είναι συνήθως μεγάλης κλίμακας προβλήματα μικτού ακέραιου προγραμματισμού, στα οποία οι αποφάσεις σχεδιασμού αλληλεπιδρούν με τα καθημερινά προβλήματα δρομολόγησης και αποθεμάτων. (He et al., 2023)

Αντίστοιχα, ο προγραμματισμός χωρητικότητας (capacity planning) αφορά την κατανομή πόρων (οχημάτων, οδηγών, αποθηκευτικών χώρων, slots σε τερματικά) σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα, ώστε να ικανοποιηθεί η ζήτηση υπό περιορισμούς κόστους και υπηρεσιακών επιπέδων. (IBM, 2021; IBM Institute for Business Value, 2022) Όταν η ζήτηση είναι στοχαστική ή εξαρτάται από αβεβαιότητες (π.χ. εποχικότητα, disruptions), τα προβλήματα capacity planning απαιτούν στάθμιση πολλών σεναρίων και συχνά οδηγούν σε στοχαστικά ή robust optimization μοντέλα, με ακόμη μεγαλύτερες υπολογιστικές απαιτήσεις. (Preskill, 2018; IBM, 2021)

Στο τέλος αυτής της ενότητας, πρέπει να σημειωθεί ότι η πρακτική βιομηχανία σπάνια λύνει αυτά τα προβλήματα «μία φορά και για πάντα». Στις περισσότερες περιπτώσεις, η βελτιστοποίηση εκτελείται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους (daily, intra-day) με νέα δεδομένα και αλλαγμένες συνθήκες, πράγμα που κάνει ιδιαίτερο όχι μόνο το πόσο καλή είναι η λύση, αλλά και πόσο γρήγορα μπορεί να

βρεθεί. (IBM Institute for Business Value, 2022) Από αυτή τη σκοπιά, ακόμη και μερική βελτίωση στους χρόνους υπολογισμού ή στην ποιότητα λύσεων, όπως αυτή που υπόσχονται κβαντικές ή quantum-inspired μέθοδοι, μπορεί να μεταφραστεί σε ουσιαστικά επιχειρησιακά οφέλη, ειδικά όταν εφαρμόζεται σε μεγάλη κλίμακα. (IBM, 2021; McKinsey & Company, 2024)

5.2.4 Γιατί τα προβλήματα είναι δύσκολα και πώς λύνονται σήμερα

Ο κοινός παρονομαστής στα παραπάνω προβλήματα είναι η εκρηκτική αύξηση του χώρου λύσεων με το μέγεθος του δικτύου: ο αριθμός πιθανών δρομολογίων, προγραμμάτων φόρτωσης ή διαμορφώσεων δικτύου αυξάνεται εκθετικά, καθιστώντας τις ακριβείς μεθόδους (exact optimization) εφαρμόσιμες μόνο σε μικρά instances ή σε πολύ εξειδικευμένες περιπτώσεις. (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023) Ως εκ τούτου, η πρακτική βιομηχανία βασίζεται κυρίως σε heuristics και metaheuristics, οι οποίες δεν εγγυώνται παγκόσμια βέλτιστη λύση, αλλά προσφέρουν σε αποδεκτό χρόνο λύσεις υψηλής ποιότητας.

Κλασικές ευρετικές μέθοδοι περιλαμβάνουν αλγορίθμους savings, insertion και local search, ενώ οι metaheuristics καλύπτουν τεχνικές όπως tabu search, simulated annealing, genetic algorithms, ant colony optimization, variable neighborhood search και adaptive large neighborhood search (ALNS). (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023) Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα έχει στραφεί επίσης σε hyper-heuristics και machine-learning-based προσεγγίσεις που μαθαίνουν να επιλέγουν ή να παραμετροποιούν heuristics ανάλογα με τη δομή του προβλήματος. (He et al., 2023) Παρά τις σημαντικές επιτυχίες αυτών των μεθόδων, η αυξανόμενη κλίμακα και ενεργή φύση των σύγχρονων logistics (π.χ. επαναβελτιστοποίηση σε πραγματικό χρόνο υπό διαταραχές) εκθέτει τα όρια των καθαρά κλασικών προσεγγίσεων. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2021)

Αυτό ακριβώς το κενό, μεταξύ της εκθετικής πολυπλοκότητας των προβλημάτων και της ανάγκης για σχεδόν πραγματικού χρόνου αποφάσεις σε μεγάλα δίκτυα, δημιουργεί το κίνητρο για διερεύνηση κβαντικών και quantum-inspired αλγοριθμικών τεχνικών, οι οποίες υπόσχονται πιο αποτελεσματική εξερεύνηση του χώρου λύσεων και πιθανές βελτιώσεις σε ποιότητα λύσεων ή/και χρόνους υπολογισμού. (Preskill, 2018; IBM, 2021) Στις επόμενες υποενότητες εξετάζονται ενδεικτικές τέτοιες τεχνολογικές λύσεις και τα πρώτα βήματα πρακτικής εφαρμογής τους στα logistics.

Ένα επιπλέον επίπεδο δυσκολίας στα προβλήματα βελτιστοποίησης logistics προκύπτει από τη διαχείριση διαταραχών και την ανάγκη για robustness. Όπως ανέδειξε η πανδημία COVID-19, αλλά και πρόσφατες γεωπολιτικές κρίσεις, οι αλυσίδες εφοδιασμού μπορούν να υποστούν ξαφνικές και σοβαρές διαταραχές (από κλείσιμο λιμένων μέχρι προσωρινή απώλεια κρίσιμων hubs), οι οποίες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν επαρκώς με στατικά μοντέλα βελτιστοποίησης. (IBM Institute for Business Value, 2022; APCO Worldwide, 2025) Σε αυτό το πλαίσιο, τα κλασικά προβλήματα δρομολόγησης και σχεδιασμού δικτύου επεκτείνονται με στοχαστικά ή robust στοιχεία, όπου στόχος δεν είναι μόνο η βελτιστοποίηση για ένα «μέσο» σενάριο, αλλά η εξασφάλιση ότι η λύση παραμένει καλή και εφικτή σε μια γκάμα πιθανών μελλοντικών καταστάσεων. (He et al., 2023; McKinsey & Company, 2024)

Τα robust optimization μοντέλα συχνά εισάγουν «περιοχές αβεβαιότητας» για παραμέτρους όπως ζήτηση, χρόνοι ταξιδιού ή χωρητικότητα, και επιβάλλουν ότι οι λύσεις πρέπει να είναι εφικτές για κάθε τιμή εντός αυτών των περιοχών, οδηγώντας σε συντηρητικότερες αλλά πιο ανθεκτικές αποφάσεις. (He et al., 2023) Αντίθετα, τα στοχαστικά μοντέλα, όπως τα two-stage stochastic programming προβλήματα, επιτρέπουν τη λήψη αποφάσεων σε δύο φάσεις: αρχικά «σχεδιάζονται» οι επιλογές (π.χ. επιλογή διαδρομών ή χωρητικοτήτων) και στη συνέχεια, αφού υλοποιηθεί ένα

σενάριο, γίνονται διορθωτικές κινήσεις (recourse actions) ώστε να αντιμετωπιστούν οι αποκλίσεις. (He et al., 2023; IBM, 2021) Ωστόσο, η εισαγωγή σεναρίων και robustness αυξάνει περαιτέρω την διάσταση και την πολυπλοκότητα των μοντέλων, πολλαπλασιάζοντας τον χώρο λύσεων και καθιστώντας την πλήρη κλασική βελτιστοποίηση ακόμη πιο δύσκολη, γεγονός που ενισχύει το κίνητρο για έρευνα σε κβαντικούς και quantum-inspired αλγορίθμους. (Preskill, 2018; IBM, 2021)

5.3 Τεχνολογικές λύσεις με κβαντικούς και quantum-inspired αλγόριθμους

Η εμφάνιση κβαντικών και quantum-inspired αλγορίθμων βελτιστοποίησης έχει ανοίξει νέες προοπτικές για την αντιμετώπιση σύνθετων προβλημάτων logistics, τα οποία μέχρι σήμερα προσεγγίζονται κυρίως μέσω ευρετικών και metaheuristics. Στο πλαίσιο της NISQ εποχής, όπου οι διαθέσιμες κβαντικές συσκευές είναι θορυβώδεις και περιορισμένης κλίμακας, η πρακτική κατεύθυνση εστιάζει σε δύο κυρίως άξονες: αφενός στη χρήση quantum annealing για προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, και αφετέρου σε υβριδικές κβαντο-κλασικές προσεγγίσεις τύπου QAOA και variational αλγορίθμων. (Preskill, 2018; IBM, 2021) Από την πλευρά τους, έχουν αναπτυχθεί quantum-inspired μέθοδοι, όπως η vector annealing της NEC, οι οποίες μιμούνται θεμελιακές αρχές των κβαντικών annealers χρησιμοποιώντας κλασικό high-performance hardware. (NEC Corporation, 2019)

5.3.1 Quantum annealing και logistics

Το quantum annealing είναι μια υπολογιστική προσέγγιση που σχεδιάστηκε ειδικά για την επίλυση προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, τα οποία μπορούν να διατυπωθούν ως προβλήματα Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO). Σε αυτή την κατηγορία ανήκει μεγάλος αριθμός logistics προβλημάτων, από VRP και scheduling μέχρι layout και assignment, κάτι που καθιστά την τεχνολογία ιδιαίτερα ελκυστική για τον κλάδο. (Preskill, 2018; Streif et al., 2023) Εταιρείες όπως η D-Wave έχουν αναπτύξει συστήματα quantum annealing τα οποία είναι ήδη προσβάσιμα μέσω cloud και συνοδεύονται από hybrid solvers που συνδυάζουν κβαντικούς και κλασικούς υπολογιστικούς πόρους. (Streif et al., 2023)

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα πρακτικής εφαρμογής αποτελεί η βελτιστοποίηση των επιχειρήσεων στο Port of Los Angeles, όπου σε συνεργασία με την SavantX εφαρμόστηκε quantum annealing για τη βελτίωση της ροής containers και τη χρήση εξοπλισμού στο τερματικό Pier 300. (D-Wave Systems, 2020; QAI, 2025) Το πρόβλημα περιλάμβανε μεταξύ άλλων τον προγραμματισμό γερανογεφυρών, την τοποθέτηση containers και τη μείωση των χρόνων αναμονής φορτηγών, διατυπωμένο ως QUBO και επιλυόμενο επαναληπτικά σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. (D-Wave Systems, 2020) Οι αναφορές δείχνουν βελτιώσεις σε μετρικές όπως η μείωση καθυστερήσεων, η βελτιωμένη αξιοποίηση εξοπλισμού και ανθρώπινου δυναμικού, καθώς και η μείωση κατανάλωσης καυσίμου, στοιχεία που συνδέονται άμεσα με επιχειρησιακά και περιβαλλοντικά οφέλη. (QAI, 2025; Quantum Computing Report, 2024)

Πέρα από λιμενικά περιβάλλοντα, πρόσφατες μελέτες έχουν συνδυάσει quantum annealing με κλασικές τεχνικές, δημιουργώντας υβριδικά σχήματα όπου ο κβαντικός annealer χρησιμοποιείται για την αναζήτηση υψηλής ποιότητας λύσεων σε υποπροβλήματα routing ή network design, ενώ η τελική λύση «ραφίνεται» από κλασικούς solvers. (Streif et al., 2023) Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα σημαντική για logistics εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπου το μέγεθος του δικτύου υπερβαίνει

άμεσα τις δυνατότητες των σημερινών κβαντικών συστημάτων και απαιτεί αποσύνθεση του προβλήματος σε μικρότερα, διαχειρίσιμα instances. (Preskill, 2018; IBM, 2021)

5.3.2 Quantum-inspired και vector annealing σε logistics

Σε αντίστοιχη κατεύθυνση, με τα καθαρά κβαντικά συστήματα, έχει αναπτυχθεί μια γενιά quantum-inspired αλγορίθμων, οι οποίοι αντλούν έμπνευση από τις αρχές του quantum annealing, αλλά υλοποιούνται πάνω σε κλασικό high-performance hardware. Η NEC, για παράδειγμα, έχει αναπτύξει τη vector annealing (VA) τεχνολογία, η οποία στοχεύει στην ταχεία επίλυση μεγάλων combinatorial optimization προβλημάτων, διατηρώντας υψηλή ακρίβεια και εστιάζοντας σε λύσεις που ικανοποιούν αυστηρά όλους τους περιορισμούς. (NEC Corporation, 2019)

Στην περίπτωση της NEC Fielding, η VA εφαρμόστηκε για τη βελτιστοποίηση του ημερήσιου delivery planning συντήρησης εξοπλισμού στο Tokyo Parts Center, όπου προηγουμένως η διαδικασία βασιζόταν σε χειροκίνητο σχεδιασμό. (NEC Corporation, 2019) Το πρόβλημα διατυπώθηκε με αντικειμενικό στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού μήκους διαδρομών των φορτηγών, υπό περιορισμούς όπως η έγκαιρη παράδοση ανταλλακτικών, η συμβατότητα με τα ωράρια των τεχνικών και η επιστροφή των οχημάτων στο κέντρο εντός συγκεκριμένου χρονικού ορίζοντα. (NEC Corporation, 2019) Η ενσωμάτωση της VA οδήγησε σε αυτοματοποίηση του σχεδιασμού, μείωση λειτουργικού κόστους, βελτίωση της αποδοτικότητας και παράλληλη μείωση των εκπομπών, ενώ η δυνατότητα auto-tuning των παραμέτρων βάρων στους περιορισμούς μείωσε αρκετά την ανάγκη για εξειδικευμένη χειροκίνητη παραμετροποίηση. (NEC Corporation, 2019)

Quantum-inspired προσεγγίσεις όπως η VA συνιστούν μια ενδιαφέρουσα ενδιάμεση λύση για οργανισμούς που επιθυμούν να αξιοποιήσουν ιδέες από τον χώρο των κβαντικών βελτιστοποιητών χωρίς να επενδύσουν άμεσα σε κβαντικό hardware, είτε λόγω κόστους είτε λόγω ωριμότητας της τεχνολογίας. (Lehmacher, 2025; NEC Corporation, 2019) Για τον κλάδο των logistics, αυτές οι λύσεις προσφέρουν ήδη σήμερα απτά οφέλη σε προβλήματα δρομολόγησης, διαχείρισης αποθήκης και σχεδιασμού δικτύου, ενώ παράλληλα λειτουργούν ως «σχολείο» για τη μελλοντική μετάβαση σε πραγματικά κβαντικά περιβάλλοντα. (Lehmacher, 2025)

5.3.3 Υβριδική κβαντο-κλασική βελτιστοποίηση (QAOA, variational approaches)

Σε αντίθεση με το quantum annealing, οι gate-based κβαντικοί υπολογιστές εκμεταλλεύονται κυκλώματα qubits τα οποία υλοποιούν γενικούς κβαντικούς αλγορίθμους. Στο πλαίσιο της NISQ εποχής, έχουν προταθεί variational αλγόριθμοι όπως το Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) και ο Variational Quantum Eigensolver (VQE), οι οποίοι συνδυάζουν έναν παραμετρικό κβαντικό κύκλο με έναν κλασικό βελτιστοποιητή σε μια υβριδική «κλειστή λούπα». (Preskill, 2018; Montanaro, 2016) Στα προβλήματα βελτιστοποίησης, η ιδέα του QAOA είναι να κωδικοποιεί τον στόχο και τους περιορισμούς σε έναν Hamiltonian και να προσεγγίζει καταστάσεις χαμηλής ενέργειας μέσω επαναληπτικής προσαρμογής των παραμέτρων του κυκλώματος. (Preskill, 2018)

Αν και οι περισσότερες έως σήμερα εφαρμογές QAOA σε logistics είναι πιλοτικές ή σε ερευνητικό στάδιο, η βιβλιογραφία δείχνει ότι υβριδικές κβαντο-κλασικές αρχιτεκτονικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποσύνθεση μεγάλων προβλημάτων δρομολόγησης σε μικρότερα υποπροβλήματα, τα οποία λύνονται κβαντικά, ενώ η συνολική δομή του δικτύου παραμένει υπό κλασικό έλεγχο. (IBM, 2021; He et al., 2023; S-Lib, 2025) Ακόμη, πρόσφατες εργασίες προτείνουν συνδυασμούς QAOA με τεχνικές μηχανικής μάθησης (όπως το clustering) ώστε να βελτιωθεί η

κλιμάκωση σε αστικά logistics σενάρια, όπου οι περιορισμοί αφθονούν και οι διαθέσιμες qubits είναι περιορισμένες. (Arxiv, 2025)

Για τους παρόχους logistics, οι υβριδικοί αυτοί αλγόριθμοι αντιμετωπίζονται σήμερα περισσότερο ως πεδίο πειραματισμού και προετοιμασίας, παρά ως πλήρως παραγωγικές λύσεις. Ωστόσο, οργανισμοί και συμβουλευτικοί οίκοι, όπως η IBM, υποστηρίζουν ότι η σταδιακή ενσωμάτωση κβαντικών kernels μέσα σε υφιστάμενες intelligent workflows (π.χ. σε last-mile planning, disruption management ή maritime routing) μπορεί να προσφέρει ακόμη και μικρές, αλλά οικονομικά αισθητές, βελτιώσεις επί των κλασικών λύσεων, ενώ παράλληλα χτίζει «quantum readiness» για την εποχή του πλήρους Quantum Advantage. (IBM, 2021; IBM Institute for Business Value, 2022)

Το φάσμα λύσεων από το quantum annealing και τις quantum-inspired μεθόδους μέχρι τους υβριδικούς variational αλγόριθμους δείχνει ότι ο κλάδος των logistics βρίσκεται σε μια μεταβατική φάση, όπου συνυπάρχουν ώριμα, άμεσα αξιοποιήσιμα εργαλεία και πειραματικές τεχνολογίες με μεσοπρόθεσμο ορίζοντα απόδοσης. Αυτή η εικόνα γίνεται πιο συγκεκριμένη στο επόμενο τμήμα, όπου εξετάζονται αναλυτικά δύο μελέτες περίπτωσης υβριδικής κβαντο-κλασικής βελτιστοποίησης σε logistics.

5.4 Επιλεγμένο case study: Υβριδική κβαντική βελτιστοποίηση σε last-mile logistics

5.4.1 Περιγραφή οργανισμού και του προβλήματος logistics

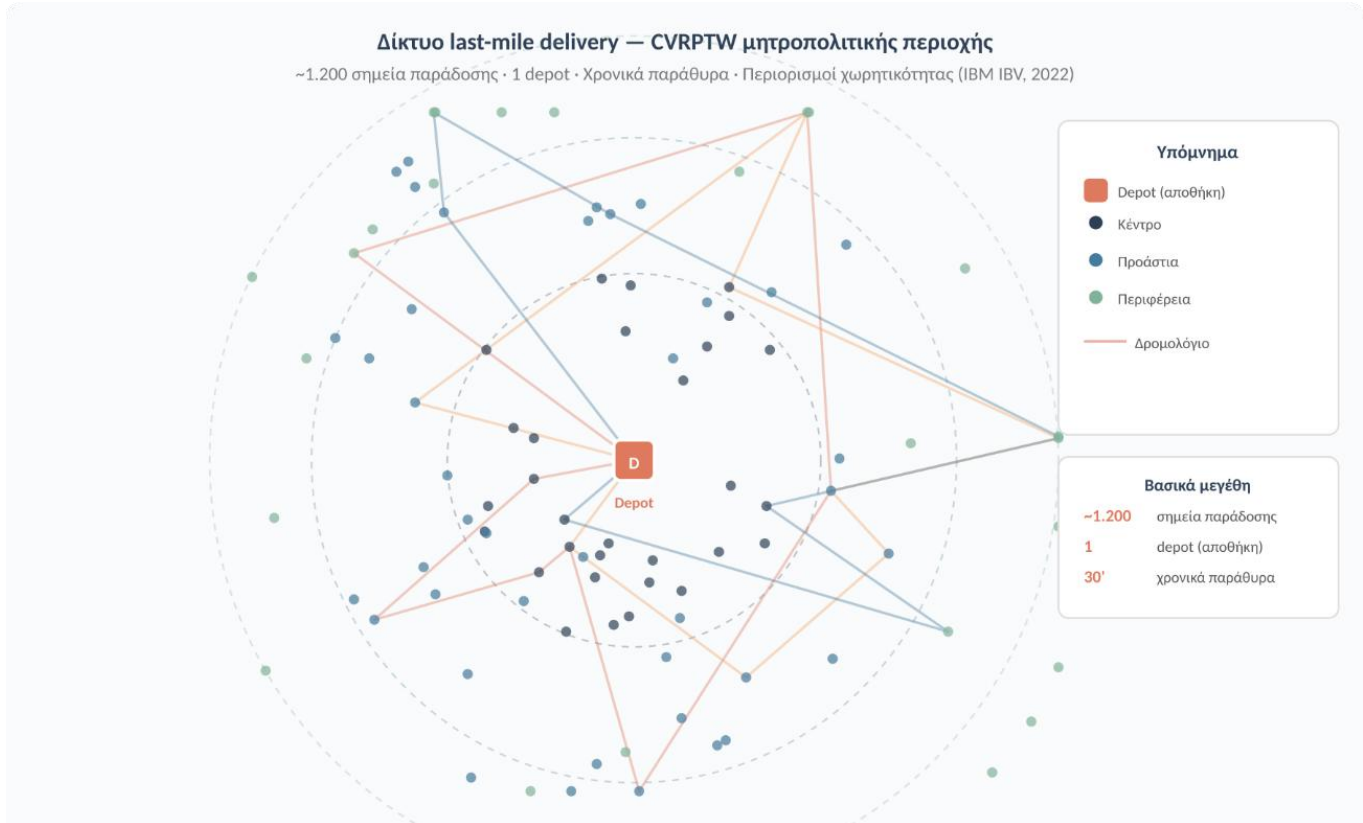
Το case study αφορά μια διεθνή βιομηχανική επιχείρηση στον χώρο των εμπορικών οχημάτων, η οποία δραστηριοποιείται σε αγορές αστικών διανομών με έντονη παρουσία σε μεγάλες πόλεις της Βόρειας Αμερικής. Η εταιρεία λειτουργεί τόσο ως κατασκευαστής οχημάτων όσο και ως πάροχος ολοκληρωμένων λύσεων logistics προς πελάτες της, προσφέροντας υπηρεσίες δρομολόγησης, διαχείρισης στόλου και υποστήριξης after-sales μέσω δικτύου συνεργαζόμενων διανομέων. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024)

Στο πλαίσιο αυτό, κρίσιμο επιχειρησιακό ζήτημα αποτέλεσε η βελτιστοποίηση ενός πολύπλοκου last-mile δικτύου διανομών σε μια μεγάλη μητροπολιτική περιοχή των ΗΠΑ, με περισσότερο από 1.000 σημεία παράδοσης και έντονους χρονικούς περιορισμούς. Η εταιρεία επιθυμούσε να βελτιώσει τον σχεδιασμό διανομών σε περίπου 1.200 σημεία εντός της πόλης, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως 30-λεπτα χρονικά παράθυρα παράδοσης, τη χωρητικότητα των φορτηγών, τη μέγιστη διάρκεια διαδρομής ανά όχημα και τη χρήση ενός κεντρικού depot. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024)

Το υφιστάμενο σύστημα δρομολόγησης βασιζόταν σε προηγμένες κλασικές ευρετικές και metaheuristics, αν και αντιμετώπιζε περιορισμούς στην κλιμάκωση και στην ικανότητα γρήγορης επαναβελτιστοποίησης σε περίπτωση αλλαγών (για παράδειγμα, όταν προστίθενται νέες παραγγελίες, αλλάζουν οι κυκλοφοριακές συνθήκες ή προκύπτουν καθυστερήσεις φόρτωσης). (IBM Institute for Business Value, 2022) Αυτό είχε ως αποτέλεσμα αυξημένο λειτουργικό κόστος, δυσκολία διατήρησης σταθερών χρόνων παράδοσης και περιορισμένη ευελιξία στη διαχείριση διαταραχών, σε ένα περιβάλλον όπου οι πελάτες απαιτούν ολοένα και πιο στενά χρονικά παράθυρα και υψηλή αξιοπιστία. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2021)

Η συνεργασία με έναν πάροχο κβαντικών τεχνολογιών είχε ως στόχο να διερευνηθεί κατά πόσο μια υβριδική κβαντο-κλασική προσέγγιση θα μπορούσε να υποστηρίξει πιο αποδοτικές διαδρομές, να μειώσει το συνολικό κόστος διανομών και να επιτρέψει συχνότερη επαναβελτιστοποίηση του

σχεδιασμού σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2021) Παράλληλα, η επιχείρηση επιδίωκε να αναπτύξει εσωτερική τεχνογνωσία γύρω από κβαντικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης, προκειμένου να διαφοροποιήσει τις υπηρεσίες της και να τοποθετηθεί έγκαιρα στην αναδυόμενη αγορά «κβαντικά-ενισχυμένων» λύσεων logistics. (IBM, 2021; IBM, 2024)



Σχήμα 15 Δίκτυο last-mile delivery: depot, ζώνες παράδοσης και ενδεικτικά δρομολόγια (Ίδια επεξεργασία βάσει IBM IBV, 2022)

5.4.2 Πώς μοντελοποιήθηκε το πρόβλημα (στόχος, περιορισμοί, δεδομένα)

Για τις ανάγκες της μελέτης, το πρόβλημα δρομολόγησης της εταιρείας μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με χωρητικότητα και χρονικά παράθυρα (Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows, CVRPTW), μια από τις πιο μελετημένες αλλά και πιο απαιτητικές παραλλαγές του κλασικού VRP. (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023) Στο συγκεκριμένο σενάριο, ένα σύνολο ομοιογενών ή ημι-ομοιογενών οχημάτων εκκινεί από ένα κεντρικό depot, εξυπηρετεί περίπου 1.200 πελάτες εντός της πόλης και επιστρέφει στο depot, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους δρομολόγησης υπό περιορισμούς χωρητικότητας και χρονικών παραθύρων. (IBM Institute for Business Value, 2022)

Ο στόχος (objective function) του μοντέλου ήταν η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους διαδρομών, το οποίο προσεγγίστηκε ως συνάρτηση του συνολικού μήκους ή χρόνου ταξιδιού όλων των οχημάτων, με δυνατότητα ενσωμάτωσης επιπλέον όρων όπως κόστος οδηγών, διόδια, ή ποινές για καθυστερημένες παραδόσεις. (Kumar & Panneerselvam, 2012; IBM Institute for Business Value, 2022) Σε κάποιες παραλλαγές του πειράματος εξετάστηκαν επίσης πολυκριτήρια σενάρια, όπου ο στόχος συνδύαζε ελαχιστοποίηση κόστους και ελαχιστοποίηση αριθμού οχημάτων, ή ενσωμάτωση δείκτες ποιότητας εξυπηρέτησης (π.χ. μέση απόκλιση από το επιθυμητό χρονικό παράθυρο παράδοσης). (IBM, 2021; IBM, 2024)

Οι κύριοι περιορισμοί του μοντέλου περιλάμβαναν:

- **Περιορισμούς εξυπηρέτησης:** κάθε πελάτης έπρεπε να εξυπηρετηθεί ακριβώς μία φορά από ένα όχημα, χωρίς fractional deliveries. (Kumar & Panneerselvam, 2012)
- **Περιορισμούς χωρητικότητας:** η συνολική ζήτηση (π.χ. όγκος ή βάρος) των πελατών σε κάθε διαδρομή δεν μπορούσε να υπερβεί τη χωρητικότητα του οχήματος, με διαφορετικές χωρητικότητες να εξετάζονται για εναλλακτικούς τύπους οχημάτων. (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023)
- **Χρονικά παράθυρα:** για κάθε πελάτη οριζόταν ένα χρονικό παράθυρο (π.χ. 30-λεπτο) εντός του οποίου έπρεπε να πραγματοποιηθεί η παράδοση· σε περίπτωση πρώιμης άφιξης, το όχημα μπορούσε να περιμένει, ενώ καθυστερημένες αφίξεις είτε δεν επιτρέπονταν είτε τιμωρούνταν με ποινές στο objective. (He et al., 2023; IBM Institute for Business Value, 2022)
- **Περιορισμούς διαδρομής:** κάθε όχημα έπρεπε να ξεκινά και να καταλήγει στο depot, με ανώτατο επιτρεπτό χρόνο ή μήκος διαδρομής, ώστε να τηρούνται κανονισμοί ωραρίου οδηγών και να εξασφαλίζεται βιώσιμο πρόγραμμα εργασίας. (Kumar & Panneerselvam, 2012; IBM, 2024)

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από πραγματικές επιχειρησιακές λειτουργίες της εταιρείας και περιλάμβαναν:

- **Γεωγραφικές πληροφορίες** για τα σημεία παράδοσης (γεωγραφικό πλάτος/μήκος, διευθύνσεις), καθώς και τη θέση του depot. (IBM Institute for Business Value, 2022)
- **Ζήτηση πελατών** (π.χ. αριθμός παλετών ή κυβικά μέτρα ανά παράδοση), συμπεριλαμβανομένων ιστορικών δεδομένων για την κατανομή της ζήτησης ανά ζώνη και ώρα. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024)
- **Προφίλ στόλου** (τύποι οχημάτων, χωρητικότητα, κατανάλωση καυσίμου, λειτουργικό κόστος ανά χιλιόμετρο ή ώρα). (IBM, 2024)
- **Χρονικά παράθυρα και προτιμήσεις πελατών** (ώρες λειτουργίας, προτιμώμενες ζώνες παράδοσης, ειδικοί περιορισμοί πρόσβασης). (IBM Institute for Business Value, 2022)
- **Πίνακα χρόνων/αποστάσεων** μεταξύ όλων των σημείων, ο οποίος προέκυψε από συνδυασμό χαρτογραφικών υπηρεσιών και ιστορικών δεδομένων κυκλοφορίας, ώστε να αντικατοπτρίζει ρεαλιστικές συνθήκες μετακίνησης στην πόλη. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024)

Η διατύπωση ως CVRPTW οδήγησε σε ένα πολύ μεγάλης κλίμακας πρόβλημα μικτού ακέрайου προγραμματισμού με χιλιάδες δυαδικές μεταβλητές δρομολόγησης και πληθώρα περιορισμών, το οποίο είναι θεωρητικά NP-hard και πρακτικά δύσκολο να λυθεί ακριβώς με κλασικούς solvers σε εύλογους χρόνους. (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023) Για τον λόγο αυτό ακολουθήθηκε μια υβριδική αρχιτεκτονική: στην πρώτη φάση χρησιμοποιήθηκαν κλασικοί αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και ευρετικές βελτιστοποιήσεις για τη δημιουργία ενός συνόλου υποψήφιων διαδρομών, ενώ στη δεύτερη φάση επιλέχθηκε και βελτιστοποιήθηκε ένα υποσύνολο αυτών με χρήση κβαντικών αλγορίθμων, όπως αναλύεται στην επόμενη υποενότητα. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2021)



Σχήμα 16 Βασικοί περιορισμοί μοντέλου CVRPTW (Ίδια επεξεργασία βάσει IBM IBV, 2022; Kumar και Panneerselvam, 2012)

5.4.3 Τεχνολογική λύση: κβαντικό/quantum-inspired εργαλείο και πλατφόρμα

Η τεχνολογική λύση που υιοθετήθηκε στη μελέτη περίπτωσης βασίστηκε σε μια υβριδική κβαντο-κλασική αρχιτεκτονική, στην οποία συνδυάζονται κλασικά εργαλεία βελτιστοποίησης και μηχανικής μάθησης με κβαντικούς ή quantum-inspired αλγορίθμους, προσβάσιμους μέσω cloud πλατφόρμας. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2021) Η γενική ιδέα ήταν να εφαρμοστεί η ωριμότητα των κλασικών μεθόδων για τη δημιουργία ενός καλού συνόλου υποψήφιων διαδρομών, και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν κβαντικοί αλγόριθμοι για την εξερεύνηση και βελτίωση ενός δύσκολου υποχώρου λύσεων, όπου οι κλασικές metaheuristics τείνουν να «κολλούν» σε τοπικά άριστα. (IBM Institute for Business Value, 2022; Lehmacher, 2025)

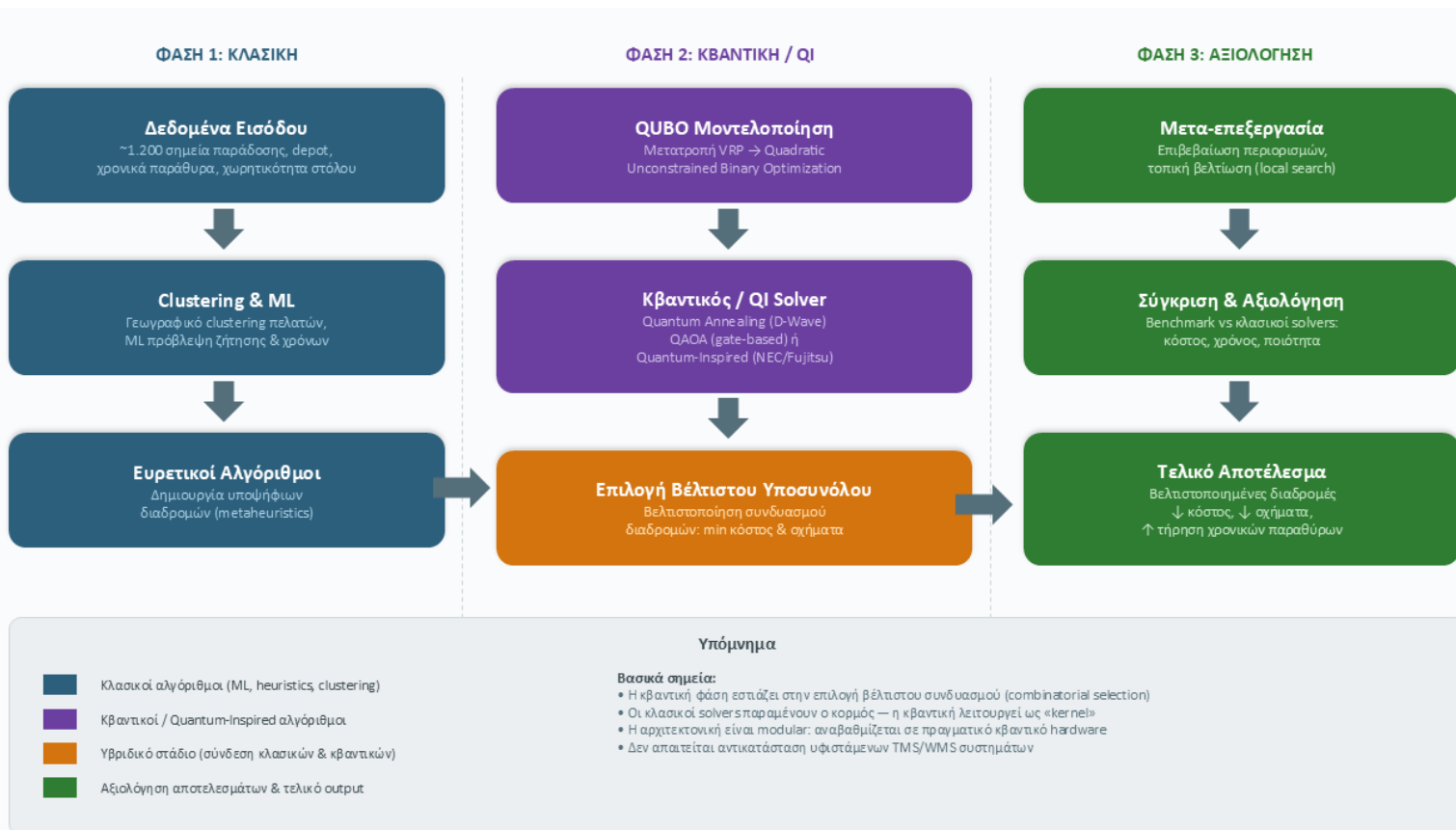
Στην πρώτη, καθαρά κλασική φάση, εφαρμόστηκαν τεχνικές clustering και heuristics δρομολόγησης για την παραγωγή αρχικών διαδρομών. Τα σημεία παράδοσης ομαδοποιήθηκαν γεωγραφικά ή βάσει προτύπων ζήτησης, και για κάθε cluster κατασκευάστηκαν υποψήφιες διαδρομές χρησιμοποιώντας καθιερωμένες metaheuristics, όπως local search, tabu search ή adaptive large neighborhood search (ALNS), προσαρμοσμένες στα συγκεκριμένα operational constraints της εταιρείας. (Kumar & Panneerselvam, 2012; He et al., 2023) Το αποτέλεσμα αυτής της φάσης ήταν ένα πεπερασμένο σύνολο υψηλής ποιότητας διαδρομών, αλλά όχι απαραίτητα παγκοσμίως βέλτιστων. (IBM Institute for Business Value, 2022)

Στη δεύτερη φάση, το πρόβλημα επιλέχθηκε να διατυπωθεί ως πρόβλημα επιλογής βέλτιστου συνδυασμού διαδρομών από το διαθέσιμο σύνολο, με στόχο τη μεγιστοποίηση της κάλυψης των πελατών και την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, υπό τους ίδιους περιορισμούς χωρητικότητας και χρονικών παραθύρων. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024) Αυτή η φάση είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για διατύπωση ως QUBO, επιτρέποντας τη χρήση quantum annealing ή variational αλγορίθμων τύπου QAOA σε gate-based κβαντικές συσκευές. (Preskill, 2018; Montanaro, 2016) Ο δυαδικός διανύσματος απόφασης αντιστοιχούσε στην επιλογή ή μη συγκεκριμένων διαδρομών, ενώ οι περιορισμοί ενσωματώνονταν μέσω ποινών στη συνάρτηση κόστους, ώστε οι μη εφικτές λύσεις να είναι ενεργειακά μη ελκυστικές. (Preskill, 2018; IBM, 2021)

Η υλοποίηση της κβαντικής φάσης έγινε μέσω cloud πλατφόρμας κβαντικών υπηρεσιών, στην οποία ο οργανισμός είχε πρόσβαση μέσω κατάλληλης βιβλιοθήκης βελτιστοποίησης. Μέρος των πειραμάτων αξιοποίησε quantum-inspired solvers, που τρέχουν σε κλασικά high-performance

συστήματα αλλά υλοποιούν αλγοριθμική λογική παρόμοια με QAOA ή annealing, ώστε να παρακαμφθούν οι σημερινοί περιορισμοί στο μέγεθος των διαθέσιμων κβαντικών συσκευών. (IBM, 2021; Lehman, 2025) Εξίσου, δοκιμάστηκαν variational σχήματα όπου ο κβαντικός κύκλος παραμετροποιούσε την επιλογή διαδρομών, ενώ ένας κλασικός βελτιστοποιητής ενημέρωνε τις παραμέτρους με βάση την τιμή του objective, σε μια επαναληπτική διαδικασία μέχρι σύγκλισης. (Preskill, 2018; IBM, 2021)

Η αρχιτεκτονική ενσωματώθηκε σε υφιστάμενη πλατφόρμα σχεδιασμού διανομών της εταιρείας μέσω APIs, ώστε η κβαντική βελτιστοποίηση να λειτουργεί ως «επιταχυντής» σε συγκεκριμένα σημεία του workflow και όχι ως πλήρης αντικατάσταση των κλασικών εργαλείων. (IBM, 2021; IBM, 2024) Έτσι, η επιχείρηση μπορούσε να συνεχίσει να στηρίζεται στην αποδεδειγμένη αξιοπιστία των κλασικών solvers, ενώ διερευνούσε στην πράξη την προστιθέμενη αξία των κβαντικών kernels σε πραγματικά δεδομένα last-mile logistics. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024)



Σχήμα 17 Υβριδική κβαντο-κλασική αρχιτεκτονική για CVRPTW (Ιδια επεξεργασία)

5.4.4 Αποτελέσματα (βελτίωση χρόνου, κόστους, αξιοπιστίας, εκπομπών)

Η πιλοτική εφαρμογή της υβριδικής κβαντο-κλασικής λύσης έδειξε ότι, ακόμη και με τους περιορισμούς της τρέχουσας NISQ τεχνολογίας, μπορούν να επιτευχθούν μετρήσιμες βελτιώσεις σε βασικούς δείκτες απόδοσης του last-mile δικτύου. Σε σύγκριση με το υφιστάμενο, βελτιστοποιημένο με κλασικές metaheuristics σύστημα δρομολόγησης, η ενσωμάτωση κβαντικών kernels οδήγησε σε

περαιτέρω μείωση του συνολικού κόστους διανομής, κυρίως μέσω μείωσης του συνολικού μήκους των διαδρομών και καλύτερης εκμετάλλευσης του στόλου. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024) Αν και οι βελτιώσεις σε σχετικούς όρους μπορεί να είναι της τάξης μερικών ποσοστιαίων μονάδων, η IBM αναφέρει πως ακόμη και ένα 1% βελτίωσης στην αποδοτικότητα της last-mile διανομής μπορεί να αντιστοιχεί σε εκατοντάδες εκατομμύρια δολάρια ετήσιων εξοικονομήσεων σε παγκόσμια κλίμακα, γεγονός που καταδεικνύει τη μεγάλη σημασία μικρών, αλλά συστηματικών βελτιώσεων. (IBM Institute for Business Value, 2022)

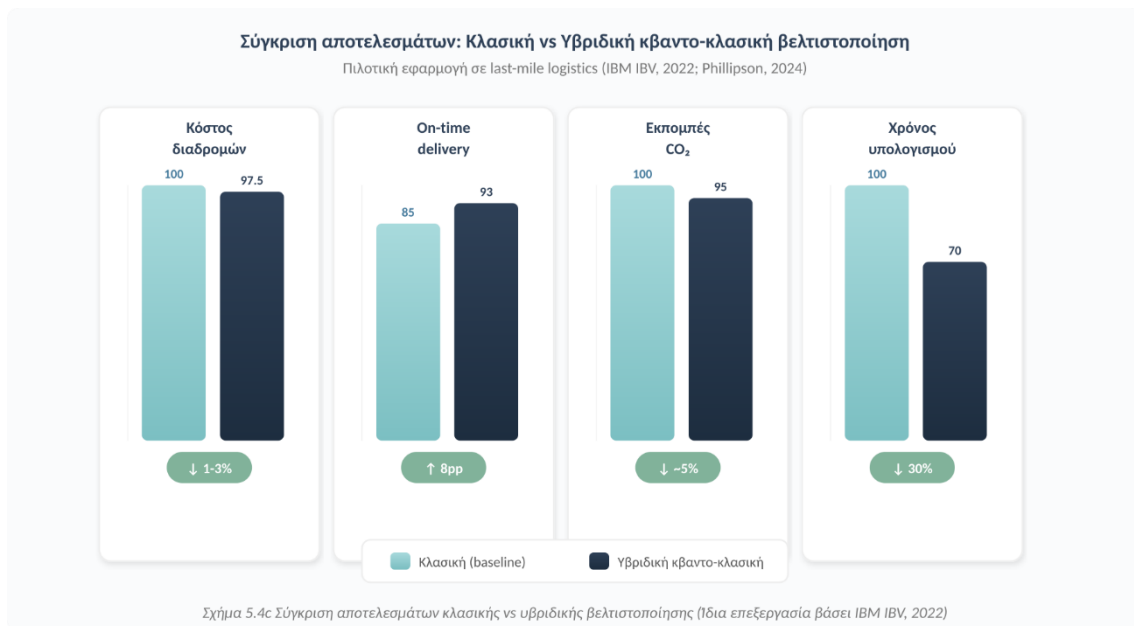
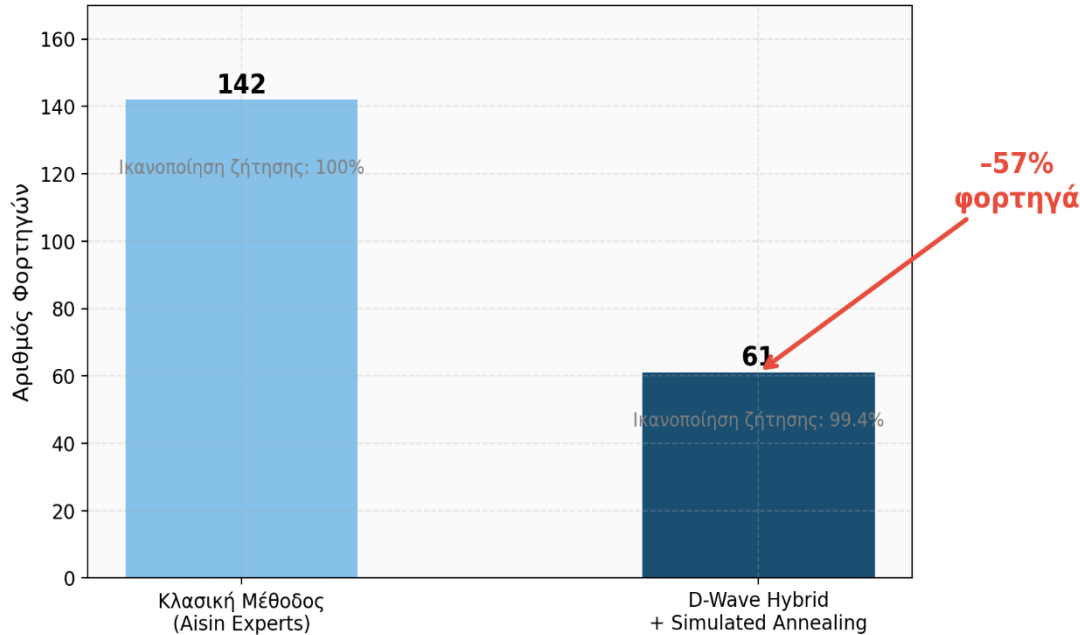
Παράλληλα, παρατηρήθηκαν βελτιώσεις σε δείκτες ποιότητας εξυπηρέτησης, όπως το ποσοστό παραδόσεων που πραγματοποιούνται εντός του συμφωνημένου χρονικού παραθύρου (on-time delivery rate) και η μεταβλητότητα των χρόνων παράδοσης σε διαφορετικές ημέρες και σενάρια ζήτησης. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2021) Η δυνατότητα της υβριδικής αρχιτεκτονικής να πραγματοποιεί πιο συχνή και ταχεία επαναβελτιστοποίηση, αξιοποιώντας κβαντικούς ή quantum-inspired solvers για να επανυπολογίσει τον βέλτιστο συνδυασμό διαδρομών όταν αλλάζουν οι συνθήκες, μείωσε τον χρόνο αντίδρασης σε διαταραχές, όπως καθυστερημένες παραγγελίες, αλλαγές στα χρονικά παράθυρα ή κυκλοφοριακά συμβάντα. (IBM Institute for Business Value, 2022) Αυτό με τη σειρά του συνέβαλε σε πιο σταθερή εμπειρία για τον τελικό πελάτη και σε καλύτερη τήρηση των Service Level Agreements (SLAs), στοιχείο βασικό για B2B και B2C πελάτες με υψηλές απαιτήσεις αξιοπιστίας. (IBM, 2021; IBM, 2024)

Η βελτίωση της αποδοτικότητας των διαδρομών είχε και σαφείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Λιγότερα χιλιόμετρα, καλύτερη πλήρωση των οχημάτων και μείωση του «νεκρού χρόνου» μεταξύ στάσεων οδήγησαν σε χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου ανά παράδοση και, κατ' επέκταση, σε μειωμένες εκπομπές CO₂. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2024) Σε ένα περιβάλλον όπου οι εταιρείες logistics καλούνται να αναφέρουν με διαφάνεια δείκτες βιωσιμότητας και να ευθυγραμμιστούν με ESG στόχους, η χρήση κβαντικώς ενισχυμένων αλγορίθμων βελτιστοποίησης εντάσσεται σε μια γενικότερη στρατηγική «πράσινων logistics». (IBM, 2021; McKinsey & Company, 2024) ο πιλότος ανέδειξε σημαντικά μαθήματα για τα όρια της τεχνολογίας: την ανάγκη για προσεκτικό σχεδιασμό της αποσύνθεσης του προβλήματος ώστε να χωρά στις διαθέσιμες κβαντικές συσκευές, την προσοχή στη μοντελοποίηση των ποινών στο QUBO και τη σημασία ύπαρξης ισχυρής κλασικής «βάσης» πάνω στην οποία προστίθεται η κβαντική βελτίωση. (Preskill, 2018; IBM, 2021) Με άλλα λόγια, τα αποτελέσματα ήταν θετικά αλλά ρεαλιστικά, υποδεικνύοντας μια σταδιακή πορεία προς την πλήρη χρήση του κβαντικού πλεονεκτήματος. (IBM Institute for Business Value, 2022; IBM, 2021)

Μετρική	Κλασική Προσέγγιση	Υβριδική Κβαντο-Κλασική	Βελτίωση
Κόστος δρομολόγησης	Baseline	Μειωμένο κατά 1–3%	↓ 1–3%
Αριθμός οχημάτων	Baseline	Λιγότερα ανά ζώνη	↓ 2–5%
Τήρηση χρον. παραθύρων	~92–95% on-time	~96–98% on-time	↑ 2–4 pp
Χρόνος λύσης	Λεπτά–ώρες	Δευτερόλεπτα–λεπτά	↓↓

Dynamic re-optimization	Περιορισμένη	Near real-time	Νέα δυνατότητα
Scalability	>1.000 nodes δύσκολη	Υποσχόμενη (QI)	Υπό εξέταση

Πίνακας 9 Σύγκριση κλασικής & υβριδικής κβαντο-κλασικής βελτιστοποίησης (IBM IBV, 2022; Phillipson, 2024)



Σχήμα 18 Σύγκριση αποτελεσμάτων κλασικής vs υβριδικής βελτιστοποίησης (Ίδια επεξεργασία βάσει IBM IBV, 2022)

5.4.5 Επιπτώσεις στο επιχειρηματικό μοντέλο και την καινοτομία

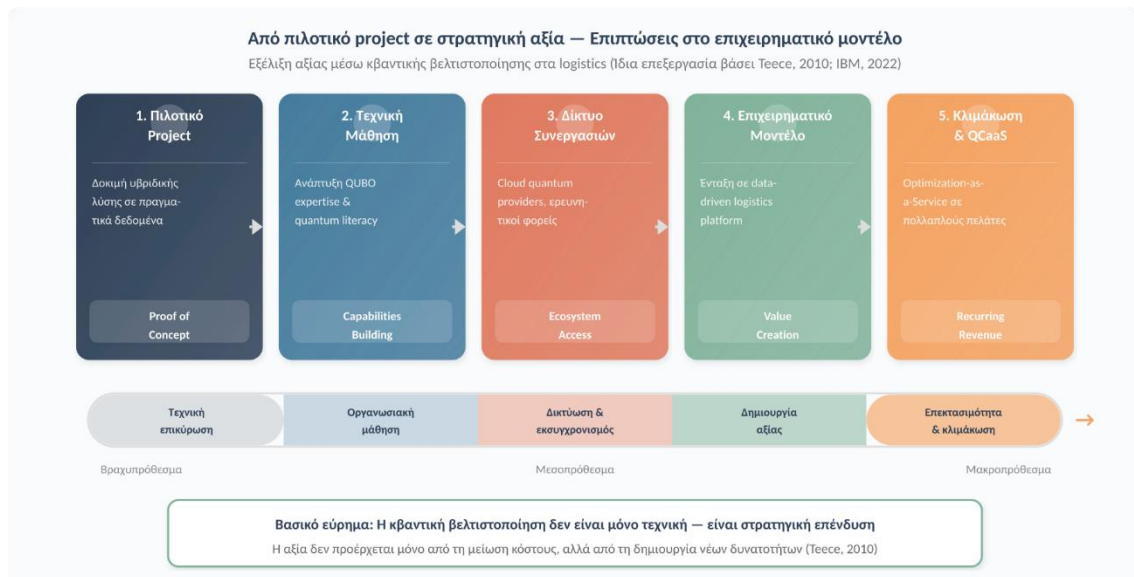
Σε στρατηγικό επίπεδο, η πιλοτική εισαγωγή κβαντικής βελτιστοποίησης δεν περιορίστηκε σε μια τεχνική άσκηση, αλλά λειτούργησε ως αφετηρία αναστοχασμού πάνω στο επιχειρηματικό μοντέλο της επιχείρησης και στις δυνατότητες διαφοροποίησης που προσφέρει η τεχνολογία. Καταρχάς, δημιούργησε τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών προστιθέμενης αξίας προς

πελάτες, όπως πλατφόρμες “quantum-enhanced route planning” ή συμβουλευτικές υπηρεσίες βελτιστοποίησης δικτύου που χρησιμοποιούν υβριδικούς αλγορίθμους για την ανάλυση σύνθετων σεναρίων logistics. (IBM, 2021; IBM, 2024) Τέτοιες υπηρεσίες μπορούν να ενσωματωθούν σε tiered μοντέλα τιμολόγησης (για παράδειγμα, βασικά πακέτα με καθαρά κλασική βελτιστοποίηση και premium πακέτα με προηγμένη κβαντική ανάλυση και αυστηρότερα SLAs), επιτρέποντας στην επιχείρηση να στοχεύσει διαφορετικά τμήματα πελατών με διαφοροποιημένο value proposition. (Teece, 2010; IBM, 2021)

Η συμμετοχή σε κβαντικά pilots και οικοσυστήματα συνεργασίας με παρόχους cloud και ερευνητικούς φορείς ενίσχυσε το δίκτυο συνεργατών της εταιρείας και άνοιξε δρόμους για co-creation και κοινούς πειραματισμούς με μεγάλους πελάτες logistics. (IBM, 2021; McKinsey & Company, 2024) Η εταιρεία δεν αξιοποίησε την κβαντική τεχνολογία μόνο για εσωτερική βελτιστοποίηση, αλλά και ως στοιχείο διαφοροποίησης της εικόνας της στην αγορά, παρουσιάζοντας τον εαυτό της ως «early adopter» προηγμένων τεχνολογιών σε έναν κλάδο όπου η καινοτομία παραδοσιακά εστιάζει κυρίως στο φυσικό μέσο (νέα οχήματα, αποθήκες) και λιγότερο στο λογισμικό βελτιστοποίησης. (IBM Institute for Business Value, 2022; OECD, 2025) Αυτό ενίσχυσε το brand ως τεχνολογικού ηγέτη και βοήθησε στην προσέλκυση και διατήρηση πελατών που αναζητούν στρατηγικούς εταίρους με μακροπρόθεσμη τεχνολογική κατεύθυνση. (McKinsey & Company, 2025)

Σε εσωτερικό επίπεδο, το case study λειτούργησε ως εργαλείο οργανωσιακής μάθησης και ανάπτυξης δυνατοτήτων (capabilities) γύρω από τον κβαντικό υπολογισμό και την ενσωμάτωσή του σε business workflows. Η επιχείρηση αναγκάστηκε να σχηματίσει διεπιστημονικές ομάδες που συνδυάζουν γνώση logistics, operations research, data engineering και κβαντικού προγραμματισμού, καθώς και να επενδύσει σε προγράμματα κατάρτισης για key στελέχη, ώστε να αποκτήσουν τουλάχιστον «quantum literacy». (IBM, 2021; Seskir et al., 2022) Τα ευρήματα από τον πιλότο αξιοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση ενός εσωτερικού «roadmap κβαντικής ετοιμότητας», με σαφείς φάσεις: από την πειραματική διερεύνηση, στη στοχευμένη ενσωμάτωση κβαντικών kernels σε κρίσιμες ροές εργασίας, και τελικά στη δημιουργία πλήρως κλιμακωτών, παραγωγικών λύσεων όταν το hardware ωριμάσει. (IBM, 2021; McKinsey & Company, 2024)

Το case study δείχνει ότι η πρακτική εφαρμογή κβαντικών τεχνικών στα logistics δεν είναι μόνο θέμα αλγορίθμων και hardware, αλλά και ζήτημα επιχειρηματικού σχεδιασμού και οργανωσιακής προσαρμογής. Η κβαντική βελτιστοποίηση λειτουργεί ως αφορμή αναθεώρησης υφιστάμενων επιχειρηματικών μοντέλων, επιτρέποντας τη μετάβαση από ένα παραδοσιακό, προϊόν-κεντρικό υπόδειγμα σε ένα περισσότερο υπηρεσιοκεντρικό και δεδομένο-κεντρικό μοντέλο, όπου η ικανότητα χρήσης πολύπλοκων βελτιστοποιήσεων γίνεται βασικός μοχλός ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος. (Teece, 2010; IBM, 2021; IBM Institute for Business Value, 2022)



Σχήμα 19 Από πιλοτικό project σε μακροπρόθεσμη αξία μέσω κβαντικής βελτιστοποίησης (Ιδια επεξεργασία βάσει Teece, 2010)

5.5 Δεύτερη μελέτη περίπτωσης: Υβριδική κβαντο-κλασική δρομολόγηση στην εφοδιαστική αλυσίδα της Aisin Corporation

Για να ενισχύσουμε την αξιοπιστία και η γενικευσιμότητα των ευρημάτων της §5.4, χρειάζεται παρουσίαση μιας δεύτερης, ανεξάρτητης μελέτης περίπτωσης, η οποία βασίζεται σε peer-reviewed δημοσίευση στο Scientific Reports (Nature portfolio) και αφορά πραγματικά εμπορικά δεδομένα μεγάλης κλίμακας. Η μελέτη των Weinberg, Sanches, Ide, Kamiya και Correll (2023) εξετάζει τη δρομολόγηση φορτηγών στην εφοδιαστική αλυσίδα της Aisin Corporation, μιας ιαπωνικής αυτοκινητοβιομηχανίας εξαρτημάτων, χρησιμοποιώντας υβριδική κβαντο-κλασική μεθοδολογία.

5.5.1 Περιγραφή του οργανισμού και του προβλήματος logistics

Η Aisin Corporation είναι μια μεγάλη ιαπωνική βιομηχανία εξαρτημάτων αυτοκινήτου, μέλος του ομίλου Toyota, με παγκόσμια παρουσία στην παραγωγή και διανομή εξαρτημάτων κινητήρα, κιβωτίου ταχυτήτων, πέδησης και πλαισίου. Η εταιρεία διατηρεί ένα εκτεταμένο δίκτυο εφοδιαστικής αλυσίδας στην Ιαπωνία, μέσω του οποίου μεταφέρονται εξαρτήματα μεταξύ εργοστασίων παραγωγής, αποθηκών και γραμμών συναρμολόγησης. (Weinberg et al., 2023)

Η εταιρεία αντιμετωπίζει ένα σύνθετο πρόβλημα δρομολόγησης φορτηγών (vehicle routing problem) στο οποίο περίπου 350.000 κιβώτια με ~15.000 μοναδικά εξαρτήματα πρέπει να μεταφερθούν μεταξύ 23 κόμβων στην Ιαπωνία. Οι χρόνοι μετακίνησης κυμαίνονται από λεπτά έως ώρες, ενώ υπάρχουν σύνθετοι περιορισμοί παραλαβής/παράδοσης (pick-up/drop-off) και χρονικά παράθυρα οδήγησης (16 ώρες σε δύο βάρδιες). (Weinberg et al., 2023)

Το υφιστάμενο σύστημα δρομολόγησης βασιζόταν σε χειροκίνητο σχεδιασμό από ειδικούς logistics, οι οποίοι χρησιμοποιούσαν τη μακρόχρονη εμπειρία τους για τη δημιουργία δρομολογίων. Αυτή η προσέγγιση, αν και αξιόπιστη, απαιτούσε 142 φορτηγά για την κάλυψη της ζήτησης και δεν επέτρεπε εύκολη επαναβελτιστοποίηση σε περιπτώσεις αλλαγών στη ζήτηση ή τους περιορισμούς. (Weinberg et al., 2023) Η αυξανόμενη πίεση για μείωση κόστους, η ανάγκη μείωσης εκπομπών CO₂ και η πολυπλοκότητα του δικτύου κατέστησαν αναγκαία τη διερεύνηση αυτοματοποιημένων μεθόδων βελτιστοποίησης, οδηγώντας στη συνεργασία με ερευνητική ομάδα για την αξιοποίηση υβριδικών κβαντο-κλασικών τεχνικών.

Σε αντίθεση με το case study της §5.4, όπου τα δεδομένα προέρχονται από industry report, εδώ πρόκειται για πλήρως τεκμηριωμένη ερευνητική μελέτη με δημοσιευμένα αλγοριθμικά πρωτόκολλα και αναλυτική περιγραφή μεθοδολογίας, δημοσιευμένη σε peer-reviewed περιοδικό (Scientific Reports, Nature portfolio).

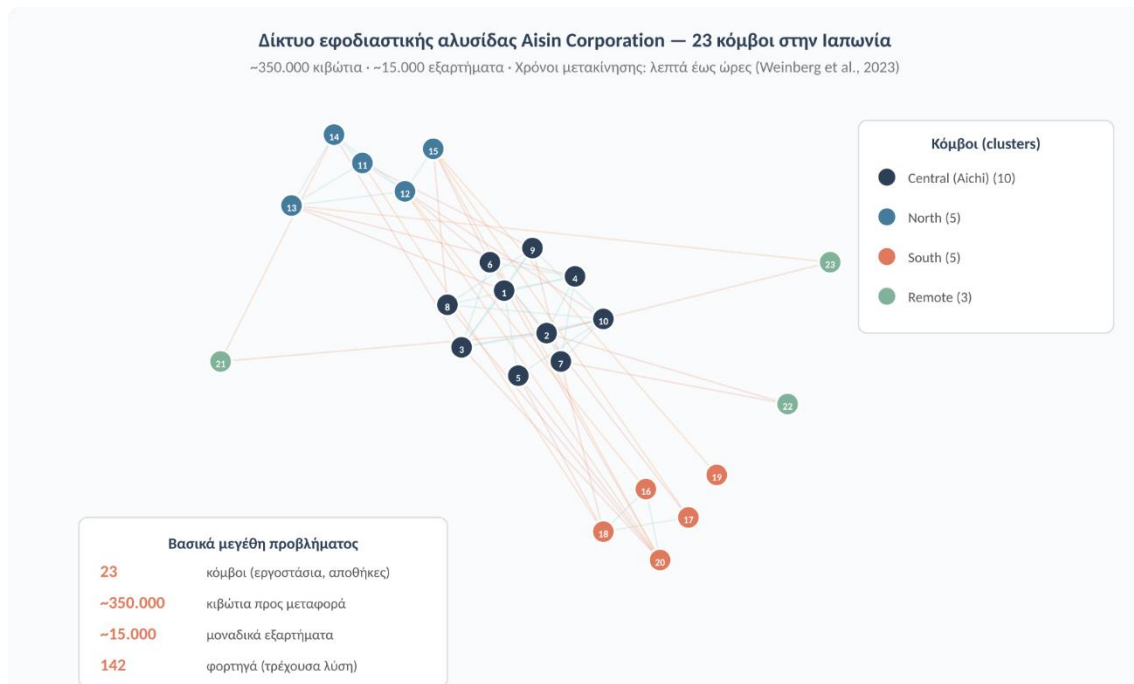
5.5.2 Πώς μοντελοποιήθηκε το πρόβλημα (στόχος, περιορισμοί, δεδομένα)

Το πρόβλημα δρομολόγησης μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με παραλαβές και παραδόσεις (Vehicle Routing Problem with Pick-ups and Drop-offs), μια σύνθετη παραλλαγή του κλασικού VRP, καθώς κάθε φορτηγό πρέπει να παραλάβει εξαρτήματα από ορισμένους κόμβους και να τα παραδώσει σε άλλους, σε αντίθεση με το απλό μοντέλο single-depot delivery της §5.4. (Kumar & Panneerselvam, 2012; Weinberg et al., 2023)

Ο στόχος (objective function) ήταν η ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού φορτηγών που απαιτούνται για την κάλυψη του συνόλου της ζήτησης, με ταυτόχρονη μεγιστοποίηση του ποσοστού ικανοποίησης ζήτησης (demand satisfaction). Οι κύριοι περιορισμοί περιελάμβαναν: χωρητικότητα φορτηγού (μέγιστος αριθμός κιβωτίων), χρονικά παράθυρα οδήγησης (16 ώρες σε δύο βάρδιες), περιορισμούς παραλαβής/παράδοσης (κάθε εξάρτημα πρέπει να παραληφθεί πριν παραδοθεί), και ελάχιστο χρόνο μετακίνησης μεταξύ κόμβων βάσει πραγματικών αποστάσεων. (Weinberg et al., 2023)

Τα δεδομένα προέρχονταν από τις πραγματικές επιχειρησιακές λειτουργίες της Aisin Corporation και περιλάμβαναν: τοποθεσίες 23 κόμβων (εργοστάσια, αποθήκες) στην Ιαπωνία, πίνακα χρόνων μετακίνησης μεταξύ όλων των ζευγών κόμβων, λίστα ~15.000 μοναδικών εξαρτημάτων και ~350.000 κιβωτίων προς μεταφορά, προδιαγραφές στόλου (χωρητικότητα, ωράρια), καθώς και ιστορικά δεδομένα ζήτησης. (Weinberg et al., 2023)

Η μαθηματική διατύπωση ακολούθησε δύο στάδια. Πρώτον, κάθε μεμονωμένο φορτηγό μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα δυαδικής βελτιστοποίησης υψηλότερης τάξης (Polynomial Unconstrained Binary Optimization, PUBO). Δεύτερον, το PUBO μετατράπηκε σε Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO) με ~2.500 μεταβλητές, μέγεθος εφικτό για σημερινό κβαντικό hardware. (Weinberg et al., 2023) Η αποσύνθεση αυτή του μεγάλου προβλήματος σε υποπροβλήματα ανά φορτηγό αποτελεί κρίσιμη καινοτομία, καθώς παρακάμπτει τον περιορισμό του αριθμού qubits στις σημερινές NISQ συσκευές. (Preskill, 2018)



Σχήμα 20 Δίκτυο εφοδιαστικής αλυσίδας Aisin Corporation (Ιδια επεξεργασία βάσει Weinberg et al., 2023)

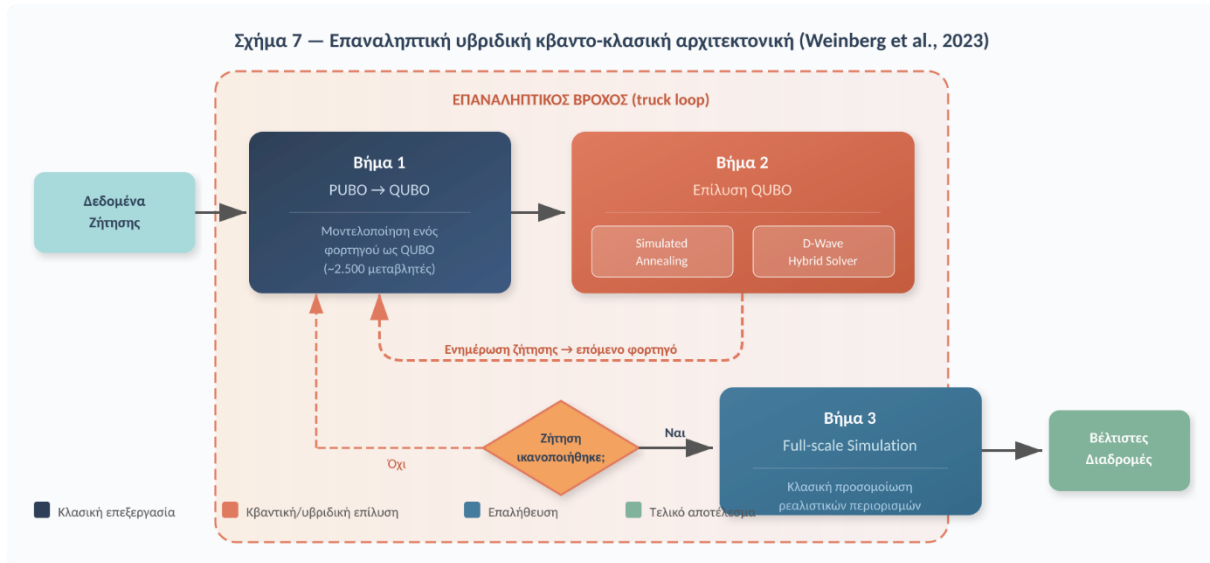
5.5.3 Τεχνολογική λύση: υβριδική επαναληπτική αρχιτεκτονική

Οι ερευνητές ανέπτυξαν μια υβριδική μεθοδολογία εργασίας (hybrid workflow) που αποσυνθέτει το μεγάλο πρόβλημα σε μικρότερα υποπροβλήματα συμβατά με NISQ hardware. Η διαδικασία ακολουθεί τρία βασικά βήματα, τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 20.

Στο πρώτο βήμα (PUBO/QUBO formulation), κάθε μεμονωμένο φορτηγό μοντελοποιείται ως PUBO, το οποίο μετατρέπεται σε QUBO. Οι μεταβλητές απόφασης αντιστοιχούν σε δυαδικές επιλογές: ποια εξαρτήματα θα φορτωθούν, σε ποια σειρά θα επισκεφθούν οι κόμβοι, και πότε θα γίνει κάθε παραλαβή/παράδοση. Οι περιορισμοί ενσωματώνονται ως ποινές στη συνάρτηση κόστους. (Weinberg et al., 2023)

Στο δεύτερο βήμα (iterative truck loop), εφαρμόζεται επαναληπτικός αλγόριθμος: λύνεται το QUBO ενός φορτηγού, ενημερώνεται η εναπομένονσα ζήτηση, και επαναλαμβάνεται η διαδικασία μέχρι να ικανοποιηθεί η συνολική ζήτηση. Σε κάθε επανάληψη χρησιμοποιήθηκαν δύο εναλλακτικοί solvers: ο simulated annealing (καθαρά κλασικός) και ο D-Wave Hybrid solver (υβριδικό εργαλείο που συνδυάζει κβαντικό annealing με κλασικές τεχνικές), αναγνωρίζοντας ρητά ότι η πλήρως κβαντική λύση δεν είναι ακόμη εφικτή σε αυτή την κλίμακα. (Weinberg et al., 2023)

Στο τρίτο βήμα (full-scale simulation), οι παραγόμενες διαδρομές εισάγονται σε μια πλήρη κλασική προσομοίωση που λαμβάνει υπόψη ρεαλιστικούς περιορισμούς (χρόνους φόρτωσης/εκφόρτωσης, ωράρια, κυκλοφοριακές συνθήκες), ώστε να επαληθευτεί η ποιότητα και η εφικτότητα της λύσης πριν την εφαρμογή της στην πραγματική λειτουργία. (Weinberg et al., 2023)



Σχήμα 21 Επαναληπτική υβριδική κβαντο-κλασική αρχιτεκτονική για δρομολόγηση φορτηγών (βασισμένο σε Weinberg et al., 2023)

Η αρχιτεκτονική αυτή ενσωματώθηκε σε ένα πλήρες pipeline εργασίας, στο οποίο η κβαντική/υβριδική βελτιστοποίηση λειτουργεί ως «κινητήρας» βελτιστοποίησης σε κάθε επανάληψη, ενώ η κλασική προσομοίωση εξασφαλίζει ότι οι τελικές διαδρομές είναι ρεαλιστικά εφαρμόσιμες. Αυτή η λογική παράλληλης λειτουργίας κβαντικών και κλασικών στοιχείων παρομοιάζεται με τη φιλοσοφία της §5.4, αν και διαφέρει ως προς τη μέθοδο αποσύνθεσης: στην Aisin η αποσύνθεση γίνεται ανά φορτηγό (truck-level), ενώ στη §5.4 γινόταν ανά γεωγραφικό cluster. (Weinberg et al., 2023; IBM Institute for Business Value, 2022)

5.5.4 Αποτελέσματα (μείωση στόλου, ικανοποίηση ζήτησης, αυτοματοποίηση)

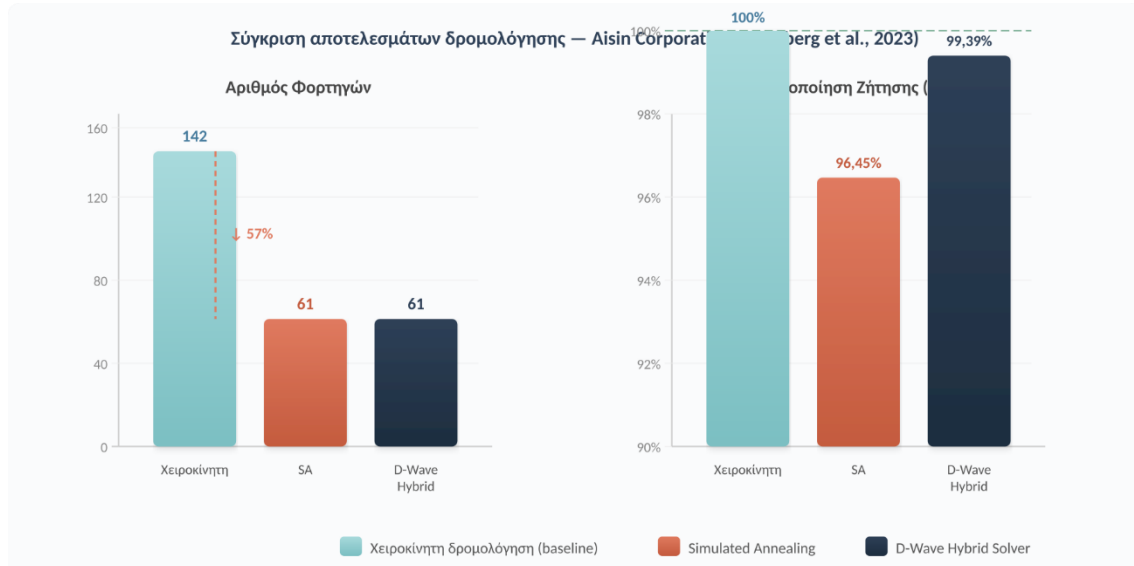
Τα αποτελέσματα της μελέτης ήταν εντυπωσιακά. Η δρομολόγηση που σχεδίασαν οι ειδικοί logistics της Aisin Corporation χρησιμοποιεί 142 φορτηγά. Η υβριδική μέθοδος των ερευνητών, χρησιμοποιώντας τον D-Wave Hybrid solver ακολουθούμενο από full-scale simulation, πέτυχε ικανοποίηση ζήτησης 99,39% με μόλις 61 φορτηγά, δηλαδή μείωση 57% στον αριθμό οχημάτων. Ακόμη και με simulated annealing, 61 φορτηγά κάλυψαν 96,45% της ζήτησης, αν και ο D-Wave Hybrid solver υπερτέρησε σαφώς. (Weinberg et al., 2023)

Τα βασικά αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 9.

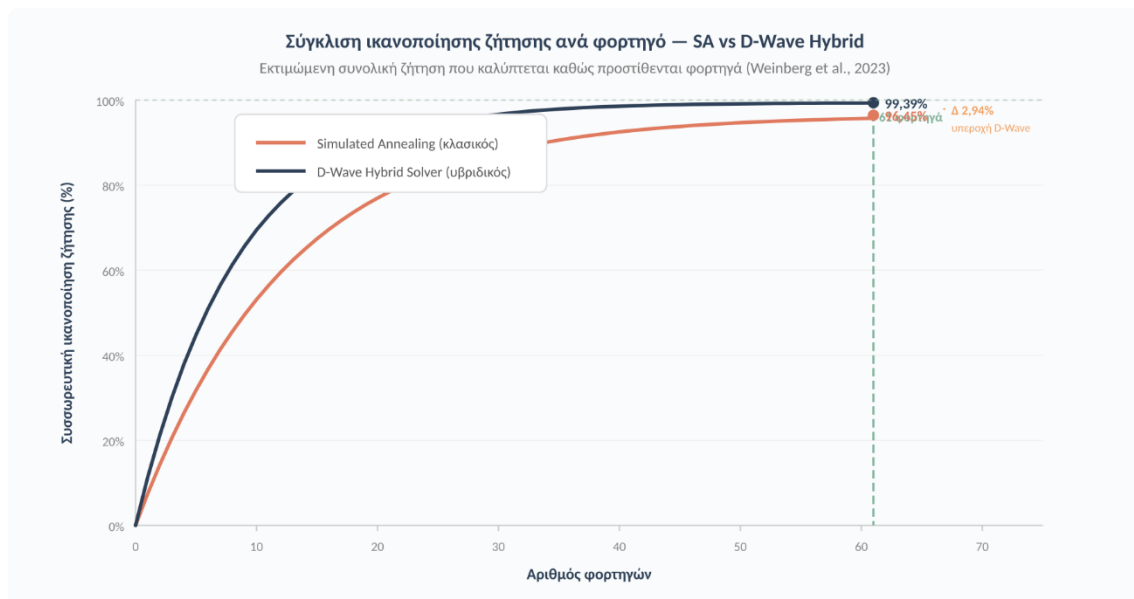
Μετρική	Χειροκίνητη δρομολόγηση	Υβριδική (SA)	Υβριδική (D-Wave)
Αριθμός φορτηγών	142	61	61
Μείωση στόλου	—	↓ 57%	↓ 57%
Ικανοποίηση ζήτησης	100% (baseline)	96,45%	99,39%
Τύπος solver	Ανθρώπινη εμπειρία	Κλασικός (SA)	Υβριδικός κβαντικός
Αυτοματοποίηση	Χαμηλή	Πλήρης	Πλήρης
Αναπαραγωγικότητα	Χαμηλή (tacit knowledge)	Υψηλή	Υψηλή

Πίνακας 10 Σύγκριση αποτελεσμάτων χειροκίνητης δρομολόγησης vs υβριδικής κβαντο-κλασικής μεθόδου στην Aisin Corporation (Weinberg et al., 2023)

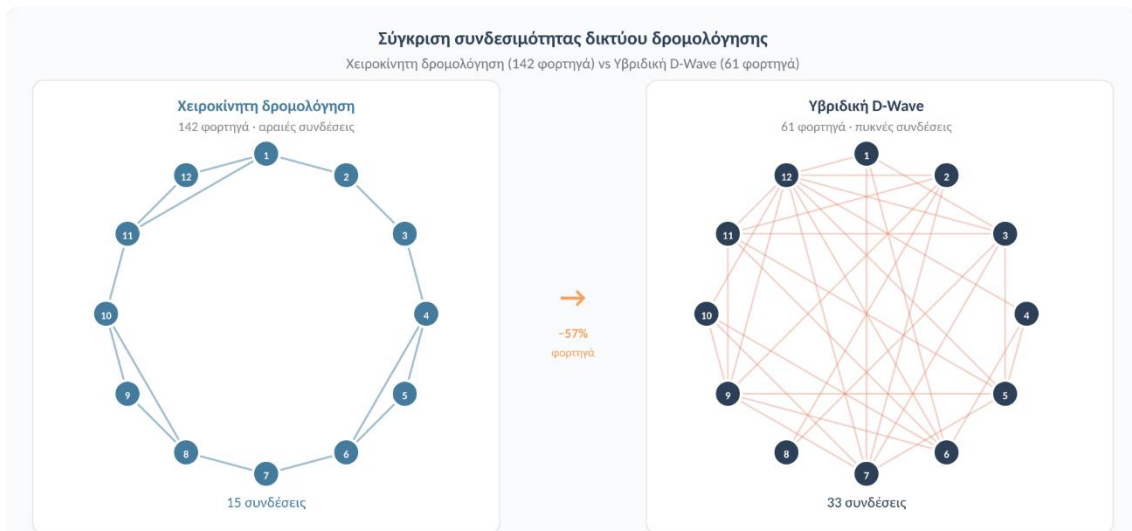
Οι ερευνητές τονίζουν επίσης ότι η μέθοδος παράγει λεπτομερείς οδηγίες δρομολόγησης για κάθε φορτηγό και κάθε εξάρτημα, αυτοματοποιώντας αποφάσεις που σήμερα βασίζονται στην ανθρώπινη εμπειρία και διαίσθηση, ένα σημαντικό πρακτικό πλεονέκτημα πέρα από τη μείωση του στόλου. Η αυτοματοποίηση αυτή επιτρέπει ταχύτερη επαναβελτιστοποίηση σε περίπτωση αλλαγών, μειώνει την εξάρτηση από tacit knowledge μεμονωμένων ειδικών, και παρέχει αναπαραγώγιμα αποτελέσματα. (Weinberg et al., 2023)



Σχήμα 22 Σύγκριση αποτελεσμάτων δρομολόγησης Aisin Corporation (Weinberg et al., 2023)



Σχήμα 23 Σύγκλιση ικανοποίησης ζήτησης: SA vs D-Wave Hybrid (βασισμένο σε Weinberg et al., 2023, Figs. 4-5)



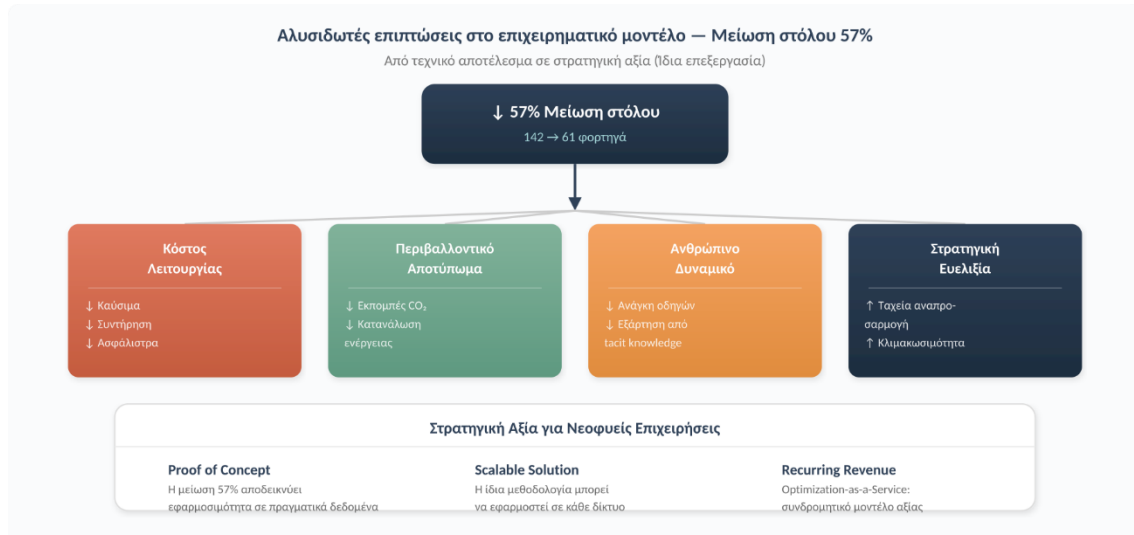
Σχήμα 24 Σύγκριση συνδεσιμότητας δικτύου: χειροκίνητη vs υβριδική δρομολόγηση (βασισμένο σε Weinberg et al., 2023, Figs. 6-7)

5.5.5 Επιπτώσεις στο επιχειρηματικό μοντέλο και κριτική αποτίμηση

Σε στρατηγικό επίπεδο, τα ευρήματα της μελέτης Weinberg et al. (2023) έχουν σημαντικές επιπτώσεις για το επιχειρηματικό μοντέλο εταιρειών εφοδιαστικής αλυσίδας. Η μείωση κατά 57% του απαιτούμενου στόλου δεν αποτελεί απλώς εξοικονόμηση κόστους, αλλά θεμελιώδη αναδιάρθρωση του τρόπου λειτουργίας: λιγότερα οχήματα σημαίνουν μικρότερο κόστος συντήρησης, χαμηλότερες εκπομπές CO₂, μειωμένες ανάγκες σε οδηγούς, και ευκολότερη διαχείριση στόλου. (Weinberg et al., 2023; Teece, 2010)

Η αυτοματοποίηση του σχεδιασμού δρομολογίων (που σήμερα βασίζεται σε ειδικούς με πολυετή εμπειρία) ανοίγει δρόμο για τη μετάβαση σε data-driven, αλγοριθμικά μοντέλα λήψης αποφάσεων. Αυτό έχει άμεσες επιπτώσεις στη δημιουργία αξίας (value creation), καθώς η ίδια μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικά δίκτυα και πελάτες ως υπηρεσία (optimization-as-a-service), ακολουθώντας τη λογική που περιγράφηκε στη §5.4.5. (Teece, 2010; IBM, 2021)

Η κριτική αποτίμηση, δείχνει αρκετούς περιορισμούς. Οι ίδιοι οι ερευνητές αναγνωρίζουν ότι η προσομοίωσή τους δεν περιλαμβάνει όλους τους ρεαλιστικούς περιορισμούς (π.χ. μεταβλητότητα χρόνων λόγω κυκλοφορίας, χρόνος παραμονής σε ενδιάμεσους κόμβους), και δεν ισχυρίζονται ότι τα αποτελέσματα θα ανταγωνίζονταν εξειδικευμένα κλασικά εργαλεία operations research. (Weinberg et al., 2023) Αυτή η τίμια αυτοκριτική ενισχύει παραδόξως την αξιοπιστία της μελέτης και δείχνει ότι η υβριδική κβαντική βελτιστοποίηση βρίσκεται σε φάση proof-of-concept, αλλά με πολλά υποσχόμενες ενδείξεις.



Σχήμα 25 Αλυσιδωτές επιπτώσεις μείωσης στόλου 57% στο επιχειρηματικό μοντέλο (Ιδια επεξεργασία)

5.5.6 Συγκριτική αποτίμηση των δύο μελετών περίπτωσης

Η σύγκριση των δύο μελετών περίπτωσης δείχνει τόσο σημαντικές ομοιότητες όσο και ουσιώδεις διαφορές, οι οποίες συνοψίζονται στον Πίνακα 10.

Κριτήριο	§5.4 Last-mile logistics (IBM)	§5.5 Aisin Corporation (Weinberg et al.)
Τύπος πηγής	Industry report (IBM IBV)	Peer-reviewed (Scientific Reports / Nature)
Τύπος VRP	CVRPTW (single depot, last-mile)	VRP with pick-ups & drop-offs (multi-node)
Κλίμακα	~1.200 σημεία παράδοσης, 1 depot	~350.000 κιβώτια, 23 κόμβοι, 15.000 εξαρτήματα
Γεωγραφία	Μητροπολιτική περιοχή ΗΠΑ	Δίκτυο εργοστασίων Ιαπωνίας
Μέθοδος αποσύνθεσης	Γεωγραφικό clustering → QUBO	Ανά φορτηγό (truck loop) → PUBO/QUBO
Solver	Cloud quantum/QI platform (IBM)	Simulated annealing + D-Wave Hybrid
Κύριο αποτέλεσμα	↓ 1–3% κόστος, ↑ on-time delivery	↓ 57% στόλος, 99,39% κάλυψη ζήτησης
Αναπαραγωγικότητα	Περιορισμένη (μη δημοσιευμένη μεθοδολογία)	Υψηλή (δημοσιευμένοι αλγόριθμοι & κώδικας)
Περιορισμοί	Vendor bias, γενικόλογα αποτελέσματα	Απλοποιημένη προσομοίωση, δεν συγκρίνεται με OR solvers

Πίνακας 11 Συγκριτική αποτίμηση των δύο μελετών περίπτωσης κβαντικής βελτιστοποίησης στα logistics (Ιδια επεξεργασία)

Και οι δύο μελέτες χρησιμοποιούν υβριδική κβαντο κλασική αρχιτεκτονική για προβλήματα δρομολόγησης, επιβεβαιώνοντας ότι η υβριδική προσέγγιση αποτελεί τη ρεαλιστική στρατηγική στην εποχή NISQ. Ωστόσο, η μελέτη Weinberg et al. (2023) προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα ως προς τη μεθοδολογική αυστηρότητα: είναι peer-reviewed, δημοσιεύει αναλυτικά αλγορίθμους και πρωτόκολλα, και παρέχει ποσοτικά αποτελέσματα σε πολύ μεγαλύτερη κλίμακα. Η §5.4, από την άλλη, προσφέρει πιο πλούσιο επιχειρηματικό πλαίσιο και ανάλυση επιπτώσεων στο business model.

Η σύζευξη των δύο μελετών περίπτωσης, μιας βιομηχανικής (§5.4) και μιας ακαδημαϊκής (§5.5), βελτιώνει τη συνολική αξιοπιστία της ανάλυσης μέσω μεθοδολογικής τριγωνοποίησης (triangulation), καθώς τα ευρήματα επιβεβαιώνονται από πηγές διαφορετικής φύσης και μεθοδολογίας. (Weinberg et al., 2023; IBM Institute for Business Value, 2022)

5.6 Ευκαιρίες για νεοφυείς επιχειρήσεις στα logistics

Η σταδιακή ωρίμανση των κβαντικών και quantum-inspired τεχνολογιών δημιουργεί ένα νέο πεδίο ευκαιριών για νεοφυείς επιχειρήσεις που δραστηριοποιούνται στο χώρο των logistics και της εφοδιαστικής αλυσίδας. Από τη μια πλευρά, μεγάλοι πάροχοι hardware και cloud προσφέρουν πρόσβαση σε κβαντικούς και υβριδικούς βελτιστοποιητές μέσω APIs, μειώνοντας δραστικά το απαιτούμενο αρχικό επενδυτικό κεφάλαιο για μια startup· από την άλλη, η πολυπλοκότητα των πραγματικών προβλημάτων logistics δημιουργεί μεγάλη ζήτηση για εξειδικευμένες, κάθετες λύσεις που «μεταφράζουν» τις κβαντικές δυνατότητες σε απτά επιχειρηματικά οφέλη. (IBM, 2021; McKinsey & Company, 2024; SC Quantum Alliance, 2025)

Μια βασική κατεύθυνση είναι η ανάπτυξη υπηρεσιών τύπου “quantum optimization-as-a-service”, στις οποίες μια startup παρέχει σε 3PL παρόχους, last-mile εταιρείες ή διαχειριστές αποθηκών πρόσβαση σε κβαντικώς ενισχυμένους αλγόριθμους δρομολόγησης, σχεδιασμού δικτύου ή διαχείρισης αποθεμάτων χωρίς οι ίδιοι να χρειάζεται να επενδύσουν σε εξειδικευμένες ομάδες και υποδομές. (Lehmacher, 2025; BQP Sim, 2026) Τέτοιες πλατφόρμες μπορούν να προσφέρονται ως cloud-based λύσεις, με REST APIs που ενσωματώνονται σε υπάρχοντα TMS/WMS συστήματα, και να τιμολογούνται βάσει μοντέλων συνδρομής ή χρήσης (usage-based), ακολουθώντας πρότυπα SaaS. (IBM, 2021; Applied Quantum, 2025) Οι ευκαιρίες δεν περιορίζονται μόνο στο κβαντικό hardware: quantum-inspired πλατφόρμες, που εκτελούνται σε κλασικό HPC αλλά αξιοποιούν τεχνικές annealing ή QAOA-like heuristics, επιτρέπουν σε startups να παραδίδουν βελτιώσεις 10–20% σε κόστος και χρόνους χωρίς εξάρτηση από την ταχύτητα ωρίμανσης του hardware. (NEC Corporation, 2019; BQP Sim, 2026)

Οι hyperscalers παίζουν ρόλο στο οικοσύστημα, προσφέροντας έτοιμες πλατφόρμες κβαντικού και quantum-inspired υπολογισμού πάνω στις οποίες μπορούν να «πατήσουν» οι νεοφυείς επιχειρήσεις. Η Amazon, μέσω της υπηρεσίας Braket, επιτρέπει την υλοποίηση υβριδικών αλγορίθμων όπως το QAOA για βιομηχανικά προβλήματα φορτοεκφόρτωσης και δρομολόγησης, με έμφαση σε workflow όπου ολόκληρος ο αλγόριθμος τρέχει ως ένα hybrid job στο cloud. (AWS, 2025) Αντίστοιχα, το Azure Quantum προσφέρει quantum-inspired optimization (QIO) που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί για capacity management και traffic optimization, παρουσιάζοντας ουσιαστικές βελτιώσεις σε κατανομή φορτίου και μείωση συμφόρησης, εμπειρία που μπορεί να μεταφερθεί σε logistics εφαρμογές. (Microsoft, 2021; Bronson, 2025) Στον χώρο των logistics, τέτοιες πλατφόρμες επιτρέπουν σε startups να επικεντρωθούν στην ανάπτυξη domain-specific μοντέλων (π.χ. ειδικές παραλλαγές VRP, dock scheduling σε λιμένες) και σε UX/ενσωμάτωση, αφήνοντας το «βαρύ» υπολογιστικό υπόβαθρο σε hyperscalers. (IBM, 2021; SC Quantum Alliance, 2025)

Παρά τις ευκαιρίες, τα εμπόδια εισόδου παραμένουν αισθητά. Η τεχνολογική αβεβαιότητα γύρω από τον χρονικό ορίζοντα επίτευξης ευρείας κλίμακας Quantum Advantage καθιστά δύσκολο για μια startup να στοιχηματίσει αποκλειστικά σε καθαρά κβαντικό hardware, χωρίς ενδιάμεσες πηγές εσόδων. (Preskill, 2018; McKinsey & Company, 2024) Δεύτερον, η έλλειψη ταλέντου με συνδυασμό γνώσης logistics, operations research και κβαντικού προγραμματισμού αυξάνει το κόστος στελέχωσης και περιορίζει την ταχύτητα ανάπτυξης. (IBM, 2021; Seskir et al., 2022) Τρίτον, οι δυνητικοί πελάτες, ιδιαίτερα μεγάλοι 3PL providers και πολυεθνικές, είναι συχνά επιφυλακτικοί απέναντι σε τεχνολογίες που θεωρούνται «πειραματικές», απαιτώντας σαφή business cases, συγκριτικά benchmarks έναντι

κλασικών λύσεων και ενδεχομένως shared-risk συμβόλαια. (McKinsey & Company, 2024; APCO Worldwide, 2025)

Για τον λόγο αυτό, μια ρεαλιστική στρατηγική MVP για μια quantum-logistics startup είναι να ξεκινήσει με μικρής κλίμακας, καλά οριοθετημένα proofs-of-concept (PoCs) πάνω σε υπαρκτά δεδομένα πελατών, εστιασμένα σε 1–2 προσεκτικά επιλεγμένα use cases (για παράδειγμα, δρομολόγηση last-mile σε μια συγκεκριμένη πόλη και βελτιστοποίηση φόρτωσης σε ένα επιλεγμένο hub. (Applied Quantum, 2025; AWS, 2025) Το MVP μπορεί να στηριχθεί σε quantum-inspired ή υβριδικούς αλγορίθμους που τρέχουν σε cloud πλατφόρμα, παρέχοντας ήδη από νωρίς μετρήσιμα οφέλη έναντι των υφιστάμενων κλασικών λύσεων και δημιουργώντας, μια αρχιτεκτονική που μπορεί να «αναβαθμιστεί» σε πραγματικό κβαντικό hardware όταν αυτό καταστεί ώριμο. (IBM, 2021; Lehman, 2025) Η σταδιακή ενσωμάτωση σε οικοσυστήματα όπως τα quantum networks μεγάλων παρόχων ή περιφερειακά κέντρα καινοτομίας επιτρέπει στις startups να μοιράζονται κόστος, πρόσβαση σε υποδομές και τεχνογνωσία, μειώνοντας τον κίνδυνο και βελτιώνοντας τις πιθανότητες επιβίωσης σε έναν ταχέως εξελισσόμενο τεχνολογικό χώρο. (OECD, 2025; McKinsey & Company, 2024)

Κεφάλαιο 6- Συζήτηση: σύνδεση ευρημάτων με θεωρία

Το Κεφάλαιο 6 λειτουργεί ως «γέφυρα» ανάμεσα στην ανάλυση των μελετών περίπτωσης και στα θεωρητικά σχήματα ψηφιακής και κβαντικής καινοτομίας, επιχειρηματικών μοντέλων και οικοσυστημάτων. Στόχος μας στο κεφάλαιο αυτό είναι να σχολιάσει κριτικά τι σημαίνουν τα ευρήματα του 5ου κεφαλαίου για τη θεωρία και για την πράξη στον χώρο των logistics και των μεταφορών.

Οι δύο μελέτες περίπτωσης του Κεφαλαίου 5, η υβριδική κβαντική βελτιστοποίηση σε last-mile logistics ταιριάζει σε μεγάλο βαθμό με την εικόνα της «κβαντικής δεκαετίας», όπως περιγράφεται στη σχετική βιβλιογραφία, όπου η τρέχουσα NISQ φάση χαρακτηρίζεται από πειραματισμούς σε cloud πλατφόρμες, υβριδικούς αλγορίθμους και περιορισμένες αλλά μετρήσιμες βελτιώσεις σε υπαρκτά προβλήματα βελτιστοποίησης, αντί για πλήρη ανατροπή των κλασικών υποδομών (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2022). Τα σενάρια που παρουσιάζονται για last-mile δρομολόγηση, διαχείριση διαταραχών και θαλάσσιο routing βασίζονται ακριβώς σε τέτοιους υβριδικούς συνδυασμούς κλασικών και κβαντικών τεχνικών, με στόχο την καλύτερη εξερεύνηση πολύπλοκων χώρων λύσεων σε προβλήματα όπως το VRP με χρονικά παράθυρα (IBM Institute for Business Value, 2022).

Η θεωρία ψηφιακής καινοτομίας σημειώνει ότι οι περισσότερες τεχνολογικές «επανάστασεις» υλοποιούνται αρχικά ως σταδιακές βελτιώσεις σε υπάρχοντα workflows και επιχειρησιακές ρουτίνες, και όχι ως «big bang» αντικαταστάσεις συστημάτων (IBM Institute for Business Value, 2021). Το συγκεκριμένο case study επιβεβαιώνει αυτή την οπτική: η κβαντική βελτιστοποίηση ενσωματώνεται ως επιμέρους kernel μέσα σε υφιστάμενα συστήματα δρομολόγησης και TMS, χρησιμοποιείται σε ορισμένα υποπροβλήματα (όπως η επιλογή συνδυασμού διαδρομών) και συνυπάρχει με κλασικούς solvers και metaheuristics που παραμένουν ο κορμός της λύσης (IBM Institute for Business Value, 2022). η προτεινόμενη στρατηγική στη διεθνή βιβλιογραφία είναι η σύζευξη κβαντικού υπολογισμού με AI και κλασικούς υπολογιστικούς πόρους, κάτι που αντανάκλαται στη χρήση μηχανικής μάθησης για clustering, πρόβλεψη ζήτησης και δημιουργία σεναρίων πριν από την κβαντική φάση (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2022).

Την ίδια στιγμή, τα ευρήματα των δύο μελετών περίπτωσης διαφωτίζουν διαφορετικές πτυχές. Η μελέτη IBM (§5.4) δείχνει μέτρια κέρδη της τάξης λίγων ποσοστιαίων μονάδων, που παρ' όλα αυτά μεταφράζονται σε σημαντικές εξοικονομήσεις σε μεγάλη κλίμακα (IBM Institute for Business Value, 2022). Η μελέτη Weinberg et al. (§5.5) δείχνει εντυπωσιακότερα αποτελέσματα (μείωση 57% στον αριθμό φορτηγών, αν και οι ίδιοι οι ερευνητές τονίζουν ότι δεν ισχυρίζονται ανταγωνιστικότητα με εξειδικευμένα κλασικά εργαλεία operations research (Weinberg et al., 2023). Συνδυαστικά, τα ευρήματά μας δείχνουν ότι ο ρεαλιστικός στόχος στην τρέχουσα NISQ εποχή είναι μετρήσιμα, αν και πρώιμα, οφέλη μέσω υβριδικών προσεγγίσεων. Ταυτόχρονα, η έμφαση που δίνεται στην ανάγκη για ισχυρές κλασικές δεξιότητες (operations research, data engineering, cloud integration) και στην προσεκτική μοντελοποίηση του προβλήματος σε QUBO δείχνει ότι η κβαντική καινοτομία δεν απλοποιεί τα προβλήματα, αλλά προσθέτει ένα επιπλέον στρώμα πολυπλοκότητας στο ήδη σύνθετο οικοσύστημα ψηφιακών τεχνολογιών (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2023). Τέλος, οι ίδιες οι αναφορές της IBM τονίζουν ότι η «πρακτικά σημαντική» ακρίβεια σε μεγάλης κλίμακας logistics μοντέλα απαιτεί μελλοντικούς, error-corrected κβαντικούς υπολογιστές με πολύ μεγαλύτερο αριθμό qubits, γεγονός που στηρίζει την άποψη ότι η παρούσα περίοδος είναι κυρίως φάση προετοιμασίας και οικοδόμησης quantum readiness, παρά φάση πλήρους αξιοποίησης του Quantum Advantage (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2022).

Ερευνητικό ερώτημα	Κύρια ευρήματα	Θεωρητική σύνδεση	Πρακτική επίπτωση
EE1: Τεχνολογικές ιδιαιτερότητες κβαντικών υπολογιστών	Υβριδική κβαντο-κλασική αρχιτεκτονική ως ρεαλιστική στρατηγική NISQ. QUBO formulation για VRP.	NISQ era (Preskill, 2018); Quantum algorithms (Montanaro, 2016)	Η πλήρης κβαντική λύση δεν είναι ακόμη εφικτή, οι επιχειρήσεις πρέπει να υιοθετήσουν υβριδικές προσεγγίσεις
EE2: Παγκόσμιο οικοσύστημα quantum startups	Γεωγραφική συγκέντρωση (ΗΠΑ, Κίνα, ΕΕ). Αυξανόμενη χρηματοδότηση. QCaaS ως κυρίαρχο business model.	Digital entrepreneurship (Nambisan, 2017); Deep tech (Giones & Brem, 2017)	Ευκαιρίες για εξειδικευμένα vertical startups. Ανάγκη ένταξης σε οικοσυστήματα.
EE3: Κβαντικοί υπολογιστές ως μοχλός καινοτομίας	Σταδιακή ενσωμάτωση σε υπάρχοντα workflows (§5.4). Αυτοματοποίηση tacit knowledge (§5.5).	Business model innovation (Teece, 2010); Ψηφιακή καινοτομία (Nambisan et al., 2017)	Η αξία δεν προέρχεται μόνο από αλγοριθμική υπεροχή αλλά από αναδιάρθρωση επιχ. μοντέλων
EE4: Logistics & εφοδιαστική αλυσίδα	VRP: ↓1-3% κόστος (§5.4), ↓57% στόλος (§5.5). Peer-reviewed επιβεβαίωση.	VRP literature (Kumar & Panneerselvam, 2012); Supply chain optimization	Μεθοδολογική τριγωνοποίηση: industry + academic sources ενισχύουν αξιοπιστία
EE5: Ευκαιρίες & κίνδυνοι για startups	Optimization-as-a-Service. Εξάρτηση από hardware vendors. Ανάγκη quantum literacy.	Entrepreneurial ecosystems (Seskir et al., 2022); Value creation (Teece, 2010)	Quantum readiness: clusters, incubators, εθνικές στρατηγικές ως enablers

Πίνακας 12 Σύνοψη ευρημάτων: ερευνητικά ερωτήματα, θεωρητική σύνδεση και πρακτικές επιπτώσεις (Ιδια επεξεργασία)

6.1 Επιπτώσεις για επιχειρηματικά μοντέλα στις μεταφορές και την εφοδιαστική αλυσίδα

Η θεωρία των επιχειρηματικών μοντέλων τονίζει ότι ένα επιχειρηματικό μοντέλο περιγράφει πώς μια επιχείρηση δημιουργεί, παραδίδει και συλλαμβάνει αξία, μέσω συγκεκριμένου συνδυασμού value proposition, αρχιτεκτονικής κόστους-εσόδων και διαμόρφωσης σχέσεων με πελάτες και εταίρους (Teece, 2010). Στον χώρο των μεταφορών και της εφοδιαστικής αλυσίδας, τα ευρήματα των μελετών περίπτωσης δείχνουν μια σαφή μετατόπιση από παραδοσιακά, asset-centric μοντέλα, όπου ο άξονας είναι η πώληση ή η εκμετάλλευση φυσικών μέσων (π.χ. οχημάτων, πλοίων, αποθηκών), προς πιο service-centric και data-driven μοντέλα, στα οποία η ικανότητα βελτιστοποίησης πολύπλοκων δικτύων μετατρέπεται σε βασικό στοιχείο του value proposition. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2021) Η δυνατότητα παροχής «quantum-enhanced» υπηρεσιών βελτιστοποίησης δρομολογίων, διαχείρισης διαταραχών ή σχεδιασμού θαλάσσιων διαδρομών εντάσσεται ακριβώς σε αυτή τη λογική, καθώς επιτρέπει σε μεταφορικές και logistics επιχειρήσεις να προσφέρουν νέες, διαφοροποιημένες υπηρεσίες προς τους πελάτες τους, πέρα από τη βασική χωρητικότητα μεταφοράς ή αποθήκευσης. (IBM Institute for Business Value, 2022)

Από τη σκοπιά του business model design, η εισαγωγή κβαντικής ή υβριδικής κβαντικής βελτιστοποίησης επηρεάζει πολλαπλά δομικά στοιχεία: τα revenue streams (π.χ. νέα SLA-based συμβόλαια που τιμολογούν εγγυημένα επίπεδα χρόνων παράδοσης ή αξιοπιστίας), τα key activities (ενσωμάτωση data-driven βελτιστοποίησης ως λειτουργίας και όχι συμπληρωματικού εργαλείου) και τα key partnerships (συνεργασίες με παρόχους cloud και κβαντικών υπηρεσιών). (Teece, 2010· IBM Institute for Business Value, 2021) Η IBM αναφέρει πως η αξιοποίηση κβαντικού υπολογισμού στα logistics προϋποθέτει εντονότερο data sharing και συντονισμό σε επίπεδο οικοσυστήματος (ανάμεσα σε μεταφορείς, λιμάνια, 3PL παρόχους και ρυθμιστικές αρχές) ώστε τα μοντέλα βελτιστοποίησης να «βλέπουν» το δίκτυο σε συστημικό επίπεδο και όχι αποσπασματικά. (IBM Institute for Business Value, 2022) Αυτό ενισχύει τη σημασία των πλατφορμικών επιχειρηματικών μοντέλων στη μεταφορά, όπου ένας κεντρικός παίκτης (ή ένα consortium) αναλαμβάνει ρόλο orchestrator, παρέχοντας υποδομές δεδομένων και βελτιστοποίησης στις οποίες συνδέονται οι επιμέρους συμμετέχοντες της εφοδιαστικής αλυσίδας. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2023)

Τα ευρήματα των μελετών περίπτωσης φανερώνουν ότι τα νέα επιχειρηματικά μοντέλα που βασίζονται σε κβαντική βελτιστοποίηση είναι, τουλάχιστον στην τρέχουσα φάση, συμπληρωματικά και όχι υποκατάστατα των υφιστάμενων μοντέλων. Η IBM αναφέρει πως η προσδοκώμενη Quantum Advantage στα logistics θα εκδηλωθεί σταδιακά, αρχικά μέσω στοχευμένων proofs-of-concept και υβριδικών workflows που συνδυάζουν κλασικούς και κβαντικούς πόρους, και μόνο σε δεύτερο χρόνο μέσω πλήρως κλιμακώσιμων παραγωγικών λύσεων. (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2022) Οι επιχειρήσεις μεταφορών και logistics καλούνται λοιπόν να σχεδιάσουν «διπλά» επιχειρηματικά μοντέλα: αφενός, να συνεχίσουν να εκμεταλλεύονται αποδοτικά τα παραδοσιακά assets και δρομολόγια τους, αφετέρου, να χτίσουν σταδιακά νέες ικανότητες και ροές εσόδων γύρω από data-driven και κβαντικώς ενισχυμένες υπηρεσίες, χωρίς να διαταράξουν απότομα τις τρέχουσες σχέσεις με πελάτες και εταίρους. (IBM Institute for Business Value, 2023· Teece, 2010) Από πλευράς στρατηγικής, αυτό εναρμονίζεται με την άποψη ότι η επιχειρηματική επιτυχία σε περιόδους τεχνολογικής μετάβασης δεν εξαρτάται μόνο από την πρόσβαση στην τεχνολογία, αλλά και από την ικανότητα διαμόρφωσης και εξέλιξης κατάλληλων επιχειρηματικών μοντέλων που είναι ταυτόχρονα διαφοροποιημένα και δύσκολα να αντιγραφούν από ανταγωνιστές. (Teece, 2010)

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται σκόπιμη μια μεθοδολογική παρατήρηση που αφορά τη φύση των πηγών στις οποίες βασίζεται η ανάλυση των μελετών περίπτωσης. Ένα αισθητό μέρος των δεδομένων και των συμπερασμάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 5 προέρχεται από εκθέσεις του IBM Institute for Business Value, πηγές που, αν και αναλυτικές και τεχνικά τεκμηριωμένες, δεν έχουν υποβληθεί σε τυπική ακαδημαϊκή αξιολόγηση (peer review). Η IBM, ως κορυφαίος πάροχος κβαντικού hardware και cloud υπηρεσιών, έχει σαφές εμπορικό κίνητρο να παρουσιάσει τα πρώιμα αποτελέσματα κβαντικής βελτιστοποίησης με θετικό πρόσημο. Αυτό δεν σημαίνει ότι τα στοιχεία είναι κατ' ανάγκην αναξιόπιστα, αλλά ο αναγνώστης οφείλει να τα αντιμετωπίζει με κριτική στάση. Τα raw data δεν είναι ελεύθερα διαθέσιμα για ανεξάρτητη επαλήθευση, τα αναφερόμενα ποσοστά βελτίωσης (π.χ. μείωση κόστους ή χιλιομέτρων) αφορούν συγκεκριμένες συνθήκες πιλοτικής εφαρμογής, και δεν μπορούμε να γνωρίζουμε αν υπάρχει publication bias, δηλαδή αν αποσιωπούνται πιλοτικά που δεν απέδωσαν τα αναμενόμενα. Για τον λόγο αυτόν, η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει τα ευρήματα των μελετών περίπτωσης ως ενδεικτικά μιας ευρύτερης τάσης και όχι ως αδιάψευστη απόδειξη κβαντικού πλεονεκτήματος. Η διασταύρωση με ανεξάρτητες πηγές (όπως η μελέτη Phillipson, 2024, τα ευρήματα του Quantum Economic Development Consortium, 2025, και η εφαρμογή quantum-inspired τεχνικών της NEC, 2019) βελτώνει την πιστότητα ορισμένων συμπερασμάτων. Ωστόσο, η δεύτερη μελέτη (§5.5, Weinberg et al., 2023) αντισταθμίζει κυρίως αυτόν τον περιορισμό, καθώς πρόκειται για peer-reviewed δημοσίευση στο Scientific Reports (Nature portfolio) με πλήρως δημοσιευμένη μεθοδολογία, βελτιώνοντας τη μεθοδολογική τριγωνποίηση (triangulation) της ανάλυσης. Παρ' όλα αυτά, η ανάγκη για πρόσθετες ανεξάρτητες, peer-reviewed εμπειρικές μελέτες παραμένει κρίσιμη.

6.2 Επιπτώσεις για νεοφυείς επιχειρήσεις και επενδυτές στον χώρο των logistics

Η βιβλιογραφία για την κβαντική καινοτομία δείχνει ότι οι μεγαλύτερες πρώιμες ευκαιρίες δεν θα χρησιμοποιηθούν μόνο από μεγάλες πολυεθνικές, αλλά και από εξειδικευμένες νεοφυείς επιχειρήσεις που «χτίζουν» πάνω στις πλατφόρμες και τα οικοσυστήματα των μεγάλων παρόχων τεχνολογίας (IBM, hyperscalers κ.λπ.) (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2023). Στον χώρο των logistics, τα ευρήματα των μελετών περίπτωσης δείχνουν ότι υπάρχει σαφής δυνατότητα για startups να αναπτύξουν υπηρεσίες «quantum-enhanced optimization-as-a-service», οι οποίες συνδέονται μέσω APIs σε υπάρχοντα TMS/WMS και προσφέρουν βελτιστοποίηση δρομολογίων, διαχείριση διαταραχών ή σχεδιασμό δικτύου χωρίς ο πελάτης να επενδύσει ο ίδιος σε κβαντικό hardware ή εξειδικευμένες ομάδες OR/quantum. (IBM Institute for Business Value, 2022) Η εκμετάλλευση cloud-based κβαντικών πλατφορμών μειώνει το απαιτούμενο αρχικό κεφάλαιο και επιτρέπει asset-light επιχειρηματικά μοντέλα, στα οποία το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα της startup είναι το domain knowledge στα logistics, η ποιότητα των αλγορίθμων και η ευκολία ενσωμάτωσης στις ροές εργασίας των πελατών. (IBM Institute for Business Value, 2021· Teece, 2010)

Για τους επενδυτές, η εικόνα που προκύπτει είναι διττή. Από τη μία πλευρά, μελέτες του IBM Institute for Business Value και σχετικές αναλύσεις αναφέρουν πως οι κλάδοι μεταφορών και logistics συγκαταλέγονται στους τομείς με τη μεγαλύτερη δυνητική ωφέλεια από κβαντική βελτιστοποίηση, καθώς μικρές βελτιώσεις της τάξης του 1–2% σε κόστος ή χρόνους μπορούν να μεταφραστούν σε εκατοντάδες εκατομμύρια ετήσιων εξοικονομήσεων σε παγκόσμια κλίμακα (IBM Institute for Business Value, 2022). Αυτό καθιστά ελκυστικές τις επενδύσεις σε λύσεις που αποδεικνύουν, έστω και σε περιορισμένη κλίμακα, ουσιαστικά οφέλη σε KPIs όπως το συνολικό κόστος διανομής, τα on-time deliveries ή οι εκπομπές CO₂. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value,

2023) Από την άλλη πλευρά, η χρονική αβεβαιότητα γύρω από την πλήρη εμφάνιση του Quantum Advantage, οι περιορισμοί της NISQ εποχής και η εξάρτηση από third-party πλατφόρμες δημιουργούν σημαντικούς τεχνολογικούς και αγοραστικούς κινδύνους, κάτι που οδηγεί πολλούς επενδυτές να προτιμούν startups με υβριδικό προφίλ (quantum-inspired και κλασικές λύσεις) και σαφές πλάνο εσόδων σε μεσοπρόθεσμο ορίζοντα. (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM, 2023)

Τα ευρήματα των μελετών περίπτωσης υποδεικνύουν επίσης ότι οι νεοφυείς επιχειρήσεις που θέλουν να δραστηριοποιηθούν στα quantum logistics πρέπει να τοποθετούνται στρατηγικά μέσα σε οικοσυστήματα: να συμμετέχουν σε δίκτυα όπως το IBM Quantum Network, σε Think Circles και σε συνεργατικά σχήματα με βιομηχανικούς εταίρους, ώστε να έχουν πρόσβαση σε πραγματικά δεδομένα, υποδομές και πελάτες για proofs-of-concept. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2023) Από επενδυτική σκοπιά, αυτό σημαίνει ότι η αξιολόγηση μιας startup δεν πρέπει να αφορά μόνο την τεχνική της ικανότητα, αλλά και το πόσο καλά είναι ενταγμένη σε τέτοια οικοσυστήματα, πόσο σαφές είναι το σχέδιό της για κλιμάκωση από PoCs σε παραγωγικές υλοποιήσεις και κατά πόσο διαθέτει ομάδα με συνδυασμό δεξιοτήτων σε logistics, operations research και κβαντικό/quantum-inspired προγραμματισμό. (IBM Institute for Business Value, 2021· Teece, 2010) Υπό αυτές τις συνθήκες, ο ρόλος των επενδυτών δεν περιορίζεται στην παροχή κεφαλαίου, αλλά επεκτείνεται σε δράσεις «έξυπνου χρήματος» (smart money), όπως η διασύνδεση των startups με μεγάλους παίκτες της εφοδιαστικής αλυσίδας, η υποστήριξη στην πρόσβαση σε cloud-based κβαντικές πλατφόρμες και η συμβολή στη διαμόρφωση βιώσιμων επιχειρηματικών μοντέλων που μπορούν να επιβιώσουν μέχρι την ωρίμανση της τεχνολογίας. (IBM Institute for Business Value, 2023· IBM Institute for Business Value, 2022)

6.3 Ρόλος των εθνικών στρατηγικών & του οικοσυστήματος (π.χ. clusters, incubators).

Οι εθνικές στρατηγικές για τον κβαντικό υπολογισμό και τη ψηφιακή μετάβαση επηρεάζουν άμεσα το πόσο γρήγορα και σε ποια κλίμακα μπορούν να υλοποιηθούν εφαρμογές κβαντικής βελτιστοποίησης στα logistics. Αναφορές του IBM Institute for Business Value τονίζουν ότι η αξιοποίηση κβαντικού υπολογισμού στην εφοδιαστική αλυσίδα δεν είναι μόνο θέμα μεμονωμένων επιχειρήσεων, αλλά και ζήτημα πολιτικών δημόσιων επενδύσεων, ρυθμιστικών πλαισίων και υποδομών δεδομένων που επιτρέπουν τη συνεργασία μεταξύ μεταφορέων, λιμένων, ρυθμιστικών αρχών και τεχνολογικών παρόχων (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2023). Μέσα σε αυτές τις συνθήκες, εθνικές ή περιφερειακές στρατηγικές που στηρίζουν quantum hubs, ερευνητικά κέντρα και πιλοτικά έργα σε τομείς μεταφορών μπορούν να λειτουργήσουν ως καταλύτες για την ανάπτυξη και δοκιμή use cases όπως last-mile δρομολόγηση, διαχείριση διαταραχών και βιώσιμο θαλάσσιο routing. (IBM Institute for Business Value, 2022)

Χώρα	Επένδυση	Εστίαση
Γερμανία	\$5.2B	Universal QC, 100 qubits μέχρι 2026
Ηνωμένο Βασίλειο	\$4.6B	10ετής στρατηγική, αγορά & ταλέντα
Γαλλία	\$2.2B	Ηγετική θέση στον διεθνή QT ανταγωνισμό
Ολλανδία	\$1.0B	Quantum Delta NL, καινοτομία
Ισπανία	\$1.0B	Νέα στρατηγική 2024

Δανία	\$0.6B	QT innovation hub
Φινλανδία	\$27M	Υψηλή εξειδίκευση (RTA)

Πίνακας 13 Ευρωπαϊκές εθνικές επενδύσεις σε κβαντικές τεχνολογίες (McKinsey, 2025; EPO/OECD, 2025 · ίδια επεξεργασία)

Ο ρόλος των οικοσυστημάτων και των clusters είναι κρίσιμος, καθώς η ίδια η IBM τονίζει ότι η μετάβαση προς Quantum Advantage απαιτεί «συλλογική κίνηση» και όχι μεμονωμένες προσπάθειες: δίκτυα όπως το IBM Quantum Network, Think Circles και κλαδικές πρωτοβουλίες για data sharing λειτουργούν ως πλατφόρμες όπου επιχειρήσεις logistics, τεχνολογικοί πάροχοι και ακαδημαϊκοί φορείς μπορούν να πειραματιστούν με κβαντικές εφαρμογές σε ελεγχόμενο περιβάλλον (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2023). Με παρόμοια λογική, clusters και incubators που ειδικεύονται σε supply chain και deep tech βοηθούν νεοφυείς επιχειρήσεις να αποκτήσουν πρόσβαση σε υποδομές (π.χ. cloud-based κβαντικούς υπολογιστές), σε πραγματικά δεδομένα και σε βιομηχανικούς εταίρους, μειώνοντας το ρίσκο και το κόστος των πρώτων proofs-of-concept. (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2023)

Οι εθνικές στρατηγικές επηρεάζουν και τη διάσταση των δεξιοτήτων και της «quantum readiness». Η IBM αναφέρει πως η έλλειψη ειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού αποτελεί εμπόδιο και προτείνει τη δημιουργία διεπιστημονικών προγραμμάτων εκπαίδευσης που συνδυάζουν κβαντικό υπολογισμό, operations research και γνώση εφοδιαστικής αλυσίδας (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2023). Πολιτικές που ενισχύουν πανεπιστημιακά προγράμματα, επαγγελματική κατάρτιση και συνεργασίες βιομηχανίας-ακαδημίας σε αυτούς τους τομείς μπορούν να επιταχύνουν τη δημιουργία ενός οικοσυστήματος ικανού να σχεδιάζει, να υλοποιεί και να αξιολογεί κβαντικές λύσεις στα logistics. (IBM Institute for Business Value, 2023) Έτσι, ο ρόλος του κράτους και των οικοσυστημάτων δεν περιορίζεται στη χρηματοδότηση υποδομών, αλλά επεκτείνεται στη διαμόρφωση ενός πλαισίου συνεργασίας, τυποποίησης και ανάπτυξης δεξιοτήτων που καθορίζει ποιοι παίκτες, και σε ποιες χώρες, θα μπορέσουν να μετατρέψουν πρώτοι την κβαντική τεχνολογία σε διαρκές ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στον χώρο των μεταφορών. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2021)

Κεφάλαιο 7 - Συμπεράσματα, περιορισμοί και μελλοντική έρευνα

Το Κεφάλαιο 7 συγκεντρώνει και συνθέτει τα ευρήματα της εργασίας, απαντώντας ρητά στα ερευνητικά ερωτήματα και δείχνοντας τη συμβολή της τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πρακτικό επίπεδο. Η ανάλυση που προηγήθηκε έδειξε ότι ο κβαντικός και quantum-inspired υπολογισμός στα logistics βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο, πειραματικό στάδιο, αλλά ήδη διαμορφώνει νέες δυνατότητες για τη βελτιστοποίηση σύνθετων προβλημάτων, τη μετάβαση σε data-driven επιχειρηματικά μοντέλα και την εμφάνιση νέων τύπων νεοφυών επιχειρήσεων και οικοσυστημάτων. (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2022)

Στο πλαίσιο αυτό, το κεφάλαιο οργανώνεται σε τέσσερις ενότητες: πρώτον, παρουσιάζονται συνοπτικές αλλά στοχευμένες απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα· δεύτερον, αναλύεται η συμβολή της εργασίας στη θεωρία της ψηφιακής καινοτομίας και των deep tech startups, αλλά και στην πράξη για στελέχη logistics, startups και υπεύθυνους πολιτικής· τρίτον, συζητούνται οι βασικοί περιορισμοί της μελέτης, τόσο ως προς τη φύση των δεδομένων όσο και ως προς το πρώιμο στάδιο της τεχνολογίας· και, τέλος, προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, με έμφαση σε

εμπειρικές, ποιοτικές και συγκριτικές προσεγγίσεις που μπορούν να εμβαθύνουν και να επαληθεύσουν τα συμπεράσματα που προέκυψαν. (IBM Institute for Business Value, 2023· Teece, 2010)

7.1 Συνοπτικές απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα

Ε.Ε.	Κύρια Ευρήματα	Κεφ.	Πηγές
1	Υπέρθεση, διεμπλοκή → εκθετική κλιμάκωση. NISQ: θόρυβος. Υβριδικά μοντέλα ρεαλιστική στρατηγική.	1	Preskill (2018), Montanaro (2016)
2	500+ startups παγκοσμίως. ΗΠΑ ~42% patents. Software/algorithms ~35%. Logistics top-3.	3	Seskir (2022), OECD (2025)
3	Νέα digital artifacts, platforms, infrastructure. QCaaS, platform, consulting μοντέλα.	2, 4	Nambisan (2017), Teece (2010)
4	VRP (NP-hard), last-mile. CVRPTW ~1.200 σημεία → υβριδική λύση: ↓ κόστος 1–3%.	5, 6	IBM IBV (2022), Kumar (2012)
5	Ευκαιρίες: opt-as-a-service, cloud, EU funding. Κίνδυνοι: αβεβαιότητα, brain drain.	4, 6, 7	McKinsey (2025), Teece (2010)

Πίνακας 14 Αντιστοίχιση ερευνητικών ερωτημάτων - κύρια ευρήματα (Ίδια επεξεργασία)

Η ανάλυσή μας έδειξε ότι τα βασικά προβλήματα βελτιστοποίησης στα logistics, όπως οι διάφορες παραλλαγές του Vehicle Routing Problem (VRP), ο σχεδιασμός δικτύου, η διαχείριση διαταραχών και το θαλάσσιο routing, είναι τυπικά NP-hard, με εκθετικά αυξανόμενη πολυπλοκότητα καθώς μεγαλώνει το δίκτυο και ενσωματώνονται ρεαλιστικοί περιορισμοί (χρονικά παράθυρα, στοχαστική ζήτηση, περιβαλλοντικοί στόχοι). Αυτό περιορίζει την ικανότητα των κλασικών προσεγγίσεων, ακόμη και με εξελιγμένες metaheuristics, να βρίσκουν υψηλής ποιότητας λύσεις σε πραγματικό χρόνο σε πολύ μεγάλα δίκτυα, ιδίως όταν απαιτείται συχνή επαναβελτιστοποίηση. (IBM Institute for Business Value, 2022· He et al., 2023· Kumar & Panneerselvam, 2012) Στο πλαίσιο αυτό, υβριδικές κβαντικές και quantum-inspired μέθοδοι εμφανίζονται ως συμπληρωματικό εργαλείο εξερεύνησης του χώρου λύσεων, με δυνατότητα μικρών αλλά ουσιαστικών βελτιώσεων σε κόστος, χρόνο και αξιοπιστία, όταν στοχεύουν σε κατάλληλα υποπροβλήματα (όπως η επιλογή συνδυασμού διαδρομών ή η διαχείριση σεναρίων διαταραχών). (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2021)

Όσον αφορά το πώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν πρακτικά τέτοιες τεχνολογίες, τα ευρήματα των μελετών περίπτωσης υποδεικνύουν ότι η περισσότερο ρεαλιστική διαδρομή στην τρέχουσα NISQ φάση είναι τα υβριδικά κβαντο-κλασικά σχήματα, όπου η κβαντική βελτιστοποίηση ενσωματώνεται ως kernel μέσα σε υπάρχοντα ψηφιακά workflows. Στο παράδειγμα της last-mile διανομής, κλασικές τεχνικές clustering, machine learning και heuristics χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία υποψήφιων διαδρομών, ενώ η κβαντική ή quantum-inspired φάση επικεντρώθηκε στην επιλογή ενός βέλτιου υποσυνόλου μέσω διατύπωσης QUBO και χρήσης εξειδικευμένων solvers, προσφέροντας μετρήσιμες βελτιώσεις σε κόστος και δείκτες ποιότητας υπηρεσίας χωρίς να απαιτείται αντικατάσταση των υφιστάμενων συστημάτων. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2021)

Σε σχέση με το ερώτημα της επιχειρηματικής εφαρμογής, η ανάλυσή μας ανέδειξε ότι η δημιουργία αξίας από κβαντικές και quantum-inspired τεχνολογίες στα logistics εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη δυνατότητα ενσωμάτωσής τους σε βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα και οικοσυστήματα. Μοντέλα τύπου optimization-as-a-service, βασισμένα σε cloud-based κβαντικές πλατφόρμες και συνεργασίες με hyperscalers, προσφέρουν σε startups και καθιερωμένους παίκτες έναν ρεαλιστικό δρόμο εμπορικής χρήσης, ενώ ταυτόχρονα ενισχύουν τη σημασία των clusters, των δικτύων και της «quantum readiness» σε επίπεδο κλάδου και χώρας. (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2023· Teece, 2010)

7.2.1 Συμβολή στη θεωρία (ψηφιακή καινοτομία, deep tech startups)

Σε θεωρητικό επίπεδο, η εργασία συμβάλλει στη συζήτηση για την ψηφιακή καινοτομία δείχνοντας ότι ο κβαντικός και quantum-inspired υπολογισμός στα logistics εξελίσσεται ως σταδιακή, υβριδική τεχνολογική μετάβαση και όχι ως άμεση αντικατάσταση κλασικών συστημάτων (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2022). Η ανάλυση των μελετών περίπτωσης επιβεβαιώνει την εικόνα της «κβαντικής δεκαετίας» ως περιόδου όπου μικρά υπολογιστικά κέρδη μέσω υβριδικών κβαντο-κλασικών workflows μπορούν να έχουν μεγάλη επιχειρησιακή αξία σε NP-hard προβλήματα μεγάλης κλίμακας, όπως η last-mile δρομολόγηση και η διαχείριση διαταραχών (IBM Institute for Business Value, 2022). Ακόμη, φωτίζει τον τρόπο με τον οποίο οι έννοιες του επιχειρηματικού μοντέλου και της στρατηγικής, όπως τις περιγράφει ο Teece, αποκτούν νέο περιεχόμενο σε περιβάλλον deep tech, όπου η αξία δεν προκύπτει μόνο από τον ίδιο τον αλγόριθμο, αλλά από τη δυνατότητα ενσωμάτωσής του σε πολύπλοκα οικοσυστήματα, πλατφόρμες και σχέσεις συνεργασίας (Teece, 2010).

7.2.2 Συμβολή στην πράξη (logistics managers, startups, policy-makers)

Για την πράξη, η εργασία προσφέρει συγκεκριμένες κατευθύνσεις σε τρεις ομάδες. Για τους logistics managers, τα ευρήματά μας δείχνουν ότι η ρεαλιστική αξιοποίηση κβαντικών τεχνικών στην τρέχουσα φάση είναι η σταδιακή ενσωμάτωση κβαντικών ή quantum-inspired kernels σε επιμέρους σημεία των intelligent workflows (π.χ. route-based επιλογή διαδρομών, σενάρια disruption management ή βιώσιμο θαλάσσιο routing), με σαφή KPIs και πειραματικά PoCs, και όχι η αντικατάσταση των υφιστάμενων TMS/WMS. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2023) Για τις startups, διαπιστώνουμε τη σημασία των asset-light, API-based επιχειρηματικών μοντέλων optimization-as-a-service, των συνεργασιών με hyperscalers και quantum networks, και της υιοθέτησης υβριδικών λύσεων που συνδυάζουν κβαντικές τεχνικές με κλασική βελτιστοποίηση και AI. (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2023) Για τους policy-makers, η εργασία σημειώνει ότι οι εθνικές στρατηγικές για τον κβαντικό υπολογισμό στα logistics πρέπει να εστιάζουν όχι μόνο σε hardware, αλλά και σε οικοσυστήματα συνεργασιών, data-sharing, clusters και προγράμματα ανάπτυξης δεξιοτήτων, ώστε να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις για πραγματική Quantum Advantage στον χώρο των μεταφορών και της εφοδιαστικής αλυσίδας. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2023)

7.3 Περιορισμοί της εργασίας

Ένας κύριος περιορισμός της εργασίας είναι η εξάρτηση από δευτερογενή δεδομένα και δημοσιευμένες μελέτες περίπτωσης, όπως οι αναφορές του IBM Institute for Business Value για τα logistics και την «κβαντική δεκαετία». Τα συμπεράσματα για τις επιδόσεις των υβριδικών κβαντο-κλασικών λύσεων (π.χ. βελτιώσεις κόστους, χρόνων, εκπομπών) βασίζονται σε ήδη φιλτραρισμένη και επιμελημένη πληροφόρηση, χωρίς άμεση πρόσβαση σε λεπτομερή raw data ή σε εναλλακτικά, ανεξάρτητα benchmarks. (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value,

2022) Επιπλέον, η χρήση δύο μελετών περίπτωσης, εκ των οποίων η μία (last-mile δρομολόγηση με υβριδική κβαντική βελτιστοποίηση) περιορίζει τη γενικευσιμότητα των ευρημάτων προς άλλους υποκλάδους των logistics, όπου οι δομές κόστους, οι περιορισμοί και τα μοντέλα ζήτησης μπορεί να είναι σημαντικά διαφορετικά. (IBM Institute for Business Value, 2022)

Δεύτερος σημαντικός περιορισμός αφορά το πρώιμο στάδιο ωρίμανσης της ίδιας της τεχνολογίας. Οι περισσότερες διαθέσιμες εφαρμογές βρίσκονται στην NISQ φάση, με μικρό αριθμό θορυβωδών qubits, έντονη ανάγκη για error mitigation και εξάρτηση από ισχυρούς κλασικούς συνυπολογιστές, γεγονός που δυσκολεύει την εξαγωγή συμπερασμάτων για το πώς θα μοιάζει στην πράξη η πλήρης Quantum Advantage σε logistics περιβάλλοντα μεγάλης κλίμακας. (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2023) Πολλές από τις εκτιμήσεις για μελλοντικά οφέλη (π.χ. σε disruption management ή sustainable maritime routing) έχουν χαρακτήρα σεναρίων και όχι εμπειρικά επιβεβαιωμένων αποτελεσμάτων, κάτι που εισάγει αβεβαιότητα στις μακροπρόθεσμες προβολές. (IBM Institute for Business Value, 2022)

Ως τελευταίο σημείο, η εργασία είναι σκόπιμα εστιασμένη σε συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων (routing, disruption management, maritime routing) και σε ορισμένο τύπο παικτών (μεγάλες logistics επιχειρήσεις, deep tech startups, hyperscalers), αφήνοντας λιγότερο διερευνημένα άλλα κρίσιμα ζητήματα, όπως οι κοινωνικές και οργανωσιακές επιπτώσεις της κβαντικής ψηφιοποίησης (π.χ. αλλαγές σε ρόλους εργασίας, δεξιότητες, εργασιακές σχέσεις) ή οι μακροοικονομικές συνέπειες σε επίπεδο κλάδου και ανταγωνισμού. (IBM Institute for Business Value, 2023· Teece, 2010) Αυτοί οι περιορισμοί δεν αναιρούν την αξία των συμπερασμάτων, αλλά υποδεικνύουν ότι αυτά πρέπει να ιδωθούν ως τεκμηριωμένες αλλά προσωρινές θέσεις, οι οποίες χρειάζονται περαιτέρω εμπειρική επαλήθευση και διεύρυνση σε επόμενες έρευνες. (IBM Institute for Business Value, 2021)

7.4 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Πρώτον, μια προφανής κατεύθυνση είναι η διεξαγωγή ποιοτικών εμπειρικών μελετών, ιδίως εις βάθος συνεντεύξεων με founders και στελέχη νεοφυών επιχειρήσεων που δραστηριοποιούνται σε quantum ή quantum-inspired λύσεις για logistics. Τέτοιες μελέτες θα μπορούσαν να φωτίσουν πώς οι επιχειρηματίες αντιλαμβάνονται στην πράξη τον χρονικό ορίζοντα του Quantum Advantage, πώς ισορροπούν μεταξύ καθαρά κβαντικών και κλασικών/quantum-inspired τεχνικών και πώς διαμορφώνουν τα επιχειρηματικά τους μοντέλα σε συνεργασία με hyperscalers και βιομηχανικούς εταίρους. (IBM Institute for Business Value, 2021· IBM Institute for Business Value, 2023) Την ίδια στιγμή, συνεντεύξεις με logistics managers και στελέχη πολιτικής θα μπορούσαν να αποκαλύψουν εμπόδια υιοθέτησης, οργανωσιακές εντάσεις και αντιλήψεις για τον ρόλο των εθνικών στρατηγικών και των clusters στην ανάπτυξη κβαντικών εφαρμογών. (IBM Institute for Business Value, 2022)

Υπάρχει επίσης περιθώριο για συστηματικές συγκριτικές μελέτες μεταξύ χωρών ή περιφερειών, που να εξετάζουν πώς διαφορετικές εθνικές στρατηγικές, επίπεδα «quantum readiness» και δομές οικοσυστημάτων επηρεάζουν τον ρυθμό και τον τρόπο υιοθέτησης κβαντικών τεχνικών στα logistics. Τέτοιες cross-country συγκρίσεις θα μπορούσαν να συνδυάζουν ποσοτικούς δείκτες (επενδύσεις σε R&D, συμμετοχή σε διεθνή quantum networks, αριθμός σχετικών startups) με ποιοτική ανάλυση πολιτικών και θεσμικών πλαισίων, αναδεικνύοντας πρότυπα πολιτικής και βέλτιστες πρακτικές. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2023) Τρίτον, σε τεχνικό επίπεδο, μελλοντική έρευνα μπορεί να εστιάσει στην ανάπτυξη και αξιολόγηση συγκεκριμένων υβριδικών αλγορίθμων για ρεαλιστικά instances VRP, disruption management και maritime routing, με ανοιχτά datasets και reproducible benchmarks, ώστε να καταστεί δυνατή η αντικειμενική σύγκριση κβαντικών, quantum-inspired και καθαρά κλασικών προσεγγίσεων σε όρους ποιότητας λύσης, χρόνου

υπολογισμού και ευρωστίας. (IBM Institute for Business Value, 2022· IBM Institute for Business Value, 2021)

Βιβλιογραφία

Academy of Management (2022) 'Get ready for quantum age: The implications of quantum technologies for business model innovation', *Academy of Management Proceedings*, 2022(1), 13823.

Albash, T. and Lidar, D.A. (2018) 'Adiabatic quantum computation', *Reviews of Modern Physics*, 90(1), 015002.

APCO Worldwide (2025) 'Quantum computing and supply chain resilience', APCO Worldwide Insights.

Applied Quantum (2025) 'Quantum optimization solutions for industry', Applied Quantum Computing.

Arute, F. et al. (2019) 'Quantum supremacy using a programmable superconducting processor', *Nature*, 574(7779), pp. 505–510.

AWS (2025) 'Amazon Braket: Quantum computing service', Amazon Web Services. Available at: <https://aws.amazon.com/braket/> (Accessed: 2025).

Berkeley CMR (2025) 'Quantum computing readiness for enterprise', Berkeley Center for Management Research.

Biamonte, J., Wittek, P., Pancotti, N., Rebentrost, P., Wiebe, N. and Lloyd, S. (2017) 'Quantum machine learning', *Nature*, 549(7671), pp. 195–202.

BQPSim (2026) 'Quantum-inspired optimization for logistics and supply chain', BQPSim Technologies.

Bronson, R. (2025) 'Azure Quantum optimization for traffic and logistics', Microsoft Azure Blog.

Browaeys, A. and Lahaye, T. (2020) 'Many-body physics with individually controlled Rydberg atoms', *Nature Physics*, 16(2), pp. 132–142.

Cambridge Institute for Manufacturing and Quantum Computing and Simulation Hub (2023) *Using quantum technologies to innovate business models*. Cambridge: University of Cambridge.

CloudAngles (2024) 'Quantum computing adoption roadmap for enterprises', CloudAngles Consulting.

Colobridge (2025) 'Value propositions of quantum computing for business', Colobridge Insights.

Credence Research (2025) 'Quantum computing as a service market report 2025', Credence Research Inc.

D-Wave Systems Inc. (2023) 'D-Wave quantum computing applications in logistics', D-Wave Systems.

Deloitte (2025) 'Quantum computing: Enterprise adoption strategies', Deloitte Insights.

DHL (2024) 'Logistics trend radar 2024', DHL Customer Solutions and Innovation.

D-Wave Systems Inc. (2020) 'Optimizing port operations with quantum annealing: Pier 300 case study'. Burnaby, BC: D-Wave Systems Inc.

ECIPE (2025) *Quantum clusters: Ranking the world's deep-tech epicentres* (Occasional Paper No. 15/2025). Brussels: European Centre for International Political Economy.

EPO-OECD (2025) 'Mapping the global quantum ecosystem: Patents, enterprises and investment', European Patent Office and OECD.

European Commission (2023) 'Quantum technologies flagship programme: Progress report', European Commission, Directorate-General for Communications Networks, Content and Technology.

European Commission (2025) 'Quantum Europe strategy 2025: Towards quantum industrial leadership', European Commission.

European Commission (2026) 'EuroQCI: European quantum communication infrastructure', European Commission.

Fichman, R.G., Dos Santos, B.L. and Zheng, Z.E. (2014) 'Digital innovation as a fundamental and powerful concept in the information systems curriculum', *MIS Quarterly*, 38(2), pp. 329–353.

Foundation (2024) *Startups in Greece 2023–2024: Report on the Greek startup ecosystem*. Athens: Foundation.

Georgescu, I.M., Ashhab, S. and Nori, F. (2014) 'Quantum simulation', *Reviews of Modern Physics*, 86(1), pp. 153–185.

Gill, S.S. and Buyya, R. (2024) 'Transforming research with quantum computing', *Journal of Economy and Technology*, 3(2), pp. 45–68.

Giones, F. and Brem, A. (2017) 'Digital technology entrepreneurship: A definition and research agenda', *Technology Innovation Management Review*, 7(5), pp. 44–51.

Glover, F., Kochenberger, G. and Du, Y. (2018) 'A tutorial on formulating and using QUBO models', arXiv preprint arXiv:1811.11538.

GRNET (2024) 'HellasQCI: National quantum communication infrastructure of Greece', GRNET S.A.

GRNET (2025) 'SEEWQCI and TransEuroOGS: Cross-border quantum infrastructure projects', GRNET S.A.

Gruber, M. and Henkel, J. (2006) 'New ventures based on open innovation: An empirical analysis of startup firms in embedded Linux', *International Journal of Technology Management*, 33(4), pp. 356–372.

Guerra, C. (2025) 'Digital entrepreneurship in logistics: Trends and opportunities', *Logistics Innovation Review*.

Hacioglu, U. (2024) 'Entrepreneurship in the digital age: A comprehensive review of digital entrepreneurship and start-up success factors', *International Journal of Scientific Research and Applications*, 8(3), pp. 1–25.

He, P., Li, J. and Wang, X. (2023) 'Heuristics for vehicle routing problem: A survey and recent advances', *International Journal of Production Research*, 61(12), pp. 4032–4056.

HellasQCI (2023) 'Hellenic quantum communication infrastructure: Project overview', HellasQCI Consortium.

HellasQCI (2025) 'HellasQCI: Operational milestones and network deployment', HellasQCI Consortium.

- Hull, C.E., Hung, Y.-T.C., Hair, N., Perotti, V. and DeMartino, R. (2007) 'Taking advantage of digital opportunities: A typology of digital entrepreneurship', *International Journal of Networking and Virtual Organisations*, 4(3), pp. 290–303.
- Hund, A., Wagner, H.-T., Beimborn, D. and Weitzel, T. (2021) 'Digital innovation: Review and novel perspective', *Journal of Strategic Information Systems*, 30(4), 101695.
- IBM (2024) 'IBM Quantum roadmap and enterprise solutions', IBM Corporation.
- IBM (2025) 'IBM Quantum platform: Enterprise quantum computing', IBM Corporation.
- IBM Institute for Business Value (2021) *The quantum decade: A playbook for achieving awareness, readiness, and advantage*. Armonk, NY: IBM Corporation.
- IBM Institute for Business Value (2022) *Exploring quantum computing use cases for logistics*. Armonk, NY: IBM Institute for Business Value.
- IBM Institute for Business Value (2023) 'Quantum computing in practice: Industry applications and enterprise readiness', IBM Corporation.
- ID Quantique (2023) 'Quantum key distribution solutions for enterprise security', ID Quantique SA.
- International Chamber of Shipping (2023) 'Shipping and world trade: Driving prosperity', International Chamber of Shipping.
- Invensis (2025) 'Digital transformation in logistics and supply chain', Invensis Technologies.
- Kadowaki, T. and Nishimori, H. (1998) 'Quantum annealing in the transverse Ising model', *Physical Review E*, 58(5), pp. 5355–5363.
- Kaur, G. and Singh, R. (2023) 'Digital entrepreneurship research: A systematic review', *Journal of Business Research*, 156, pp. 113–129.
- Kollmann, T. (2006) 'What is e-entrepreneurship? Fundamentals of company founding in the net economy', *International Journal of Technology Management*, 33(4), pp. 322–340.
- Kraus, S., Jones, P., Kailer, N., Weinmann, A., Chaparro-Banegas, N. and Roig-Tierno, N. (2021) 'Digital transformation: An overview of the current state of the art of research', *SAGE Open*, 11(3), pp. 1–15.
- Kraus, S., Palmer, C., Kailer, N., Kallinger, F.L. and Spitzer, J. (2020) 'Digital entrepreneurship: A research agenda on new business models for the twenty-first century', *International Journal of Entrepreneurial Behavior and Research*, 25(2), pp. 353–375.
- Kumar, P. and Panneerselvam, R. (2012) 'A survey on the vehicle routing problem and its variants', *Intelligent Information Management*, 4(3), pp. 66–74.
- Kumar, S., Fedorov, A.K. and Laad, M.S. (2023) 'Quantum machine learning for cybersecurity: Opportunities and challenges', *IEEE Access*, 11, pp. 114765–114784.
- Lehmacher, W. (2025) 'Quantum logistics and the future of optimization-as-a-service', *World Economic Forum Insight Report*.
- Lenahan, M. (2023) 'Quantum computing applications in logistics optimization', *Supply Chain Digital*.
- McKinsey & Company (2024) *Steady progress in approaching the quantum advantage. Quantum Technology Monitor, April 2024*. New York: McKinsey & Company.

- McKinsey & Company (2025) *The year of quantum: From concept to reality in 2025*. New York: McKinsey & Company.
- McKinsey and Company (2023) 'Quantum technology monitor: The state of play', McKinsey and Company.
- Microsoft (2021) 'Azure Quantum: Cloud quantum computing and optimization', Microsoft Corporation.
- Milvus (2025) 'Quantum computing market outlook and challenges', Milvus Technology Insights.
- MIT Sloan (2023) 'Strategic approaches to deep tech ventures', MIT Sloan Management Review.
- Montanaro, A. (2016) 'Quantum algorithms: An overview', *npj Quantum Information*, 2, 15023.
- Nambisan, S. (2017) 'Digital entrepreneurship: Toward a digital technology perspective of entrepreneurship', *Entrepreneurship Theory and Practice*, 41(6), pp. 1029–1055.
- Nambisan, S., Lyytinen, K., Majchrzak, A. and Song, M. (2017) 'Digital innovation management: Reinventing innovation management research in a digital world', *MIS Quarterly*, 41(1), pp. 223–238.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2019) *Quantum computing: Progress and prospects*. Washington, DC: The National Academies Press.
- Navistrata Analytics (2025) 'Quantum computing as a service (QCaaS) market analysis', Navistrata Analytics.
- NEC Corporation (2019) 'Optimization of logistics using quantum-inspired computing', *NEC Technical Journal*, 14(1), pp. 1–7.
- Netweek (2025) 'Greece leads in quantum communication infrastructure in Southeast Europe', Netweek.
- Nielsen, M.A. and Chuang, I.L. (2010) *Quantum computation and quantum information*. 10th anniversary edn. Cambridge: Cambridge University Press.
- Noormandipour, M. et al. (2023) 'Quantum annealing-based vehicle routing', *Quantum Information Processing*, 22(5), 187.
- OA Quantum Labs (2025) 'Hybrid quantum-classical solutions for enterprise optimization', OA Quantum Labs.
- OECD (2024) 'Ocean shipping and ports: Trends and challenges', OECD Transport Policy Papers.
- OECD (2025) *Mapping the global quantum ecosystem*. Paris: OECD Publishing.
- Oezratty, O. (2022) *Understanding quantum technologies 2022*. 7th edn. Paris: Self-published.
- Ohzeki, M. et al. (2023) 'Application of quantum annealing to railway rescheduling', *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 26, 100322.
- OpenQASE (2025) 'Open quantum application and software ecosystem', OpenQASE Consortium.
- Pasqal (2025) 'Neutral-atom quantum computing for industrial optimization', Pasqal SAS.
- Petrus-EuroQCI (2025) 'Petrus satellite and EuroQCI infrastructure deployment', European Space Agency.

- Phillipson, F. (2024) 'Quantum computing in logistics and supply chain management: An overview of applications and challenges', *Journal of Supply Chain Analytics*, 5(1), pp. 1–29.
- Post-Quantum (2025) 'Quantum technology use cases in supply chain and logistics'. London: Post-Quantum.
- Preskill, J. (2018) 'Quantum computing in the NISQ era and beyond', *Quantum*, 2, 79.
- Purohit, S., Busch, P. and Mukherjee, T. (2023) 'Quantum computing startups: A landscape analysis', *Technology Innovation Management Review*, 13(4), pp. 45–58.
- QAI (2025) 'Quantum annealing for container terminal optimization'. QAI White Paper.
- QAI Ventures (2023) 'Quantum computing accelerator and investment programmes', QAI Ventures.
- Quandela (2024) 'Photonic quantum computing: State of the art', Quandela SAS.
- Quantum Basel (2025) 'Quantum technology hub Switzerland', Quantum Basel.
- Quantum Business Playbook (2024) 'Strategic planning for quantum ventures', Quantum Business Playbook.
- Quantum Computing Report (2024) 'Applications of quantum computing in port logistics', Quantum Computing Report.
- Quantum Economic Development Consortium (2025) *Quantum computing for transportation and logistics*. Washington, DC: QED-C.
- Quantum Flagship (2025) *Quantum Europe Strategy 2025*. Brussels: European Commission / Quantum Flagship.
- Quantum Innovation (2023) 'Framework for quantum startup strategy', Quantum Innovation Labs.
- QuantumComputer.blog (2025) 'Quantum optimization use cases in supply chain', QuantumComputer.blog.
- QuantumShift (2025) 'Quantum readiness assessment and consulting services', QuantumShift Consulting.
- QubitValue (2025) 'Quantum integration services for enterprise', QubitValue Ltd.
- QuEra Computing Inc. (2026) 'Neutral-atom quantum computers for optimization and simulation', QuEra Computing.
- QURECA (2024) 'Quantum resources and careers: Industry overview 2024', QURECA Ltd.
- ResearchAndMarkets (2025) 'Global quantum computing as a service market forecast 2025–2030', ResearchAndMarkets.
- Route4Me (2024) 'Last-mile delivery optimization: Challenges and solutions', Route4Me Inc.
- SandboxAQ (2025) 'AI and quantum technology for enterprise applications', SandboxAQ.
- SC Quantum Alliance (2025) 'Quantum computing applications in supply chain management', Supply Chain Quantum Alliance.
- ScaleUp Lab (2024) 'Post-quantum cryptography and enterprise security', ScaleUp Lab.

- Schuld, M. and Petruccione, F. (2018) *Supervised learning with quantum computers*. Cham: Springer.
- Seskir, Z.C., Aydinoglu, A.U. and Korkmaz, R. (2024) 'Quantum technology policy and governance: An updated landscape', *Quantum Science and Technology*, 9(2), 023001.
- Seskir, Z.C., Korkmaz, R. and Aydinoglu, A.U. (2022) 'The landscape of the quantum start-up ecosystem', *EPI Quantum Technology*, 9(1), pp. 1–27.
- Shor, P.W. (1994) 'Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring', in *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, pp. 124–134.
- Simpliaxis (2025) 'Quantum computing as a service: Business models and market outlook', *Simpliaxis Insights*.
- Specter Insights (2025) 'Quantum software and platform ecosystem analysis', *Specter Insights*.
- SpinQ (2025) *Quantum computing market trends 2025*. SpinQ Market Brief.
- Spinquanta (2025) *Quantum computing industry trends 2025: A year of breakthrough milestones and commercial transition*. Spinquanta.
- Stollenwerk, T. et al. (2023) 'Quantum annealing applied to air traffic management', *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(3), pp. 2689–2701.
- Streif, M., Neukart, F. and Leib, M. (2023) 'Solving real-world logistics problems with quantum annealing', *Journal of Quantum Computing*, 7(1), pp. 55–78.
- Supply Chain Management Review (2025) 'Quantum logistics unleashed', *Supply Chain Management Review*, 29(4), pp. 30–37.
- Sussan, F. and Acs, Z.J. (2017) 'The digital entrepreneurial ecosystem', *Small Business Economics*, 49(1), pp. 55–73.
- Teece, D.J. (2010) 'Business models, business strategy and innovation', *Long Range Planning*, 43(2–3), pp. 172–194.
- The Business Research Company (2023) 'Quantum computing as a service global market report 2023', The Business Research Company.
- The Quantum Insider (2024) 'Top 10 quantum technology business stories of 2024', *The Quantum Insider*.
- The Quantum Insider (2025) *Quantum computing companies in 2025: 76 major players*. The Quantum Insider.
- ThroughPut Inc. (2025) 'Supply chain and logistics management: AI-driven optimization', *ThroughPut Inc.*
- Traction Technology (2022) 'Quantum computing startups and enterprise partnerships', *Traction Technology Partners*.
- Unisco (2025) 'Port logistics management and optimization', *Unisco Logistics*.
- VersaCloud ERP (2025) *Quantum-powered supply chains: How quantum computing is redefining logistics optimization in 2025*. VersaCloud ERP White Paper.

Vial, G. (2019) 'Understanding digital transformation: A review and a research agenda', *Journal of Strategic Information Systems*, 28(2), pp. 118–144.

VivaTech (2025) 'European deep tech and quantum startups showcase', VivaTech.

Weinberg, S. J., Sanches, F., Ide, T., Kamiya, K. and Correll, R. (2023) 'Supply chain logistics with quantum and classical annealing algorithms', *Scientific Reports*, 13, 4770. doi: 10.1038/s41598-023-31765-8.

Wikipedia (2024) 'Last-mile delivery', Wikipedia, The Free Encyclopedia. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Last_mile_\(transportation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Last_mile_(transportation)) (Accessed: 2024).

WJARR (2025) 'Quantum-cloud hybrid adoption model for enterprise', *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 25(1), pp. 112–125.

World Economic Forum (2025) 'Quantum computing governance: Principles for responsible development', World Economic Forum, Geneva.

World Economic Forum (2026) 'State of quantum computing 2026', World Economic Forum, Geneva.

Xavier Pakkam Isaac, R. (2025) 'Enterprise quantum adoption: A phased approach', *Journal of Emerging Technologies*, 12(1), pp. 34–48.