



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Διπλωματική Εργασία

**«Ψηφιακή διαχείριση έργου υποδομής μέσω BIM 5D: Ανάλυση
χρονοδιαγράμματος, κόστους και προόδου»**

**"Digital Management of Infrastructure Projects Using BIM 5D: Analysis
of Schedule, Cost and Progress"**

Γεώργιος Μητσιούλης

Επιβλέποντες καθηγητές: Παναγιώτης Μαρχαβίλας

Κωνσταντίνος Τσαγκαράκης

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



**«Ψηφιακή διαχείριση έργου υποδομής μέσω BIM 5D: Ανάλυση
χρονοδιαγράμματος, κόστους και προόδου»**

**"Digital Management of Infrastructure Projects Using BIM 5D: Analysis
of Schedule, Cost and Progress"**

Γεώργιος Μητσιούλης

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Παναγιώτης Μαρχαβίλας

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός
Υπολογιστών Δημοκριτείου Πανεπιστημίου
Θράκης (Δ.Π.Θ.)

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Κωνσταντίνος Τσαγκαράκης

Πολιτικός Μηχανικός Δημοκριτείου
Πανεπιστημίου Θράκης (Δ.Π.Θ.)

Πάτρα, Σεπτέμβριος 2026

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της εφαρμογής της μεθοδολογίας BIM 5D στη διαχείριση έργου οδοποιίας. Τα προσδοκώμενα αποτελέσματα από την εκπόνηση της εργασίας είναι να αναδειχθεί η πρακτική αξία του BIM 5D στην παρακολούθηση δημόσιων τεχνικών έργων, να διαπιστωθεί η επίδραση της έγκαιρης ανίχνευσης αποκλίσεων στο τελικό κόστος και να αξιολογηθούν εναλλακτικά σενάρια εκτέλεσης με ποσοτικοποιημένα αποτελέσματα.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση και τη μελέτη περίπτωσης διαπιστώθηκε ότι η ενσωμάτωση Δομής Ανάλυσης Εργασιών (WBS), Χρονοδιαγράμματος «Gantt», Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (CPM) και καμπύλης S σε ενιαίο BIM 5D πλαίσιο επιτρέπει την παρακολούθηση του έργου σε πραγματικό χρόνο, με άμεση ενημέρωση των δεικτών απόδοσης σε κάθε σημείο ελέγχου. Η εφαρμογή στο εξεταζόμενο έργο έδειξε ότι ο κρισιμότερος κίνδυνος — οι βραχοφανείς ζώνες — εντοπίστηκε σημαντικά νωρίτερα από τη συμβατική περιοδική έκθεση, επιτρέποντας έγκαιρη διορθωτική παρέμβαση.

Η ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων ανέδειξε με σαφήνεια ότι η αδράνεια απέναντι στις αποκλίσεις οδηγεί σε σημαντική υπέρβαση κόστους και καθυστέρηση ολοκλήρωσης, ενώ η έγκαιρη διάγνωση μέσω BIM 5D περιορίζει δραστικά τις αποκλίσεις και διατηρεί το έργο εντός χρονοδιαγράμματος. Η οικονομική διαφορά μεταξύ των δύο προσεγγίσεων αποδεικνύει την αξία της μεθοδολογίας.

Παρακάμπτοντας τα εμπόδια όπως η ανεπαρκής τεχνολογική ωριμότητα των ελληνικών δημόσιων φορέων και η απουσία θεσμικού πλαισίου BIM για έργα οδοποιίας, η εφαρμογή ενός ολοκληρωμένου BIM 5D μοντέλου συμβάλει στον ακριβέστερο προγραμματισμό κόστους, στην έγκαιρη ανίχνευση κινδύνων και στη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων καθ' όλη τη διάρκεια κατασκευής. Ως εκ τούτου, η μεθοδολογία αυτή δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική αναβάθμιση, αλλά ουσιαστικό εργαλείο μετασχηματισμού της διαχείρισης δημόσιων τεχνικών έργων στην Ελλάδα.

Λέξεις-κλειδιά: BIM 5D, Earned Value Management (EVM), Οδοποιία, Anadelta Tessera, WBS, Κρίσιμη Διαδρομή (CPM), Planned Value, Ανάλυση Σεναρίων

"Digital Management of Infrastructure Projects Using BIM 5D: Analysis of Schedule, Cost and Progress"

Georgios Mitsioulis

Abstract

The objective of this master's thesis is to study the application of BIM 5D methodology in road construction project management. The expected outcomes of this study are to highlight the practical value of BIM 5D in monitoring public works, to determine the impact of early variance detection on the final budget, and to evaluate alternative execution scenarios with quantified results. The literature review and case study demonstrated that integrating a Work Breakdown Structure (WBS), a Gantt chart, the Critical Path Method (CPM), and an S-curve into a unified BIM 5D framework enables real-time project monitoring, providing instantaneous updates on performance indicators at every control point. Application to the project under consideration revealed that the most critical risk—rocky terrain zones—was identified significantly earlier than it would have been through a conventional periodic report, thereby allowing for timely corrective intervention. The analysis of alternative scenarios clearly demonstrated that inaction regarding variances leads to substantial cost overruns and completion delays, whereas early diagnosis via BIM 5D drastically mitigates discrepancies and keeps the project on schedule. The financial variance between the two approaches proves the inherent value of this methodology. Bypassing barriers such as the inadequate technological maturity of Greek public entities and the absence of a BIM institutional framework for road infrastructure works, the implementation of an integrated BIM 5D model contributes to more accurate cost forecasting, proactive risk detection, and data-driven decision-making throughout the construction lifecycle. Consequently, this methodology represents not merely a technological upgrade, but a fundamental tool for transforming public works management in Greece.

Keywords: BIM 5D, Earned Value Management (EVM), Road Construction, Anadelta Tessera, WBS, Critical Path Method (CPM), Planned Value, Scenario Analysis

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract.....	vi
Περιεχόμενα.....	viii
Κατάλογος πινάκων	xiii
Κατάλογος εικόνων	xv
Εισαγωγή	1
Α. Αντικείμενο και Σκοπός	1
Β. Μεθοδολογία	1
Γ. Δομή εργασίας	2
Δ. Προκλήσεις και Εμπόδια στην Εφαρμογή του BIM.....	3
1. Θεωρητικό πλαίσιο: BIM 5D και διαχείριση τεχνικών έργων οδοποιίας	4
1.1 Εισαγωγή στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων	4
1.1.1 Κύκλος Ζωής Έργου	4
1.2 Building Information Modeling (BIM): Ορισμός και Διαστάσεις	5
1.2.1 Ορισμός και Ιστορική Εξέλιξη	5
1.2.2 Οι Διαστάσεις του BIM.....	5
1.3 BIM 5D: Ολοκληρωμένη Ψηφιακή Διαχείριση Κόστους	7
1.3.1 Ορισμός και Φιλοσοφία	7
1.3.2 Εξαγωγή Ποσοτήτων (Quantity Take-Off)	7
1.3.3 Εφαρμογή BIM 5D σε Έργα Οδοποιίας.....	7
1.4 Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS) και Χρονοδιάγραμμα	8
1.4.1 Work Breakdown Structure (WBS).....	8
1.4.2 Χρονοδιάγραμμα και MS Project.....	9
1.5 Μέθοδος Earned Value Management (EVM)	10
1.5.1 Θεωρητική Βάση	10
1.5.2 Βασικές Παράμετροι Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM)	10

1.5.3 Δείκτες Απόδοσης	11
1.5.4 Εκτίμηση Ολοκλήρωσης	11
1.5.5 Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας EVM σε Έργα Κατασκευής.....	12
1.6 Λογισμικό Anadelta Tessera	12
1.6.1 Γενική Παρουσίαση.....	12
1.6.2 Ροή Εργασίας στο Πλαίσιο BIM 5D	13
1.7 Σύνοψη Θεωρητικού Πλαισίου	13
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	14
2.1 Εισαγωγή στην Ανασκόπηση	14
2.2 BIM 5D – Διεθνής Ερευνητική Κατάσταση	14
2.3 Εφαρμογές BIM σε Έργα Οδοποιίας	16
2.4 Η Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) στην Κατασκευαστική Διαχείριση.....	18
2.5 Ενοποίηση BIM 5D & Μεθόδου της Κερδισμένης Αξίας (EVM) (BIM-based EVM)	19
2.6 Η Υιοθέτηση του BIM στην Ελλάδα.....	20
2.7 Ερευνητικό Κενό και Συμβολή της Εργασίας.....	22
2.8 Σύνοψη Κεφαλαίου	23
3. Περιγραφή του έργου οδοποιίας.....	24
3.1 Εισαγωγή	24
3.2 Γενικά Στοιχεία Έργου.....	24
3.3 Οριζοντιογραφία	26
3.3.1 Γενική Περιγραφή	26
3.3.2 Οριζόντιες Καμπύλες	26
3.4 Μηκοτομή — Κατακόρυφη Χάραξη.....	27
3.4.1 Υψομετρικά Στοιχεία Ερυθράς	27
3.4.2 Πίνακας Κλίσεων Μηκοτομής	27
3.4.3 Κατακόρυφες Καμπύλες.....	29
3.5 Τυπική Διατομή	30

3.5.1 Δομή Οδοστρώματος.....	30
3.5.2 Στοιχεία Πρανών	31
3.6 Τεχνικά Έργα	32
3.7 Σύστημα Σήμανσης και Οδοφωτισμού.....	32
3.8 Σύνοψη Κεφαλαίου	32
4. Ψηφιακό μοντέλο Anadelta.....	34
4.1 Εισαγωγή	34
4.2 Λογισμικό Anadelta Tessera — Επισκόπηση.....	34
4.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	34
4.2.2 Αρχεία Μοντέλου	36
4.3 Ανάλυση Αρχείων DXF — Layers και Περιεχόμενο	36
4.4 Πίνακας Ποσοτήτων Χωματισμών.....	38
4.4.1 Μεθοδολογία Υπολογισμού	38
4.4.2 Αναλυτικός Πίνακας Ποσοτήτων ανά Διατομή	38
4.5 Συνοπτικός Πίνακας Ποσοτήτων — Σύνδεση με Προϋπολογισμό.....	40
4.6 Ισοζύγιο Χωματισμών	42
4.7 BIM 5D Ροή Δεδομένων — Anadelta.....	43
4.8 Σύνοψη Κεφαλαίου	45
5. Αναλυτικός προϋπολογισμός έργου	46
5.1 Εισαγωγή και Στοιχεία Έργου.....	46
5.2 Συνοπτική Κατανομή Κόστους ανά Ομάδα Εργασιών	46
5.3 Οικονομική Σύνθεση Προϋπολογισμού	47
5.4 Ομάδα Α: Χωματουργικά	49
5.4.1 Γενική Ανάλυση	49
5.4.2 Αναλυτικά Άρθρα.....	49
5.5 Ομάδα Β: Τεχνικά Έργα	50
5.5.1 Γενική Ανάλυση	50

5.5.2 Αναλυτικά Άρθρα.....	50
5.6 Ομάδα Γ: Οδοστρωσία.....	52
5.6.1 Γενική Ανάλυση.....	52
5.6.2 Αναλυτικά Άρθρα.....	52
5.7 Ομάδα Δ: Ασφαλτικά	53
5.7.1 Γενική Ανάλυση.....	53
5.7.2 Αναλυτικά Άρθρα.....	53
5.8 Ομάδα Ε: Σήμανση – Ασφάλεια	53
5.8.1 Γενική Ανάλυση.....	53
5.8.2 Αναλυτικά Άρθρα.....	54
5.9 Ομάδα ΣΤ: Οδοφωτισμός & Η/Μ Εγκαταστάσεις.....	56
5.9.1 Γενική Ανάλυση.....	56
5.9.2 Αναλυτικά Άρθρα.....	56
5.10 Σύνδεση Προϋπολογισμού με Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS) και Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM).....	58
5.11 Σύνοψη Κεφαλαίου	59
6. Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS), χρονοδιάγραμμα και κατανομή κόστους.....	60
6.1 Εισαγωγή	60
6.2 Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS)	60
6.2.1 Θεωρητικό Πλαίσιο.....	60
6.2.2 Συνοπτικός Πίνακας Κατανομής Εργασιών (WBS).....	60
6.2.3 Αναλυτικός Πίνακας Κατανομής Εργασιών (WBS)	62
6.3 Χρονοδιάγραμμα (Gantt) — 18 Μήνες	64
6.3.1 Βασικές Αρχές.....	64
6.3.2 Gantt — Μήνες 1–18	64
6.4 Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (CPM).....	65
6.4.1 Θεωρητικό Πλαίσιο.....	65
6.5 Καμπύλη S — Κατανομή Προγραμματισμένης Αξίας (Planned Value).....	67

6.5.1 Θεωρητικό Πλαίσιο	67
6.6 Ορόσημα Έργου (Milestones)	69
6.7 Σύνοψη Κεφαλαίου	69
7. Οικονομική και χρονική ανάλυση	71
7.1 Εισαγωγή	71
7.2 Θεωρητικό Πλαίσιο Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM)	71
7.2.1 Βασικές Παράμετροι & Δείκτες	71
7.3 Εφαρμογή Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) — Πίνακας Σημείων Ελέγχου	72
7.4 Ανάλυση Αποκλίσεων ανά Ομάδα Κατανομής Εργασιών (WBS) — Σημείο Ελέγχου M12	74
7.5 Διορθωτικά Μέτρα	76
7.6 Σύνδεση Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) με BIM 5D	76
7.7 Σύνοψη Κεφαλαίου	76
8. Ανάλυση αποκλίσεων και εναλλακτικά σενάρια	78
8.1 Εισαγωγή	78
8.2 Ορισμός Σεναρίων	78
8.2.1 Σενάριο Α — Βασικό	78
8.2.2 Σενάριο Β — Αισιόδοξο	79
8.2.3 Σενάριο Γ — Δυσμενές	79
8.3 Συγκριτική Ανάλυση Σεναρίων	79
8.4 Μητρώο Κινδύνων (Risk Register)	80
8.5 Τελική Σύγκριση	82
8.6 Σύνοψη Κεφαλαίου	83
9. Συμπεράσματα	84
9.1 Επιστημονική Πρωτοτυπία της Εργασίας	84
9.2 Μελλοντική Εξέλιξη της Έρευνας	86
Βιβλιογραφικές αναφορές	87

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Οι διαστάσεις BIM και εφαρμογές τους στην οδοποιία	6
Πίνακας 2 Διάρκεια εργασιών	9
Πίνακας 3 Βασικές παράμετροι Earned Value Management	11
Πίνακας 4 Γενικά Στοιχεία Έργου Οδοποιίας	25
Πίνακας 5 Κλίσεις Μηκοτομής ανά Τμήμα — 12 τμήματα, 11 κατακόρυφες καμπύλες.....	28
Πίνακας 6 Κατακόρυφες Καμπύλες Μηκοτομής — Κόκκινο: Κυρτές Πράσινο: Κοίλες	29
Πίνακας 7 Δομή Τυπικής Διατομής — Στρώσεις Οδοστρώματος	31
Πίνακας 8 Ανάλυση Layers DXF αρχείων Anadelta — Οριζοντιογραφία, Μηκοτομή, Διατομές	38
Πίνακας 9 Επιλεγμένες Διατομές & Ποσότητες Χωματισμών	40
Πίνακας 10 Συνοπτικός Πίνακας Ποσοτήτων Anadelta — Σύνδεση με Άρθρα Προϋπολογισμού	42
Πίνακας 11 Ισοζύγιο Χωματισμών — Εκσκαφές, Επιχώματα, Δάνεια, Πλέονασμα.....	43
Πίνακας 12 BIM 5D Ροή Δεδομένων — Anadelta → Προϋπολογισμός → MS Project → Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (EVM)	44
Πίνακας 13 Κατανομή κόστους ανά ομάδα εργασιών — Σύνολο δαπάνης εργασιών: 1.141.257,37 €.....	47
Πίνακας 14 Πλήρης οικονομική σύνθεση = 1.491.935,48 € (χωρίς ΦΠΑ)	48
Πίνακας 15 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας Α – Χωματουργικά Σύνολο: 458.594,49 €	50
Πίνακας 16 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας Β – Τεχνικά Έργα Σύνολο: 88.177,60 €.....	51
Πίνακας 17 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας Γ – Οδοστρωσία Σύνολο: 170.411,20 €	52
Πίνακας 18 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας Δ – Ασφαλτικά Σύνολο: 179.708,53 €	53
Πίνακας 19 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας Ε – Σήμανση & Ασφάλεια Σύνολο: 107.244,55 €.....	55
Πίνακας 20 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας ΣΤ – Οδοφωτισμός & Η/Μ Σύνολο: 137.121,00 €...57	
Πίνακας 21 Αντιστοίχιση WBS–Κόστος–Χρονική Φάση BAC = 1.491.935,48 €.....	59
Πίνακας 22 Συνοπτική WBS — 6 Ομάδες Εργασιών BAC = 1.491.935,48 €	61
Πίνακας 23 Αναλυτικός πίνακας εργασιών.....	64

Πίνακας 24 Χρονοδιάγραμμα Gantt	65
Πίνακας 25 Ανάλυση CPM — 15 Δραστηριότητες Κρίσιμη Διαδρομή: $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow J \rightarrow K \rightarrow M \rightarrow O = (72 \text{ εβδομάδες})$	66
Πίνακας 26 Καμπύλη S — Μηνιαία & Αθροιστική Κατανομή δείκτη PV BAC = 1.491.935,48 €.....	68
Πίνακας 27 Ορόσημα Έργου — έξι (6) Ορόσημα Έργου (Milestones) Κόκκινο: Κρίσιμα.....	69
Πίνακας 28 Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) Παρακολούθηση — Μηνιαία Εξέλιξη Δείκτες (PV, EV, AC, SPI, CPI, EAC)	73
Πίνακας 29 Σημείων έργου.....	74
Πίνακας 30 Αποκλίσεις CV ανά Ομάδα @M12 — Κύριες αιτίες & διορθωτικά μέτρα.....	75
Πίνακας 31 Σύγκριση 3 Σεναρίων — δείκτες SPI, CPI, EAC, Διάρκεια, TCPI.....	80
Πίνακας 32 Μητρώο Κινδύνων — $RPN \geq 16$: Κρίσιμος (κόκκινο) 8-15: Υψηλός <8: Μέτριος	81
Πίνακας 33 Τελική Σύγκριση 4 Υπο-σεναρίων — Κόστος, Χρόνος, Ποινές & Αξιολόγηση BIM 5D.....	82

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Οριζοντιογραφία έργου οδοποιίας — Anadelta Tessera (με τοπογραφικό υπόβαθρο TIN και άξονα χάραξης)	26
Εικόνα 2: Μηκοτομή ερυθράς γραμμής — Anadelta Tessera (κλίσεις, κατακόρυφες καμπύλες, υψόμετρα).....	27
Εικόνα 3: Τυπική εγκάρσια διατομή ΑΑ (Χ.Θ. 0+000) — Anadelta Tessera	30
Εικόνα 4: Αρχικό περιβάλλον εργασίας Anadelta Tessera (Έκδοση Demo 3.8.1 Build 2024.03.28)	35
Εικόνα 5: Διαδικασία ανοίγματος αρχείου έργου οδοποιίας (Αρχείο → Άνοιγμα)	35
Εικόνα 6: Τρισδιάστατη απεικόνιση (3D View) του έργου οδοποιίας — Anadelta Tessera ..	36

Εισαγωγή

Α. Αντικείμενο και Σκοπός

Η διαχείριση δημόσιων έργων υποδομής στην Ελλάδα χαρακτηρίζεται ιστορικά από σημαντικές αποκλίσεις κόστους και χρόνου: σύμφωνα με στοιχεία του Ελεγκτικού Συνεδρίου και της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, ποσοστό άνω του 60% των δημόσιων έργων ολοκληρώνεται με υπέρβαση προϋπολογισμού ή καθυστέρηση. Αυτό το φαινόμενο αποδίδεται σε έλλειψη συστηματικής παρακολούθησης, υποκειμενικές εκτιμήσεις προόδου και καθυστερημένη διάγνωση αποκλίσεων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να αποδείξει, μέσω εφαρμογής μελέτης περίπτωσης οδοποιίας, ότι η τεχνολογία BIM 5D, ενοποιώντας ψηφιακό μοντέλο, χρονοδιάγραμμα και κόστος, παρέχει τα εργαλεία για έγκαιρη ταυτοποίηση αποκλίσεων και τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων.

Β. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία της εργασίας βασίζεται σε ποσοτική ανάλυση μελέτης περίπτωσης και οργανώνεται σε τρία επίπεδα: (α) Επίπεδο Γεωμετρίας — ανάλυση DXF αρχείων Anadelta (οριζοντιογραφία, μηκοτομή, διατομές) για εξαγωγή τεχνικών χαρακτηριστικών και ποσοτήτων, (β) Επίπεδο Κόστους & Χρόνου, ανάπτυξη αναλυτικού προϋπολογισμού, Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS 3 επιπέδων), Χρονοδιαγράμματος (Gantt) 18 μηνών και Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (CPM) ανάλυση στο πρόγραμμα MS Project, και (γ) Επίπεδο Παρακολούθησης — εφαρμογή Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) με υπολογισμό δεικτών (PV, EV, AC, SPI, CPI, EAC και TCPI) σε 12 σημεία ελέγχου, και ανάλυση 3 σεναρίων εκτέλεσης.

Γ. Δομή εργασίας

Η εργασία οργανώνεται σε εννέα (9) κεφάλαια:

- Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό πλαίσιο BIM, BIM 5D και Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM)
- Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση
- Κεφάλαιο 3: Περιγραφή του έργου οδοποιίας — γεωμετρικά χαρακτηριστικά, μηκοτομή, τυπική διατομή
- Κεφάλαιο 4: Ψηφιακό μοντέλο Anadelta — layers DXF, πίνακες ποσοτήτων, ισοζύγιο χωματισμών, επαλήθευση
- Κεφάλαιο 5: Αναλυτικός προϋπολογισμός — 6 ομάδες, 25+ άρθρα, οικονομική σύνθεση (BAC = 1.491.935,48 €)
- Κεφάλαιο 6: Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS), Χρονοδιάγραμμα (Gantt) 18 μηνών, Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (CPM) 13 δραστηριοτήτων, καμπύλη S, Ορόσημα (Milestones)
- Κεφάλαιο 7: Οικονομική Ανάλυση - Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) — δείκτες (PV, EV, AC, SPI, CPI, EAC) σε 12 σημεία ελέγχου, αποκλίσεις ανά ομάδα Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (WBS)
- Κεφάλαιο 8: Ανάλυση αποκλίσεων τριών (3) σεναρίων, ποινικές ρήτρες, μητρώο κινδύνων
- Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα — σύγκριση BIM 5D vs παραδοσιακής, προτάσεις εφαρμογής, μελλοντική έρευνα

Η υιοθέτηση της μεθοδολογίας BIM στη διαχείριση τεχνικών έργων αποφέρει σημαντικά οφέλη σε όλες τις φάσεις του κύκλου ζωής ενός έργου. Στη φάση του σχεδιασμού, η τρισδιάστατη ψηφιακή αναπαράσταση επιτρέπει τον έγκαιρο εντοπισμό συγκρούσεων και ασυνεπειών μεταξύ των επιμέρους μελετών, μειώνοντας δραστικά τις αλλαγές κατά την κατασκευή. Στη φάση εκτέλεσης, η αυτόματη εξαγωγή ποσοτήτων και η άμεση σύνδεση με τον προϋπολογισμό και το χρονοδιάγραμμα εξαλείφουν τα σφάλματα της χειροκίνητης κοστολόγησης και επιτρέπουν την παρακολούθηση της προόδου σε πραγματικό χρόνο.

Παράλληλα, η ενσωμάτωση εργαλείων διαχείρισης κινδύνων και ανάλυσης σεναρίων δίνει τη δυνατότητα έγκαιρης διορθωτικής παρέμβασης, αποτρέποντας την κλιμάκωση των αποκλίσεων σε υπερβάσεις κόστους ή καθυστερήσεις παράδοσης. Τέλος, στη φάση λειτουργίας και συντήρησης, το ψηφιακό μοντέλο αποτελεί ένα ζωντανό αρχείο πληροφοριών που υποστηρίζει αποφάσεις συντήρησης και αναβάθμισης καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Συνολικά, το BIM δεν βελτιώνει απλώς την αποδοτικότητα των επιμέρους διαδικασιών, αλλά μετασχηματίζει τον τρόπο συνεργασίας όλων των εμπλεκόμενων μερών, δημιουργώντας ένα κοινό περιβάλλον πληροφορίας που ενισχύει τη διαφάνεια, τη λογοδοσία και την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος.

Δ. Προκλήσεις και Εμπόδια στην Εφαρμογή του BIM

Παρά τα σημαντικά οφέλη που προσφέρει, η υιοθέτηση της μεθοδολογίας BIM αντιμετωπίζει στην πράξη μια σειρά από προκλήσεις που επιβραδύνουν την ευρεία εφαρμογή της, ιδιαίτερα στο πλαίσιο των ελληνικών δημόσιων έργων.

Το πρώτο και σημαντικότερο εμπόδιο είναι το υψηλό κόστος εισαγωγής: η απόκτηση εξειδικευμένου λογισμικού, η εκπαίδευση του προσωπικού και η αναδιοργάνωση των εσωτερικών διαδικασιών απαιτούν σημαντικές αρχικές επενδύσεις, οι οποίες αποτρέπουν πολλές μικρομεσαίες εταιρείες και δημόσιους φορείς από την υιοθέτησή του. Παράλληλα, η έλλειψη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα, καθώς η αποτελεσματική εφαρμογή BIM προϋποθέτει μηχανικούς με γνώσεις που υπερβαίνουν την παραδοσιακή κατάρτιση.

Σε τεχνικό επίπεδο, τα ζητήματα διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών λογισμικών αποτελούν έναν από τους πιο διαδεδομένους λόγους αποτυχίας: η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ εργαλείων σχεδιασμού, κοστολόγησης και χρονοπρογραμματισμού δεν είναι πάντα απρόσκοπτη, με αποτέλεσμα απώλειες πληροφορίας και επικαλύψεις εργασίας.

1. Θεωρητικό πλαίσιο: BIM 5D και διαχείριση τεχνικών έργων οδοποιίας

1.1 Εισαγωγή στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Η διαχείριση τεχνικών έργων (Project Management) αποτελεί επιστημονικό κλάδο που συνδυάζει αρχές μηχανικής, οικονομίας και οργάνωσης με σκοπό την επιτυχή υλοποίηση έργων εντός συγκεκριμένων περιορισμών χρόνου, κόστους και ποιότητας. Κατά τον Project Management Institute (PMI, 2021), η διαχείριση έργων ορίζεται ως «η εφαρμογή γνώσεων, δεξιοτήτων, εργαλείων και τεχνικών σε δραστηριότητες έργου για την εκπλήρωση των απαιτήσεών του».

Στον τομέα του πολιτικού μηχανικού και ιδιαίτερα στα έργα υποδομής, η διαχείριση έργων αποκτά ιδιαίτερη σημασία λόγω της πολυπλοκότητας, του υψηλού κόστους και της μακράς διάρκειας υλοποίησης. Τα έργα οδοποιίας, ως χαρακτηριστική κατηγορία έργων υποδομής, απαιτούν συστηματική παρακολούθηση χρονοδιαγράμματος, ελέγχου κόστους και αξιολόγησης προόδου.

Το «τρίγωνο της διαχείρισης έργων» (Iron Triangle) αποτυπώνει τους τρεις βασικούς άξονες: χρόνος, κόστος και ποιότητα. Κάθε απόκλιση σε έναν από τους τρεις άξονες επηρεάζει αναπόφευκτα τους υπόλοιπους. Η ψηφιακή εποχή εισήγαγε νέα εργαλεία που επιτρέπουν την ολοκληρωμένη παρακολούθηση και των τριών παραμέτρων ταυτόχρονα, με κορυφαίο παράδειγμα την τεχνολογία BIM.

1.1.1 Κύκλος Ζωής Έργου

Ο κύκλος ζωής ενός τεχνικού έργου οδοποιίας περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια: (α) τη Μελέτη – Σχεδιασμό, που αφορά την ανάλυση τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων, (β) την Κατασκευή, που περιλαμβάνει εκτέλεση χωματισμών, τεχνικών έργων και ασφαλτοστρώσεων, (γ) την Παραλαβή – Έλεγχο Ποιότητας, και (δ) τη Λειτουργία και Συντήρηση. Η ψηφιακή διαχείριση μέσω BIM παρέχει εργαλεία για κάθε φάση του κύκλου ζωής.

1.2 Building Information Modeling (BIM): Ορισμός και Διαστάσεις

1.2.1 Ορισμός και Ιστορική Εξέλιξη

Το Building Information Modeling (BIM) ορίζεται ως μια ψηφιακή διαδικασία αναπαράστασης φυσικών και λειτουργικών χαρακτηριστικών ενός έργου, η οποία αποτελεί κοινή βάση γνώσης για αποφάσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του (Eastman et al., 2011). Σε αντίθεση με τη συμβατική τρισδιάστατη μοντελοποίηση, το BIM ενσωματώνει πληροφορίες που υπερβαίνουν τη γεωμετρία: υλικά, κόστος, χρονοδιαγράμματα, ιδιότητες δομικών στοιχείων και δεδομένα λειτουργίας.

Η εξέλιξη του BIM ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970 με τα πρώτα παραμετρικά συστήματα CAD, ωστόσο η εκρηκτική του ανάπτυξη τοποθετείται μετά το 2000, με την ευρεία υιοθέτηση λογισμικών όπως το Autodesk Revit και το Bentley AECOsim. Σήμερα, το BIM αποτελεί υποχρεωτική απαίτηση για δημόσια έργα σε πολλές χώρες (Ηνωμένο Βασίλειο από το 2016, Σκανδιναβικές χώρες, Σιγκαπούρη), ενώ στην Κίνα από τον Ιούνιο του 2024 είναι υποχρεωτικό για νέα εθνικά οδικά έργα (Sci Rep., 2024).

1.2.2 Οι Διαστάσεις του BIM

Η τεχνολογία BIM οργανώνεται σε διαστάσεις, καθεμία από τις οποίες προσθέτει ένα επίπεδο πληροφορίας στο βασικό τρισδιάστατο μοντέλο:

Διάσταση	Ονομασία	Περιγραφή	Εφαρμογή στην Οδοποιία
3D	Τρισδιάστατο Μοντέλο	Ψηφιακή αναπαράσταση του έργου στον τρισδιάστατο χώρο, με γεωμετρία, σχήμα και χωρική τοποθέτηση των στοιχείων.	Μοντελοποίηση οδοστρώματος, τεχνικών έργων (γεφυρών, τοιχίων), κόμβων και ισόπεδων διασταυρώσεων.
4D	Χρόνος — Χρονοπρογραμματισμός	Ενσωμάτωση του παράγοντα χρόνου στο 3D μοντέλο. Σύνδεση των στοιχείων με το χρονοδιάγραμμα κατασκευής (π.χ. Gantt, CPM).	Προσομοίωση σταδίων κατασκευής οδικού άξονα, έλεγχος αλληλουχίας εργασιών, εντοπισμός συγκρούσεων στο χρονοπρόγραμμα.

Διάσταση	Ονομασία	Περιγραφή	Εφαρμογή στην Οδοποιία
5D	Κόστος — Εκτίμηση & Έλεγχος	Ενσωμάτωση κοστολόγησης στο μοντέλο. Κάθε στοιχείο φέρει πληροφορία κόστους, επιτρέποντας αυτόματη εκτίμηση προϋπολογισμού.	Αυτόματη εξαγωγή ποσοτήτων εκσκαφών, ασφαλικών στρώσεων, σκυροδέματος. Παρακολούθηση κόστους κατά φάση κατασκευής.
6D	Βιωσιμότητα — Ενεργειακή Ανάλυση	Ανάλυση περιβαλλοντικών επιπτώσεων, κατανάλωσης ενέργειας και αειφορίας κατά τον κύκλο ζωής του έργου.	Αξιολόγηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων χάραξης, εκτίμηση αποτυπώματος CO ₂ από εκσκαφές και μεταφορές υλικών.
7D	Διαχείριση Λειτουργίας & Συντήρησης	Ενσωμάτωση δεδομένων λειτουργίας και συντήρησης. Το μοντέλο χρησιμοποιείται ως «ψηφιακό διδύμο» καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου.	Παρακολούθηση κατάστασης οδοστρώματος, χρονοδιαγράμματα συντήρησης, διαχείριση τεχνικών έργων και σηματοδότησης.
8D	Ασφάλεια και Υγεία	Ενσωμάτωση δεδομένων ασφαλείας εργοταξίου. Εντοπισμός επικίνδυνων ζωνών, πρόβλεψη κινδύνων και σχεδιασμός μέτρων προστασίας.	Σχεδιασμός ασφαλούς εργοταξίου οδοποιίας, ανάλυση κινδύνων σε εργασίες πρανών, εκσκαφών και εναέριων δικτύων.
9D	Lean Construction — Βελτιστοποίηση	Εφαρμογή αρχών Lean στην κατασκευή μέσω BIM. Εξάλειψη σπατάλης, βελτιστοποίηση ροής εργασιών και αποθεμάτων.	Βελτιστοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας αδρανών υλικών, ασφαλικών μιγμάτων και μηχανημάτων οδοποιίας.

Πίνακας 1 Οι διαστάσεις BIM και εφαρμογές τους στην οδοποιία

Η παρούσα διπλωματική εργασία εστιάζει στις διαστάσεις 3D, 4D και 5D, οι οποίες αποτελούν τον πυρήνα της ψηφιακής διαχείρισης έργου οδοποιίας — από τη μοντελοποίηση έως τον οικονομικό έλεγχο.

1.3 BIM 5D: Ολοκληρωμένη Ψηφιακή Διαχείριση Κόστους

1.3.1 Ορισμός και Φιλοσοφία

Το BIM 5D αναφέρεται στην ενσωμάτωση δεδομένων κόστους σε τρισδιάστατο μοντέλο και χρονοδιάγραμμα, επιτρέποντας στους μηχανικούς να εκτιμούν με ακρίβεια τις δαπάνες του έργου μέσω εξαγωγής ποσοτήτων σε πραγματικό χρόνο και δυναμικής κοστολόγησης (Pishdad & Onungwa, 2024). Η φιλοσοφία του BIM 5D βασίζεται σε μια διαδοχική και αλληλένδετη ροή πληροφορίας:

3D Μοντέλο → Εξαγωγή Ποσοτήτων → Κοστολόγηση → Χρονοδιάγραμμα → Ανάλυση Προόδου

Η ροή αυτή εξασφαλίζει ότι κάθε αλλαγή στο σχέδιο αντανακλάται άμεσα στον προϋπολογισμό και το χρονοδιάγραμμα, ελαχιστοποιώντας τα σφάλματα και επιταχύνοντας τη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Smith, 2014).

1.3.2 Εξαγωγή Ποσοτήτων (Quantity Take-Off)

Η αυτοματοποιημένη εξαγωγή ποσοτήτων από το ψηφιακό μοντέλο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του BIM 5D. Σύμφωνα με τη συστηματική ανασκόπηση των Castañeda et al. (2024), η εξαγωγή ποσοτήτων και η εκτίμηση κόστους (Quantity Take-Off & Cost Estimation) κατατάσσεται ως η πιο σημαντική εφαρμογή BIM σε έργα οδικής υποδομής, λαμβάνοντας τη μεγαλύτερη βαθμολογία Σχετικής Επιρροής (RII) από ειδικούς του κλάδου.

Στο πλαίσιο έργων οδοποιίας, η εξαγωγή ποσοτήτων αφορά κυρίως: (α) χωματισμούς (ορύγματα, επιχώματα), (β) τεχνικά έργα (τοίχοι αντιστήριξης, γέφυρες, οχετοί), (γ) οδοστρωσία (θεμελιώδη, βάση, υπόβαση), και (δ) ασφαλικές στρώσεις (ασφαλτόμιγμα). Τα δεδομένα αυτά εξάγονται από το τρισδιάστατο μοντέλο Anadelta και αποτελούν τη βάση για τον αναλυτικό προϋπολογισμό.

1.3.3 Εφαρμογή BIM 5D σε Έργα Οδοποιίας

Η εφαρμογή BIM στα έργα οδοποιίας παρουσιάζει ιδιαιτερότητες σε σχέση με τα κτιριακά έργα, καθώς τα γραμμικά έργα υποδομής έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά γεωμετρίας,

τοπογραφίας και κατασκευαστικής ακολουθίας. Σύμφωνα με έρευνα στο Scientific Reports (2024) που εξέτασε το οδικό έργο Yuanchen στην Κίνα, η εφαρμογή BIM σε οδικά έργα παρέχει σημαντικά οφέλη στον έλεγχο ποσοτήτων και τη χρονική προσομοίωση, ενώ η επίτευξη πλήρους μοντέλου 5D παραμένει πρόκληση που απαιτεί στενή ολοκλήρωση ψηφιακών εργαλείων.

Συγκεκριμένα για τα έργα οδοποιίας, η έρευνα των Castañeda et al. (2024) αναγνωρίζει 39 εφαρμογές BIM καταγεγραμμένες σε φάσεις σχεδιασμού, κατασκευής και λειτουργίας. Οι πιο επικρατούσες εφαρμογές στη φάση κατασκευής περιλαμβάνουν: εξαγωγή ποσοτήτων και εκτίμηση κόστους, προγραμματισμό εξοπλισμού και υλικών, 4D προγραμματισμό κατασκευής, και 5D ανάλυση κόστους.

1.4 Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS) και Χρονοδιάγραμμα

1.4.1 Work Breakdown Structure (WBS)

Η Δομή Κατανομής Εργασιών (Work Breakdown Structure – WBS) αποτελεί ιεραρχική αποσύνθεση του συνολικού αντικειμένου του έργου σε μικρότερα, διαχειρίσιμα στοιχεία (PMI, 2021). Σε έργα οδοποιίας, η Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS) οργανώνεται τυπικά ως εξής:

Επίπεδο 1 – Συνολικό έργο οδοποιίας

Επίπεδο 2 – Κατηγορίες εργασιών (Χωματισμοί, Τεχνικά Έργα, Οδοστρωσία, Ασφαλτικά, Η/Μ)

Επίπεδο 3 – Επιμέρους εργασίες (π.χ. εκσκαφή ορύγματος, μεταφορά, επίχωμα)

Επίπεδο 4 – Δραστηριότητες και πακέτα εργασίας

Η ανάπτυξη Δομής Κατανομής Εργασιών (WBS) είναι κρίσιμη για τη σύνδεση φυσικού αντικειμένου και οικονομικής ανάλυσης, καθώς κάθε στοιχείο της Δομής Κατανομής Εργασιών (WBS) αντιστοιχίζεται με κόστος, διάρκεια και πόρους (Pishdad & Onungwa, 2024).

1.4.2 Χρονοδιάγραμμα και MS Project

Το Microsoft Project αποτελεί ένα από τα ευρύτερα διαδεδομένα λογισμικά διαχείρισης έργων παγκοσμίως, παρέχοντας εργαλεία για: (α) ανάπτυξη χρονοδιαγράμματος (Gantt), (β) ορισμό εξαρτήσεων δραστηριοτήτων (Finish-to-Start, Start-to-Start κ.α.), (γ) κατανομή πόρων (ανθρώπινοι, μηχανολογικοί, υλικά), και (δ) παρακολούθηση προόδου έναντι βασικής γραμμής (Baseline).

ID	Δραστηριότητα	Διάρκ.(εβδ.)	ES	EF	LS	LF	Float	Κρίσιμη;	Εξαρτ.
A	Χωματουργικά	12	0	12	0	12	0	ΝΑΙ	—
B	Εκσκ. Τεχν. Έργων	6	0	6	0	6	0	ΝΑΙ	A
C	Σκυρόδεμα C12/15	8	4	12	4	12	0	ΝΑΙ	B
D	Κιβωτιοειδείς Οχετοί	8	8	16	8	16	0	ΝΑΙ	C
E	Χάλυβας B500C	6	8	14	10	16	2	ΟΧΙ	C
F	Υποδομή Η/Μ	8	8	16	8	16	0	ΝΑΙ	B
G	Οδοστρωσία	8	24	32	24	32	0	ΝΑΙ	A,D
H	Ασφαλτικά	8	32	40	32	40	0	ΝΑΙ	G
I	Σήμανση— Ασφάλεια	6	40	46	40	46	0	ΝΑΙ	H
J	Ιστοί LED & Πίλλαρ	6	36	42	38	44	2	ΟΧΙ	F,H
K	Φωτιστικά & Καλώδια	4	42	46	42	46	0	ΝΑΙ	J
L	Παραλαβή	8	46	54	46	54	0	ΝΑΙ	I,K
M	Αποπεράτωση	18	54	72	54	72	0	ΝΑΙ	L

Πίνακας 2 Διάρκεια εργασιών

Η μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (Critical Path Method – CPM), που ενσωματώνεται στο MS Project, ταυτοποιεί την ακολουθία δραστηριοτήτων που καθορίζει τη συνολική διάρκεια του έργου. Κάθε καθυστέρηση σε δραστηριότητα της κρίσιμης διαδρομής οδηγεί σε ισόχρονη καθυστέρηση ολόκληρου του έργου.

1.5 Μέθοδος Earned Value Management (EVM)

1.5.1 Θεωρητική Βάση

Η Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (Earned Value Management – EVM) αποτελεί ολοκληρωμένη τεχνική διαχείρισης έργων που συνδυάζει μέτρηση του αντικειμένου, του χρονοδιαγράμματος και του κόστους για την αξιολόγηση της απόδοσης και την πρόβλεψη μελλοντικής εξέλιξης (PMI, 2021). Σύμφωνα με το Project Management Institute (PMI), η Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) μετατρέπει τα επιτεύγματα του έργου από φυσικές μονάδες μέτρησης (π.χ. χλμ. οδοστρωμένης οδού) σε οικονομικές αξίες (Warburton & Kanabar, 2008).

Ιστορικά, η Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) αναπτύχθηκε από το Υπουργείο Άμυνας των ΗΠΑ κατά τη δεκαετία του 1960 για τον έλεγχο αμυντικών προγραμμάτων. Σήμερα αποτελεί διεθνώς αναγνωρισμένη μεθοδολογία, ενσωματωμένη στο PMBOK Guide (7η έκδοση, 2021) και εφαρμόζεται ευρέως στα δημόσια έργα υποδομής.

1.5.2 Βασικές Παράμετροι Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM)

Η Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) ορίζει τρεις θεμελιώδεις παραμέτρους:

Παράμετρος	Συμβολισμός	Ορισμός	Ερώτημα που απαντά
(Planned Value)	PV (BCWS)	Προγραμματισμένο κόστος εργασιών έως τη δεδομένη ημερομηνία	Πόσο έπρεπε να έχει δαπανηθεί;
(Earned Value)	EV (BCWP)	Προγραμματισμένο κόστος εργασιών που εκτελέστηκαν	Πόση αξία έχει παραχθεί;

(Actual Cost)	AC (ACWP)	Πραγματικό κόστος εργασιών που εκτελέστηκαν	Πόσο δαπανήθηκε στην πράξη;
---------------	-----------	---	-----------------------------

Πίνακας 3 Βασικές παράμετροι *Earned Value Management*

1.5.3 Δείκτες Απόδοσης

Από τις τρεις βασικές παραμέτρους προκύπτουν οι δείκτες απόδοσης:

Δείκτης Χρονικής Απόδοσης (Schedule Performance Index – SPI):

$$SPI = EV / PV$$

Εάν $SPI > 1$: το έργο προπορεύεται του χρονοδιαγράμματος. Εάν $SPI = 1$: πλήρης εφαρμογή του χρονοδιαγράμματος. Εάν $SPI < 1$: το έργο καθυστερεί.

Δείκτης Οικονομικής Απόδοσης (Cost Performance Index – CPI):

$$CPI = EV / AC$$

Εάν $CPI > 1$: το έργο εκτελείται εντός προϋπολογισμού. Εάν $CPI = 1$: ακριβής τήρηση προϋπολογισμού. Εάν $CPI < 1$: υπέρβαση κόστους.

Αποκλίσεις (Variances):

- Χρονική απόκλιση: $SV = EV - PV$ (αρνητική τιμή = καθυστέρηση)
- Οικονομική απόκλιση: $CV = EV - AC$ (αρνητική τιμή = υπέρβαση κόστους)

1.5.4 Εκτίμηση Ολοκλήρωσης

Η Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) παρέχει επίσης εργαλεία πρόβλεψης για το συνολικό κόστος και χρόνο ολοκλήρωσης:

- Εκτιμώμενο Κόστος Ολοκλήρωσης (EAC): $EAC = BAC / CPI$ — όπου BAC (Budget at Completion) είναι ο αρχικός προϋπολογισμός

- Εκτιμώμενο Κόστος Εναπομένουσας Εργασίας (ETC): $ETC = EAC - AC$
- Δείκτης Αναγκαίας Απόδοσης (TCPI): $TCPI = (BAC - EV) / (BAC - AC)$

Οι δείκτες αυτοί επιτρέπουν στον διαχειριστή έργου να αξιολογεί έγκαιρα την κατάσταση του έργου και να λαμβάνει διορθωτικά μέτρα πριν από τη δημιουργία μεγάλων αποκλίσεων (PMC, 2024).

1.5.5 Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας EVM σε Έργα Κατασκευής

Η Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στα έργα κατασκευής, καθώς η κατασκευαστική βιομηχανία ήταν από τους πρώτους εμπορικούς υιοθετητές της μεθόδου. Προκειμένου να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε κατασκευαστικά έργα, τα κόστη πρέπει να πληρούν συγκεκριμένα κριτήρια: να είναι επαληθεύσιμα, αντικειμενικά, επίκαιρα και αναλυτικά (Fleming & Koppelman, 2000). Η ενσωμάτωση Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) με το BIM 5D δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα ψηφιακής παρακολούθησης, όπου τα δεδομένα κόστους ενημερώνονται αυτόματα από το ψηφιακό μοντέλο.

1.6 Λογισμικό Anadelta Tessera

1.6.1 Γενική Παρουσίαση

Το Anadelta Tessera είναι ελληνικό λογισμικό οδοποιίας που έχει αναπτυχθεί ειδικά για τον σχεδιασμό και τη μοντελοποίηση γραμμικών έργων υποδομής. Αποτελεί ένα από τα πλέον διαδεδομένα εργαλεία στην ελληνική αγορά μηχανικών και χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες και κατασκευές έργων οδοποιίας.

Το λογισμικό παρέχει ολοκληρωμένο περιβάλλον για: (α) τοπογραφική επεξεργασία και δημιουργία ψηφιακού μοντέλου εδάφους (ΨΜΕ), (β) οριζοντιογραφική και μηκοτομική χάραξη, (γ) σχεδιασμό εγκάρσιων τομών, (δ) αυτόματη δημιουργία τρισδιάστατου μοντέλου οδού, και (ε) αυτοματοποιημένη εξαγωγή πινάκων ποσοτήτων (χωματισμοί, οδοστρώση).

1.6.2 Ροή Εργασίας στο Πλαίσιο BIM 5D

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το Anadelta χρησιμοποιείται ως εργαλείο BIM 3D, δηλαδή για τη δημιουργία του τρισδιάστατου ψηφιακού μοντέλου της οδού και την εξαγωγή ποσοτήτων. Τα δεδομένα ποσοτήτων που εξάγονται (σε μορφή πινάκων) αποτελούν τη βάση για τον αναλυτικό προϋπολογισμό και στη συνέχεια εισάγονται στο MS Project για τη σύνδεση με το χρονοδιάγραμμα, ολοκληρώνοντας την BIM 5D αλυσίδα.

1.7 Σύνοψη Θεωρητικού Πλαισίου

Το θεωρητικό πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας βασίζεται στη σύνθεση τριών επιστημονικών πεδίων: (α) της ψηφιακής μοντελοποίησης έργων (BIM), (β) της χρονικής και οικονομικής ανάλυσης (MS Project, WBS, CPM), και (γ) της μέτρησης απόδοσης έργου (Earned Value Management). Η ενοποίησή τους στο πλαίσιο BIM 5D δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα ψηφιακής διαχείρισης που επιτρέπει τη συστηματική παρακολούθηση, τον έλεγχο και την πρόβλεψη της εξέλιξης έργων οδοποιίας.

Στα επόμενα κεφάλαια θα εφαρμοστεί αυτό το θεωρητικό πλαίσιο σε πραγματικό έργο οδοποιίας, με στόχο να αναδειχθεί η πρακτική αξία της ψηφιακής διαχείρισης μέσω BIM 5D στη βελτίωση της αποτελεσματικότητας κατασκευαστικών έργων.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή στην Ανασκόπηση

Η παρούσα επιστημονική ανασκόπηση (scientific review) έχει ως αντικείμενο την κριτική αποτίμηση της διεθνούς και εγχώριας βιβλιογραφίας αναφορικά με την ενσωμάτωση των τεχνολογιών Building Information Modeling (BIM) στην πέμπτη τους διάσταση (5D) και της μεθοδολογίας κερδισμένης αξίας (Earned Value Management - EVM). Σκοπός του κεφαλαίου είναι η ανάδειξη των σύγχρονων τάσεων, των μεθοδολογικών εργαλείων και των τεχνικών προκλήσεων που αντιμετωπίζει ο κατασκευαστικός κλάδος κατά την ψηφιακή μετάβαση της διαχείρισης κόστους και χρόνου.

Μέσα από τη συστηματική εξέταση δημοσιευμένων ερευνητικών εργασιών, επιστημονικών άρθρων και διεθνών προτύπων, επιχειρείται η χαρτογράφηση της εξέλιξης του BIM από τα κτιριακά έργα στα γραμμικά έργα υποδομής (Horizontal BIM). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην ανάλυση των μηχανισμών διαλειτουργικότητας και της αυτοματοποιημένης άντλησης δεδομένων, προκειμένου να θεμελιωθεί ακαδημαϊκά η αναγκαιότητα σύγκλισης αυτών των δύο μεθοδολογικών πυλώνων. Τέλος, η ανασκόπηση εστιάζει στην ελληνική κατασκευαστική πραγματικότητα, προσδιορίζοντας το υφιστάμενο θεσμικό και τεχνολογικό χάσμα, το οποίο και αποτελεί το έναυσμα για την ανάπτυξη της προτεινόμενης ροής εργασίας της παρούσας διατριβής.

2.2 BIM 5D – Διεθνής Ερευνητική Κατάσταση

Η διεθνής επιστημονική κοινότητα προσεγγίζει πλέον το BIM 5D όχι ως μια απλή προσθήκη οικονομικών δεδομένων σε ένα τρισδιάστατο ψηφιακό ομοίωμα, αλλά ως μια ριζική αναδιοργάνωση των διαδικασιών Ελέγχου και Παρακολούθησης Έργων και της Κοστολογικής Μηχανικής. Όπως επισημαίνουν οι Smith (2020) και Mitchell et al. (2021), η παραδοσιακή διαδικασία Εξαγωγής Ποσοτήτων (Quantity Take-Off - QTO) βασιζόταν για δεκαετίες σε δισδιάστατα (2D) σχέδια, μια πρακτική εγγενώς επιρρεπή σε ανθρώπινα σφάλματα,

παραλείψεις και ασυνέπειες μεταξύ διαφορετικών σχεδίων (κατόψεων, όψεων, τομών). Η εισαγωγή του BIM 5D επιτρέπει την απευθείας σύνδεση των γεωμετρικών παραμέτρων και των ιδιοτήτων των αντικειμένων (object properties) με δυναμικές βάσεις δεδομένων κόστους (Cost Libraries), μετατρέποντας τη διαδικασία κοστολόγησης σε μια ζωντανή, παραμετρική λειτουργία.

Σύμφωνα με την έρευνα των Bryde et al. (2019), η εφαρμογή του BIM 5D προσφέρει μείωση του χρόνου υπολογισμού των προϋπολογισμών έως και 80%, επιτρέποντας ταυτόχρονα στους Μηχανικούς Κοστολόγησης να επικεντρωθούν στη βελτιστοποίηση της αξίας του έργου (Value Engineering) αντί για τη χειροκίνητη καταμέτρηση υλικών. Παράλληλα, οι Eastman et al. (2018) υπογραμμίζουν ότι η δυνατότητα εκτέλεσης κοστολόγησης σε πραγματικό χρόνο παρέχει στους κυρίους του έργου τη δυνατότητα να αξιολογούν άμεσα τον οικονομικό αντίκτυπο οποιασδήποτε σχεδιαστικής αλλαγής κατά τα πρώιμα στάδια της μελέτης, περιορίζοντας δραστικά τις υπερβάσεις προϋπολογισμού κατά τη φάση της κατασκευής.

Ωστόσο, η βιβλιογραφία αναδεικνύει και σημαντικές τεχνικές και οργανωσιακές προκλήσεις. Η κυριότερη από αυτές αφορά το Επίπεδο Ανάπτυξης (Level of Development - LOD) του μοντέλου. Οι Hardin και McCool (2020) τονίζουν ότι για την επιτυχή εφαρμογή του BIM 5D απαιτείται κατώτατο όριο LOD 300 ή LOD 350, όπου τα στοιχεία του μοντέλου περιλαμβάνουν ακριβείς πληροφορίες ποσότητας, μεγέθους, προσανατολισμού και θέσης. Εάν το μοντέλο έχει σχεδιαστεί σε χαμηλότερο επίπεδο (π.χ. LOD 200), η αυτοματοποιημένη εξαγωγή ποσοτήτων οδηγεί σε εσφαλμένα δεδομένα, ακυρώνοντας τα πλεονεκτήματα της μεθόδου.

Ένα επιπλέον κρίσιμο ζήτημα που απασχολεί τη διεθνή έρευνα είναι η διαλειτουργικότητα (interoperability). Η ανάγκη ανταλλαγής δεδομένων μεταξύ λογισμικών σχεδίασης (BIM Authoring Tools) και λογισμικών κοστολόγησης ή χρονοπρογραμματισμού προσκρούει συχνά σε κλειστά (proprietary) formats αρχείων. Η επιστημονική κοινότητα προκρίνει ως λύση τα ανοιχτά πρότυπα της buildingSMART, και συγκεκριμένα το σχήμα δεδομένων IFC (Industry Foundation Classes). Όπως τεκμηριώνεται από τους Lee et al. (2022), η χρήση του προτύπου IFC διασφαλίζει ότι η πληροφορία του κόστους και της ποσότητας παραμένει αναλλοίωτη κατά τη μεταφορά της, υποστηρίζοντας τη φιλοσοφία του Open BIM.

Τέλος, η βιβλιογραφική έρευνα συνδέει άμεσα την επιτυχία του BIM 5D με την εφαρμογή διεθνών προτύπων διαχείρισης πληροφοριών, με κυρίαρχο το σέτ προτύπων ISO 19650. Τα πρότυπα αυτά ορίζουν τις διαδικασίες, τους ρόλους και το Κοινό Περιβάλλον Δεδομένων (Common Data Environment - CDE) που απαιτούνται για τη διασφάλιση της ποιότητας της πληροφορίας. Όπως σημειώνουν οι Davies et al. (2023), η έλλειψη δομημένης πληροφορίας και η απουσία μιας σαφούς δομής κατανομής κόστους (Cost Breakdown Structure - CBS) αποτελούν τις βασικότερες αιτίες αποτυχίας των έργων BIM 5D σε παγκόσμιο επίπεδο.

2.3 Εφαρμογές BIM σε Έργα Οδοποιίας

Η ιστορική εξέλιξη του BIM ξεκίνησε από τον σχεδιασμό κτιρίων, γεγονός που οδήγησε στην ωριμότητα των εργαλείων για κατακόρυφες κατασκευές (Vertical BIM). Αντίθετα, η εφαρμογή του BIM σε έργα υποδομής, και ειδικότερα σε έργα οδοποιίας (Horizontal ή Infrastructure BIM), αποτελεί ένα πιο πρόσφατο και ιδιαίτερα σύνθετο πεδίο έρευνας. Οι προκλήσεις στα έργα οδοποιίας είναι δομικά διαφορετικές, καθώς τα έργα αυτά χαρακτηρίζονται από γραμμική ανάπτυξη μεγάλου μήκους, εξάρτηση από το φυσικό περιβάλλον και εκτεταμένη ανάγκη για γεωχωρικά δεδομένα.

Σύμφωνα με τους Bradley et al. (2021), η βάση για οποιοδήποτε μοντέλο Infra-BIM είναι το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (Digital Terrain Model - DTM). Η ακρίβεια του DTM, η οποία πλέον επιτυγχάνεται με σύγχρονες μεθόδους όπως το LiDAR και η φωτογραμμετρία μέσω UAV (Drones), καθορίζει την αξιοπιστία ολόκληρης της μελέτης. Η βιβλιογραφία δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη μοντελοποίηση «διαδρόμων» (3D Corridors). Η διαδικασία αυτή απαιτεί την ανάπτυξη πολύπλοκων μαθηματικών αλγορίθμων για τη διαχείριση της οριζοντιογραφίας (μεταβατικές καμπύλες, κλοθοειδείς) και της κατακόρυφης μηκοτομής (μηκοτομικές καμπύλες), σε συνδυασμό με τις τυπικές διατομές της οδού.

Ο μεγαλύτερος παράγοντας κινδύνου και οικονομικής αβεβαιότητας στα έργα οδοποιίας εντοπίζεται, κατά κοινή ομολογία των ερευνητών (Vu et al., 2021; Zhang & Hunt, 2023), στις χωματουργικές εργασίες (earthworks). Οι γενικές εκσκαφές, τα επιχώματα, οι δανειοθάλαμοι και οι αποθέσεις αποτελούν δυναμικά μεγέθη που εξαρτώνται από τη γεωλογία του εδάφους.

Η χρήση του Infra-BIM επιτρέπει τον αυτοματοποιημένο και ακριβή υπολογισμό των όγκων αυτών μέσω της σύγκρισης της τελικής επιφάνειας της οδού με το αρχικό DTM. Με αυτόν τον τρόπο, οι μελετητές μπορούν να εφαρμόσουν τεχνικές βελτιστοποίησης της γραμμής μάζας (mass-haul optimization), ελαχιστοποιώντας τις αποστάσεις μεταφοράς των γαιών και μειώνοντας δραστικά το κόστος και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του έργου.

Επιπλέον, η βιβλιογραφία αναδεικνύει το ζήτημα της διαχείρισης των υφιστάμενων δικτύων οργανισμών κοινής ωφέλειας (utility networks), τα οποία συχνά δεν είναι αποτυπωμένα με ακρίβεια. Η ενσωμάτωση δεδομένων GIS (Geographic Information Systems) εντός του περιβάλλοντος BIM αποτελεί κεντρικό άξονα της σύγχρονης έρευνας (Song et al., 2022). Η σύγκλιση BIM-GIS επιτρέπει τον εντοπισμό γεωμετρικών συγκρούσεων (clash detection) μεταξύ της σχεδιαζόμενης οδού και των υφιστάμενων υπογείων ή επίγειων δικτύων πριν από την εγκατάσταση του εργοταξίου, αποτρέποντας δαπανηρές καθυστερήσεις.

Παρά τα προφανή οφέλη, η βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι η αγορά του Horizontal BIM υποφέρει από την καθυστερημένη ανάπτυξη κοινών ανοιχτών προτύπων. Μόλις τα τελευταία χρόνια η buildingSMART ολοκλήρωσε το πρότυπο IFC 4.3, το οποίο ενσωματώνει ειδικές οντότητες για έργα οδοποιίας, σιδηροδρόμων και γεφυρών (π.χ. IfcRoad, IfcAlignment). Η έλλειψη αυτή, όπως σημειώνουν οι Sacks et al. (2020), ανάγκαζε μέχρι πρότινος τους μηχανικούς να χρησιμοποιούν αποσπασματικές λύσεις και να μετατρέπουν τα γραμμικά στοιχεία σε κτιριακές οντότητες, περιορίζοντας την αποτελεσματικότητα της 5D κοστολόγησης στα έργα υποδομής.

2.4 Η Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) στην Κατασκευαστική

Διαχείριση

Η Μέθοδος της Κερδισμένης Αξίας (Earned Value Management - EVM) αποτελεί διαχρονικά το πιο διαδεδομένο επιστημονικό εργαλείο για την αποτίμηση της προόδου και τον έλεγχο του κόστους σε σύνθετα τεχνικά έργα. Όπως αναφέρεται στην κλασική βιβλιογραφία της διαχείρισης έργων (Project Management Institute - PMI, 2019), η παραδοσιακή προσέγγιση για την παρακολούθηση ενός έργου περιοριζόταν στη σύγκριση δύο μεγεθών: του Προϋπολογισθέντος Κόστους (Planned Value - PV) και του Πραγματικού Κόστους (Actual Cost - AC). Η προσέγγιση αυτή, ωστόσο, χαρακτηρίζεται από τους ερευνητές ως παραπλανητική. Για παράδειγμα, αν ένα έργο έχει ξοδέψει λιγότερα χρήματα από όσα είχαν προγραμματιστεί, αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι είναι εντός προϋπολογισμού· ενδέχεται να έχει μείνει πίσω στο χρονοδιάγραμμα, έχοντας εκτελέσει πολύ λιγότερο έργο.

Η εισαγωγή της τρίτης παραμέτρου, της Κερδισμένης Αξίας (Earned Value - EV), η οποία εκφράζει την αξία του έργου που έχει πραγματικά ολοκληρωθεί σε τρέχουσες τιμές προϋπολογισμού, επέλυσε αυτό το δομικό πρόβλημα. Οι Kerzner (2017) και Fleming & Koppelman (2016) επισημαίνουν ότι η Μέθοδος της Κερδισμένης Αξίας (EVM) προσφέρει μια αντικειμενική μετρική, καθώς ενοποιεί το φυσικό αντικείμενο, το χρονοδιάγραμμα και το κόστος σε μια κοινή βάση αναφοράς. Μέσα από τους βασικούς αριθμοδείκτες απόδοσης, όπως ο Δείκτης Απόδοσης Κόστους (Cost Performance Index - $CPI = EV/AC$) και ο Δείκτης Απόδοσης Χρόνου (Schedule Performance Index - $SPI = EV/PV$), οι διαχειριστές μπορούν να αναγνωρίσουν τάσεις και αποκλίσεις από πολύ νωρίς, συχνά όταν το έργο έχει ολοκληρωθεί μόλις κατά 15% έως 20%.

Παρά την επιστημονική της αρτιότητα, η εφαρμογή της παραδοσιακής μεθόδου κερδισμένης αξίας (EVM) στον κατασκευαστικό κλάδο αντιμετωπίζει έντονη κριτική στη σύγχρονη βιβλιογραφία. Η πρώτη σημαντική αδυναμία εντοπίζεται στον Δείκτη Απόδοσης Χρόνου (SPI). Καθώς το έργο πλησιάζει προς την ολοκλήρωσή του, ο δείκτης SPI συγκλίνει μαθηματικά προς τη μονάδα ($SPI = 1.00$), ακόμη και αν το έργο έχει καθυστερήσει σημαντικά. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, οι Anbari (2021) και Vandevor & Vanhoucke (2020) ανέπτυξαν τη μέθοδο του Κερδισμένου Χρόνου (Earned Schedule - ES), η οποία

αντικαθιστά τις νομισματικές μονάδες με μονάδες χρόνου κατά τον υπολογισμό των χρονικών αποκλίσεων, προσφέροντας ακριβέστερες προβλέψεις για την ημερομηνία αποπεράτωσης.

Η δεύτερη και πιο κρίσιμη πρόκληση αφορά τη συλλογή των δεδομένων στο εργοτάξιο. Σύμφωνα με τους Kim & Ballard (2022), η άντληση των στοιχείων για το πραγματικό κόστος (AC) και την πραγματική πρόοδο (EV) παραμένει μια χειροκίνητη, κατακερματισμένη και χρονοβόρα διαδικασία που βασίζεται σε αναφορές υπερβολάβων και υπολογιστικά φύλλα (Excel). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ενημέρωση των δεικτών (EVM) να γίνεται ετεροχρονισμένα (συνήθως μία φορά τον μήνα). Οι διορθωτικές αποφάσεις λαμβάνονται έτσι με "ιστορικά" δεδομένα, όταν οι υπερβάσεις είναι πλέον μη αναστρέψιμες, περιορίζοντας τη χρησιμότητα της μεθόδου ως εργαλείο πρόβλεψης σε πραγματικό χρόνο.

2.5 Ενοποίηση BIM 5D & Μεθόδου της Κερδισμένης Αξίας (EVM) (BIM-based EVM)

Η ανάγκη για την υπέρβαση των περιορισμών της παραδοσιακής μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) οδήγησε τη διεθνή έρευνα στην ανάπτυξη του πεδίου BIM-based EVM. Η σύγκλιση αυτή θεωρείται από τους Chang et al. (2023) ως μια φυσιολογική εξέλιξη, καθώς το BIM 5D παρέχει την ακριβή ψηφιακή υποδομή που χρειάζεται η μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) για να λειτουργήσει δυναμικά. Όταν η Δομή Κατανομής Εργασιών (Work Breakdown Structure - WBS) του χρονοδιαγράμματος και της Δομής Κατανομής Κόστους (Cost Breakdown Structure - CBS) της κοστολόγησης, ταυτίζονται και συνδέονται άμεσα με τα 3D αντικείμενα του μοντέλου, η παραγωγή της Κερδισμένης Αξίας παύει να είναι μια υποκειμενική εκτίμηση και μετατρέπεται σε μια αυτοματοποιημένη, μαθηματική διαδικασία.

Στη διεθνή βιβλιογραφία, ο συνδυασμός αυτός αναφέρεται συχνά ως "Οπτικοποιημένη Διαχείριση Κερδισμένης Αξίας" (Visual EVM). Όπως τεκμηριώνεται από τις μελέτες των Park et al. (2021) και El-Omari & Moselhi (2022), η ενσωμάτωση των δεικτών CPI και SPI εντός του περιβάλλοντος BIM επιτρέπει την τρισδιάστατη χρωματική κωδικοποίηση του μοντέλου (3D Color Coding). Οι μηχανικοί του έργου μπορούν να αναγνωρίσουν οπτικά ποια

συγκεκριμένα δομικά στοιχεία (π.χ. ποιοι πάσσαλοι, ποια τμήματα οδοστρώματος ή ποιοι τοίχοι αντιστήριξης) παρουσιάζουν αποκλίσεις. Στοιχεία με δείκτη $CPI < 1$ εμφανίζονται για παράδειγμα με κόκκινο χρώμα, υποδηλώνοντας υπέρβαση κόστους, ενώ στοιχεία με δείκτη $SPI > 1$ εμφανίζονται με πράσινο, υποδηλώνοντας πρόοδο ταχύτερη του αναμενομένου.

Παράλληλα, η έρευνα εστιάζει στη βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων για το τελικό κόστος ολοκλήρωσης (Estimate at Completion - EAC). Στην παραδοσιακή Μέθοδο Κερδισμένης Αξίας (EVM), ο υπολογισμός του τελικού κόστους (EAC) βασίζεται σε στατικές μαθηματικές φόρμουλες που υποθέτουν ότι η μελλοντική απόδοση θα είναι παρόμοια με την παρελθούσα. Στο περιβάλλον BIM 5D, όπως εξηγούν οι Zhou et al. (2024), ο υπολογισμός του EAC γίνεται δυναμικά, καθώς το σύστημα μπορεί να συνδυάσει την τρέχουσα απόδοση (CPI) με τις ακριβείς ποσότητες του υπολειπόμενου έργου (Quantity to be Executed) που αντλούνται απευθείας από το μοντέλο, μειώνοντας το ποσοστό σφάλματος των προβλέψεων κάτω από το 5%.

Ωστόσο, η υλοποίηση μιας ροής εργασίας BIM-based EVM παρουσιάζει σοβαρές μεθοδολογικές δυσκολίες, οι οποίες αποτελούν το επίκεντρο της τρέχουσας επιστημονικής συζήτησης. Η βασικότερη πρόκληση είναι η "ευθυγράμμιση των δεδομένων" (Data Alignment). Τα αντικείμενα σε ένα μοντέλο BIM ομαδοποιούνται με βάση τη γεωμετρία και τα υλικά τους (π.χ. σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30). Αντίθετα, οι δραστηριότητες σε ένα χρονοδιάγραμμα (MS Project / Primavera) ομαδοποιούνται με βάση τη φάση κατασκευής και τον χρόνο (π.χ. Σκυροδέτηση Τμήματος Α). Η αντιστοίχιση πολλών γεωμετρικών αντικειμένων σε μία δραστηριότητα, ή το αντίστροφο, απαιτεί τη δημιουργία ενδιάμεσων παραμέτρων σύνδεσης (Mapping Parameters). Η έρευνα των Sulankivi et al. (2023) υπογραμμίζει ότι αν αυτή η αντιστοίχιση δεν σχεδιαστεί σωστά στην αρχή του έργου, η μεταφορά δεδομένων καταρρέει, οδηγώντας σε εσφαλμένους δείκτες απόδοσης.

2.6 Η Υιοθέτηση του BIM στην Ελλάδα

Η εισαγωγή και η ενσωμάτωση των τεχνολογιών Building Information Modeling (BIM) στον ελληνικό κατασκευαστικό κλάδο αποτελεί αντικείμενο έντονης συζήτησης στην εγχώρια

βιβλιογραφία, με τους ερευνητές να χαρακτηρίζουν την κατάσταση ως μεταβατική και τεχνολογικά ανώριμη σε σύγκριση με τις χώρες της Βόρειας Ευρώπης ή των ΗΠΑ. Όπως επισημαίνουν οι Παπαδόπουλος κ.ά. (2022) και Γεωργίου (2024), η ελληνική αγορά κυριαρχείται ιστορικά από μικρομεσαίες τεχνικές και μελετητικές εταιρείες, οι οποίες εμφανίζουν ισχυρή αντίσταση στην αλλαγή και παραμένουν προσκολλημένες στις παραδοσιακές μεθόδους σχεδίασης δύο διαστάσεων (2D CAD). Η έλλειψη κεφαλαίων για την αγορά ακριβών αδειών λογισμικού BIM, το υψηλό κόστος αναβάθμισης του υλικού (hardware) και η απουσία εξειδικευμένου προσωπικού αποτελούν τα κυριότερα οργανωσιακά εμπόδια που καταγράφονται στις ελληνικές εμπειρικές έρευνες.

Σε θεσμικό επίπεδο, η βιβλιογραφία τονίζει ότι η Ελλάδα στερείται ενός ολοκληρωμένου εθνικού πλαισίου προδιαγραφών (National BIM Guidelines / Mandate). Ενώ η Ευρωπαϊκή Οδηγία 2014/24/ΕΕ ενθαρρύνει τη χρήση του BIM στις δημόσιες συμβάσεις, η ενσωμάτωσή της στην ελληνική νομοθεσία (Ν. 4412/2016 για τις Δημόσιες Συμβάσεις Έργων, Προμηθειών και Υπηρεσιών) παρέμενε για χρόνια προαιρετική και αποσπασματική. Μόλις τα τελευταία έτη, μέσα από πρωτοβουλίες όπως η συγκρότηση της Εθνικής Στρατηγικής BIM από το Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών, άρχισε να διαφαίνεται μια συντονισμένη προσπάθεια για τη σταδιακή υποχρεωτική εφαρμογή του BIM σε μεγάλα έργα εθνικής εμβέλειας.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη βιβλιογραφία στις παθογένειες της διαχείρισης των δημοσίων έργων υποδομής και οδοποιίας στην Ελλάδα. Σύμφωνα με τον Κοντογιάννη (2023), η χρήση συμβατικών, χειροκίνητων μεθόδων επιμέτρησης και κοστολόγησης οδηγεί συστηματικά σε τεράστιες αποκλίσεις μεταξύ της αρχικής μελέτης σκοπιμότητας και της τελικής κατασκευαστικής πραγματικότητας. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται τη συνεχή σύνταξη Ανακεφαλαιωτικών Πινάκων Εργασιών (ΑΠΕ), τη διεκδίκηση συμπληρωματικών συμβάσεων από τους αναδόχους και τη δημιουργία έντονων νομικών και δικαστικών διαμαχών (claims). Η υιοθέτηση του BIM 5D προτείνεται από τους Έλληνες μελετητές ως η μόνη βιώσιμη λύση για τη διασφάλιση της διαφάνειας, τον αντικειμενικό έλεγχο των επιμετρήσεων και τον περιορισμό των υπερβάσεων κόστους που επιβαρύνουν τον κρατικό προϋπολογισμό.

2.7 Ερευνητικό Κενό και Συμβολή της Εργασίας

Από τη συστηματική και κριτική ανασκόπηση της διεθνούς και ελληνικής βιβλιογραφίας προκύπτει ένα σαφές και σημαντικό ερευνητικό κενό (research gap). Η συντριπτική πλειονότητα των υφιστάμενων μοντέλων και ροών εργασίας BIM-based EVM έχει αναπτυχθεί, δοκιμαστεί και επικυρωθεί σε κτιριακά έργα (Vertical BIM). Αντίθετα, η εφαρμογή αυτών των σύγχρονων εργαλείων ελέγχου σε γραμμικά έργα υποδομής, και ειδικότερα σε έργα οδοποιίας (Horizontal BIM), παραμένει εξαιρετικά περιορισμένη σε θεωρητικό επίπεδο ή περιορίζεται σε απλά ακαδημαϊκά παραδείγματα χωρίς πρακτικό αντίκρισμα.

Τα έργα οδοποιίας παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες που δεν μπορούν να καλυφθούν από τις κλασικές ροές εργασίας των κτιρίων, όπως η εξάρτηση από το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (DTM), η δυναμική φύση των χωματουργικών εργασιών και η γραμμική κατανομή του WBS κατά μήκος της χάραξης (π.χ. ανά χιλιομετρική θέση). Επιπλέον, στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει πλήρης απουσία μελετών που να εξετάζουν την ενσωμάτωση και τη διαλειτουργικότητα εξειδικευμένων λογισμικών της ελληνικής αγοράς, τα οποία είναι προσαρμοσμένα στις ιδιαίτερες τεχνικές προδιαγραφές, τα τιμολόγια δημοσίων έργων και τις νομοθετικές απαιτήσεις της Ελλάδας.

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή έρχεται να καλύψει αυτό ακριβώς το ερευνητικό και πρακτικό κενό. Η πρωτοτυπία και η συμβολή της έγκειται στην ανάπτυξη, τον σχεδιασμό και την εφαρμογή μιας ολοκληρωμένης, πρακτικής ροής εργασίας (workflow) για τον συνδυασμό του BIM 5D και της Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM), προσαρμοσμένης στα δεδομένα των ελληνικών έργων υποδομής. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, χρησιμοποιείται το ελληνικό λογισμικό οδοποιίας Anadelta Tessera ως εργαλείο παραγωγής του 3D/5D μοντέλου και εξαγωγής ποσοτήτων, το οποίο συνδέεται δυναμικά με το MS Project για τον χρονοπρογραμματισμό και την παραγωγή των δεικτών απόδοσης (CPI, SPI). Μέσα από τη μελέτη περίπτωσης (case study) ενός πραγματικού έργου οδοποιίας, η εργασία αποδεικνύει πώς οι ελληνικές τεχνικές εταιρείες μπορούν να μεταβούν με ασφάλεια στην ψηφιακή εποχή, χρησιμοποιώντας εργαλεία συμβατά με την εγχώρια πραγματικότητα, μειώνοντας το ρίσκο των αποκλίσεων.

2.8 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο δεύτερο αυτό κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε μια συστηματική και κριτική χαρτογράφηση της υφιστάμενης επιστημονικής γνώσης γύρω από τις τεχνολογίες BIM 5D και τη Μέθοδο Κερδισμένης Αξίας (Earned Value Management - EVM). Μέσα από την ανασκόπηση, αναδείχθηκαν τα πλεονεκτήματα της αυτοματοποιημένης εξαγωγής ποσοτήτων (QTO) και οι προκλήσεις διαλειτουργικότητας μέσω των ανοιχτών προτύπων IFC 4.3 για τα γραμμικά έργα οδοποιίας (Infra-BIM). Παράλληλα, αναλύθηκαν οι δομικοί περιορισμοί της παραδοσιακής Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) και πώς η σύγκλισή της με το BIM 5D (BIM-based EVM) επιτρέπει τον οπτικοποιημένο και δυναμικό έλεγχο του έργου σε πραγματικό χρόνο. Τέλος, εξετάστηκε το θεσμικό και τεχνολογικό επίπεδο υιοθέτησης του BIM στην Ελλάδα, προσδιορίζοντας το ερευνητικό κενό που αφορά τα έργα οδοποιίας, το οποίο και αποτελεί τη βάση για τη συμβολή της παρούσας εργασίας.

3. Περιγραφή του έργου οδοποιίας

3.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά του έργου οδοποιίας που χρησιμοποιείται ως μελέτη περίπτωσης (case study) για την εφαρμογή BIM 5D στη διπλωματική αυτή εργασία. Πρόκειται για έργο κατασκευής νέου οδικού τμήματος συνολικού μήκους 1.795,28 m, το οποίο μελετήθηκε με το λογισμικό Anadelta Tessera — το κύριο εργαλείο ψηφιακής μοντελοποίησης οδοποιίας στην Ελλάδα.

Τα δεδομένα του έργου (γεωμετρία, ποσότητες, κόστος) αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη του BIM 5D ψηφιακού μοντέλου, το οποίο ενσωματώνει τρεις διαστάσεις: (α) χώρος — το τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο από το Anadelta, (β) χρόνος — το χρονοδιάγραμμα MS Project με Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS) και Μέθοδο Κρίσιμης Διαδρομής (CPM), και (γ) κόστος, ο αναλυτικός προϋπολογισμός και Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM).

3.2 Γενικά Στοιχεία Έργου

Ο πίνακας 4 παρουσιάζει συνοπτικά τα βασικά στοιχεία του έργου, όπως προκύπτουν από την ανάλυση των αρχείων Anadelta (DXF οριζοντιογραφία, μηκοτομή, διατομές) και τον πίνακα ποσοτήτων.

Στοιχείο	Περιγραφή
Αντικείμενο Έργου	Κατασκευή νέου οδικού τμήματος (έργο οδοποιίας για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας)
Μήκος Άξονα	1.795,28 m (Χ.Θ. 0+000 έως Χ.Θ. 1+795,28)
Κατηγορία Έργου	Νέα υπεραστική οδός

Στοιχείο	Περιγραφή
Ταχύτητα Μελέτης	Υμελ = 60 km/h (εκτιμώμενη βάσει γεωμετρικών χαρακτηριστικών)
Πλάτος Οδοστρώματος	$2 \times 5,50 \text{ m} = 11,00 \text{ m}$ (2 λωρίδες κυκλοφορίας)
Ερείσματα	$2 \times 0,75 \text{ m}$ (συνολικό πλάτος κατατομής ~12,50 m)
Εγκάρσια Κλίση	2,5% αμφίκλιση
Υψόμετρο Αρχής (Χ.Θ. 0+000)	243,66 m
Υψόμετρο Τέλους (Χ.Θ. 1+795)	~277,00 m (εκτιμώμενο)
Συνολική Υψομετρική Διαφορά	~33,34 m ανύψωση
Αριθμός Διατομών	104 εγκάρσιες διατομές (ΑΑ έως ΑΠ)
Συνολικός Προϋπολογισμός (με ΦΠΑ)	1.850.000,00 €
αρχικός προϋπολογισμός (BAC) — (χωρίς ΦΠΑ)	1.491.935,48 €
Συμβατική Διάρκεια	18 μήνες (72 εβδομάδες)
Λογισμικό Μελέτης	Anadelta Tessera (οδοποιία & ποσότητες)

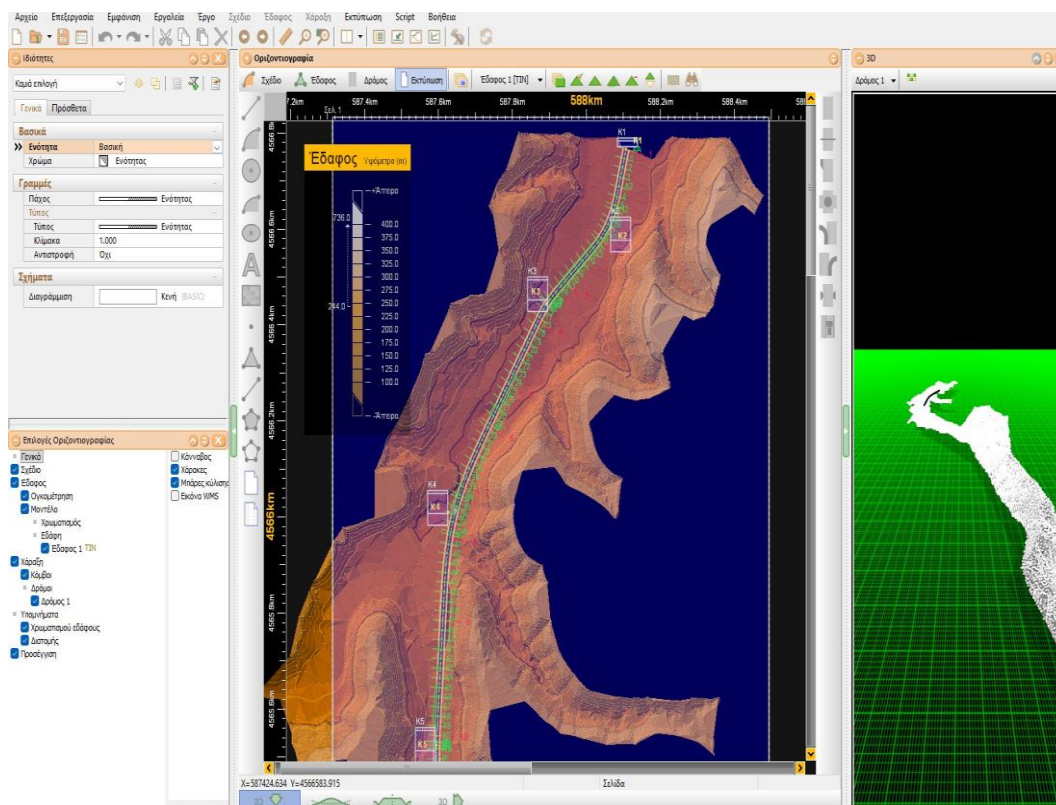
Πίνακας 4 Γενικά Στοιχεία Έργου Οδοποιίας

Το έργο χαρακτηρίζεται ως υπεραστική οδός σε ημιορεινό αναγλύφο, λόγω α) της συνολικής υψομετρικής διαφοράς ~33 m σε μήκος 1,795 km, β) της ανάγκης γενικών εκσκαφών σε βραχώδες έδαφος (14.510,51 m³, που αντιστοιχεί στο 30% των συνολικών εκσκαφών), γ) των έντονων κατά μήκος κλίσεων στο τελικό του τμήμα (από τη Χ.Θ. 1+567 έως 1+795, με τιμές 4,83%–6,55%) και δ) της απουσίας αστικού χαρακτήρα (έλλειψη δικτύων ομβρίων/αποχέτευσης, φωτεινής σηματοδότησης ή εκτεταμένων συνοδών τεχνικών έργων).

3.3 Οριζοντιογραφία

3.3.1 Γενική Περιγραφή

Ο άξονας της οδού αναπτύσσεται σε μήκος 1.795,28 m, αρχίζοντας από τη Χ.Θ. 0+000 και τελειώνοντας στη Χ.Θ. 1+795,28. Η οριζοντιογραφία εξήχθη από το αρχείο Anadelta σε μορφή DXF (layer: AXONIKI_R1) και περιλαμβάνει 4.856 σημεία ορισμού του άξονα, εξασφαλίζοντας υψηλή γεωμετρική ακρίβεια.



Εικόνα 1: Οριζοντιογραφία έργου οδοποιίας — Anadelta Tessera (με τοπογραφικό υπόβαθρο TIN και άξονα χάραξης)

3.3.2 Οριζόντιες Καμπύλες

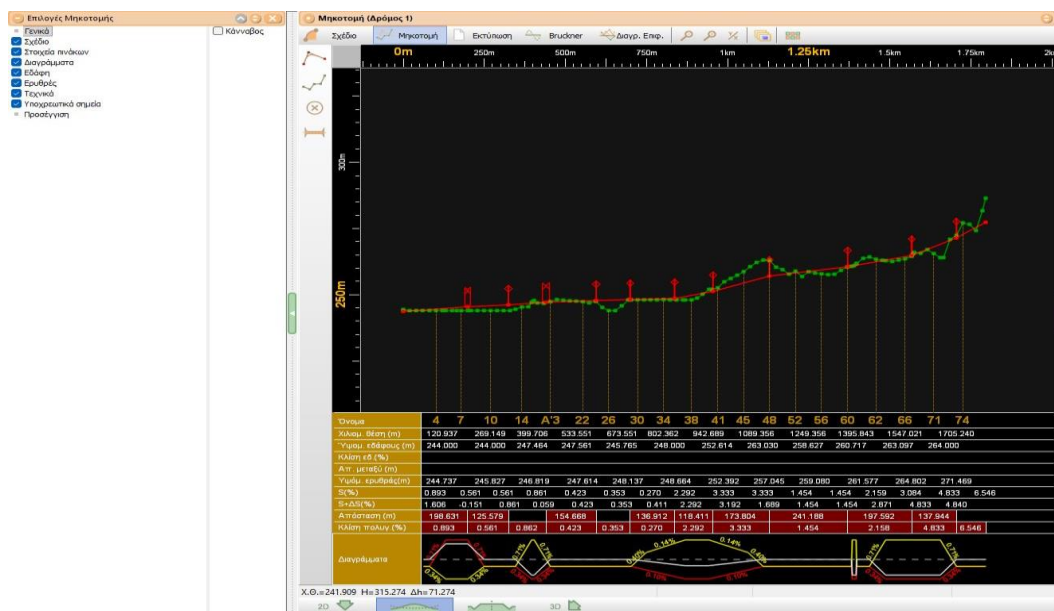
Η χάραξη της οριζοντιογραφίας περιλαμβάνει τόξα κύκλων και ευθυγραμμίες, σύμφωνα με τις προδιαγραφές ΟΜΟΕ-Χ για ταχύτητα μελέτης 60 km/h. Από την ανάλυση του layer

AKTINES_R1 της οριζοντιογραφίας προκύπτουν οριζόντιες καμπύλες κατά μήκος του άξονα, με επικλίσεις οδοστρώματος προσαρμοσμένες στις ελάχιστες ακτίνες. Το πλάτος οδοστρώματος παραμένει σταθερό (11,00 m) σε όλο το μήκος του άξονα.

3.4 Μηκοτομή — Κατακόρυφη Χάραξη

3.4.1 Υψομετρικά Στοιχεία Ερυθράς

Η ερυθρά γραμμή της οδού αναπτύσσεται από υψόμετρο 243,66 m στη Χ.Θ. 0+000 έως υψόμετρο ~277 m στη Χ.Θ. 1+795,28, με συνολική ανύψωση ~33 m. Ο χαρακτήρας είναι κυρίως ανοδικός με 12 υψομετρικά τμήματα διαφορετικής κλίσης, που ορίζονται από 11 κατακόρυφες καμπύλες.



Εικόνα 2: Μηκοτομή ερυθράς γραμμής — Anadelta Tessera (κλίσεις, κατακόρυφες καμπύλες, υψόμετρα

3.4.2 Πίνακας Κλίσεων Μηκοτομής

Τμήμα	Χ.Θ. Αρχής	Χ.Θ. Τέλους	Μήκος (m)	Κλίση (%)	Κατακ. Καμπύλη R (m)	Χαρακτήρας
1	0+000	0+198,63	198,63	0,89%	R=5.000 (κορ. 0+198,63)	Ήπια ανηφόρα
2	0+198,63	0+324,21	125,58	0,57%	R=100 (κορ. 0+324,21)	Ήπια ανηφόρα
3	0+324,21	0+440,02	115,81	0,85%	R=5.000 (κορ. 0+440,02)	Ήπια ανηφόρα
4	0+440,02	0+594,68	154,66	0,43%	R=100 (κορ. 0+594,68)	Πολύ ήπια
5	0+594,68	0+699,53	104,85	0,35%	R=3.000 (κορ. 0+699,53)	Σχεδόν οριζόντια
6	0+699,53	0+836,44	136,91	0,27%	R=100 (κορ. 0+836,44)	Σχεδόν οριζόντια
7	0+836,44	0+954,85	118,41	2,29%	R=100 (κορ. 0+954,85)	Μέτρια ανηφόρα
8	0+954,85	1+128,65	173,80	3,33%	R=100 (κορ. 1+128,65)	Έντονη ανηφόρα
9	1+128,65	1+369,84	241,19	1,46%	R=100 (κορ. 1+369,84)	Μέτρια ανηφόρα
10	1+369,84	1+567,43	197,59	2,16%	R=100 (κορ. 1+567,43)	Μέτρια ανηφόρα
11	1+567,43	1+705,38	137,95	4,83%	R=100 (κορ. 1+705,38)	Απότομη ανηφόρα
12	1+705,38	1+795,28	89,90	6,55%	—	Πολύ απότομη ανηφόρα

Πίνακας 5 Κλίσεις Μηκοτομής ανά Τμήμα — 12 τμήματα, 11 κατακόρυφες καμπύλες

Παρατηρήσεις: (α) Τα τμήματα 1–6 (Χ.Θ. 0+000 έως 0+836) παρουσιάζουν ήπιες κλίσεις 0,27%–0,89%, χαρακτηριστικές πεδινού/ημιπεδινού εδάφους. (β) Από τη Χ.Θ. 0+836 εντείνεται σημαντικά η κλίση, φτάνοντας 2,29% → 3,33% → 6,55%, αντικατοπτρίζοντας τον

ημιορεινό χαρακτήρα του τελευταίου τμήματος. (γ) Οι κατακόρυφες καμπύλες με $R=100m$ υποδηλώνουν απότομες μεταβολές κλίσης, τυπικό χαρακτηριστικό ορεινής οδοποιίας.

3.4.3 Κατακόρυφες Καμπύλες

ΚΚ	Χ.Θ. Κορυφής	Υψόμετρο (m)	R (m)	T (m)	δ (m)	Είδος	Κλίσεις
ΚΚ1	0+198,63	245,43	5.000	8,30	0,01	Κυρτή	0,89% → 0,57%
ΚΚ2	0+324,21	246,14	100	0,15	0,00	Κοίλη	0,57% → 0,85%
ΚΚ3	0+440,02	247,13	5.000	10,95	0,01	Κυρτή	0,85% → 0,43%
ΚΚ4	0+594,68	247,79	100	0,04	0,00	Κοίλη	0,43% → 0,35%
ΚΚ5	0+699,53	248,16	3.000	1,24	0,00	Κυρτή	0,35% → 0,27%
ΚΚ6	0+836,44	248,53	100	1,01	0,01	Κοίλη	0,27% → 2,29%
ΚΚ7	0+954,85	251,24	100	0,52	0,00	Κοίλη	2,29% → 3,33%
ΚΚ8	1+128,65	257,03	100	0,94	0,00	Κυρτή	3,33% → 1,46%
ΚΚ9	1+369,84	260,54	100	0,35	0,00	Κοίλη	1,46% → 2,16%
ΚΚ10	1+567,43	264,81	100	1,33	0,01	Κοίλη	2,16% → 4,83%
ΚΚ11	1+705,38	271,47	100	0,86	0,00	Κοίλη	4,83% → 6,55%

Πίνακας 6 Κατακόρυφες Καμπύλες Μηκοτομής — Κόκκινο: Κυρτές | Πράσινο: Κοίλες

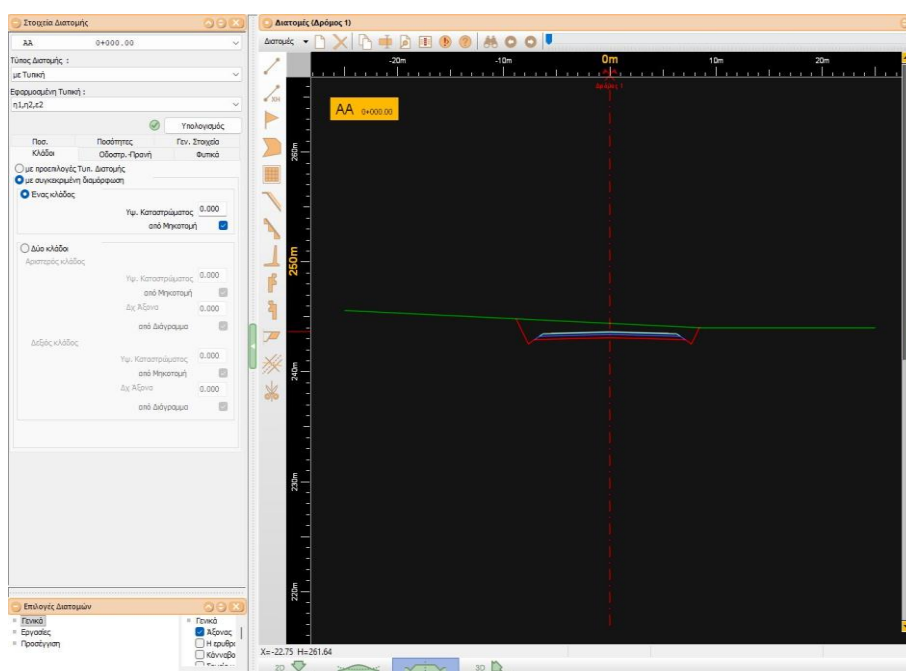
Σύνολο κατακόρυφων καμπυλών: 11 (2 κυρτές με Ακτίνα Καμπυλότητας $R=5.000$ και 3.000 , και 9 κοίλες με Ακτίνα Καμπυλότητας $R=100$). Οι κυρτές καμπύλες (ΚΚ1, ΚΚ3) με $R=5.000$ m και $R=3.000$ m βρίσκονται στο ήπιο αρχικό τμήμα και εξασφαλίζουν ικανοποιητική

ορατότητα. Αντίθετα, οι κοίλες καμπύλες με Ακτίνα Καμπυλότητας $R=100$ m αποτελούν ελάχιστες επιτρεπόμενες τιμές για $V=60$ km/h και εντοπίζονται στο ανηφορικό τμήμα.

3.5 Τυπική Διατομή

3.5.1 Δομή Οδοστρώματος

Η τυπική διατομή του έργου, όπως προκύπτει από την ανάλυση των διατομών του λογισμικού Anadelta, παρουσιάζει μέση ή Ελαφρά κυκλοφοριακή φόρτιση, η οποία είναι κατάλληλη για υπεραστική οδό με αντίστοιχου επιπέδου κυκλοφοριακό φόρτο.



Εικόνα 3: Τυπική εγκάρσια διατομή AA (X.Θ. 0+000) — Anadelta Tessera

A/A	Στρώση	Υλικό	Πάχος	Κλίμακα	Τιμολόγιο
1	Ασφαλτική Στρώση Κυκλοφορίας	Ασφαλτόμιγμα ΑΣ 12,5 ή ΑΣ 20 (κοινή άσφαλτος)	0,05 m	1:200	Άρθρο Δ.2
2	Βάση Οδοστρώσις	Θραυστά αδρανή σταθεροποιούμενου τύπου (ΑΜΜΟΧΑΛΙΚΑ)	Μεταβλητό	1:200	Άρθρο Γ.2
3	Υπόβαση Οδοστρώσις	Θραυστά αδρανή σταθεροποιούμενου τύπου	Μεταβλητό	1:200	Άρθρο Γ.1
4	Έρεισμα	Θραυστό υλικό λατομείου	Μεταβλητό	1:200	Άρθρο Γ.3

Πίνακας 7 Δομή Τυπικής Διατομής — Στρώσεις Οδοστρώματος

- Η οδοστρώσις (υπόβαση + βάση) επιμετράται σε m³ με μεταβλητό πάχος
- Η ασφαλτική στρώση υποδηλώνει απλοποιημένη δομή, κατάλληλη για δρόμο χαμηλής/μεσαίας κυκλοφοριακής έντασης
- Η εγκάρσια κλίση 2,5%.

3.5.2 Στοιχεία Πρανών

Από την ανάλυση της μελέτης, προκύπτει ότι το έργο παρουσιάζει ορύγματα (εκσκαφές) κυρίως και επιχώματα, με συνολικό όγκο εκσκαφών (48.368,32 m³), όπου υπερβαίνει κατά 2,85 φορές τα επιχώματα (16.982,66 m³), επιβεβαιώνοντας την ανάγκη εισαγωγής δανείων λατομείου Ε4 (16.982,66 m³) και απόρριψης ακατάλληλων προϊόντων εκσκαφής.

3.6 Τεχνικά Έργα

Σύμφωνα με τον προϋπολογισμό (Ομάδα Β), το έργο περιλαμβάνει:

- Κιβωτιοειδείς οχετούς από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25 (370 m³), για την αποχέτευση υδάτων
- Ρείθρα από οπλισμένο σκυρόδεμα κατηγορίας C12/15 (84 m³) — παράπλευρα της οδού για συλλογή ομβρίων.
- Χάλυβας B500C (24.632 kg) και δομικά πλέγματα (3.960 kg) — για τον οπλισμό των κιβωτίων και άλλων σκυροδεμάτων.

3.7 Σύστημα Σήμανσης και Οδοφωτισμού

Το σύστημα σήμανσης–ασφάλειας (Ομάδα Ε, 107.244,55 €) αποτελεί τη δεύτερη σε δαπάνη κατηγορία, γεγονός που υπογραμμίζει τις ανάγκες ασφάλειας της συγκεκριμένης οδοποιίας. Ειδικότερα, τα 2.500 m μονόπλευρων στηθαίων H2 W3 (175.000 €) υποδηλώνουν εκτεταμένα επικίνδυνα τμήματα.

Η δαπάνη για τις εργασίες ηλεκτροφωτισμού (Ομάδα ΣΤ, προϋπολογισμού 137.121,00 €) προβλέπει την εγκατάσταση 60 χαλύβδινων ιστών οδοφωτισμού ύψους 9 m με φωτιστικά σώματα τεχνολογίας LED ισχύος 110-150W, καθώς και 2 Pillar διανομής (με 8 αναχωρήσεις έκαστο). Η χωροθέτηση των 60 ιστών σε συνολικό μήκος ~1,8 km συνεπάγεται μέσο άνοιγμα (απόσταση ιστών) ~30 m, τιμή η οποία κρίνεται τυπική και εναρμονισμένη με τις φωτοτεχνικές απαιτήσεις υπεραστικού οδικού δικτύου κατηγορίας φωτισμού ME3 ή ME4.

3.8 Σύνοψη Κεφαλαίου

Το έργο οδοποιίας το οποίο εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα υπεραστικής οδού ημιορεινού αναγλύφου του ελληνικού περιφερειακού δικτύου. Τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν: συνολικό μήκος 1.795,28 m, υψομετρική διαφορά ~33 m, κατά μήκος κλίσεις που κυμαίνονται από 0,27% έως 6,55%, καθώς και εμφάνιση βραχώδους εδάφους στο τελικό του τμήμα. Τα

γεωμετρικά δεδομένα που εξήχθησαν από το Anadelta) αποτελούν τη βάση για τα επόμενα κεφάλαια.

4. Ψηφιακό μοντέλο Anadelta

4.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει το ψηφιακό μοντέλο του έργου οδοποιίας όπως αναπτύχθηκε με το λογισμικό Anadelta Tessera, και αναλύει τους πίνακες ποσοτήτων που εξήχθησαν από αυτό. Αποτελεί τον συνδετικό κρίκο μεταξύ της γεωμετρικής περιγραφής του έργου και του αναλυτικού προϋπολογισμού, επιδεικνύοντας στην πράξη τη BIM 5D ροή πληροφορίας: Γεωμετρία → Ποσότητες → Κόστος → Χρόνος.

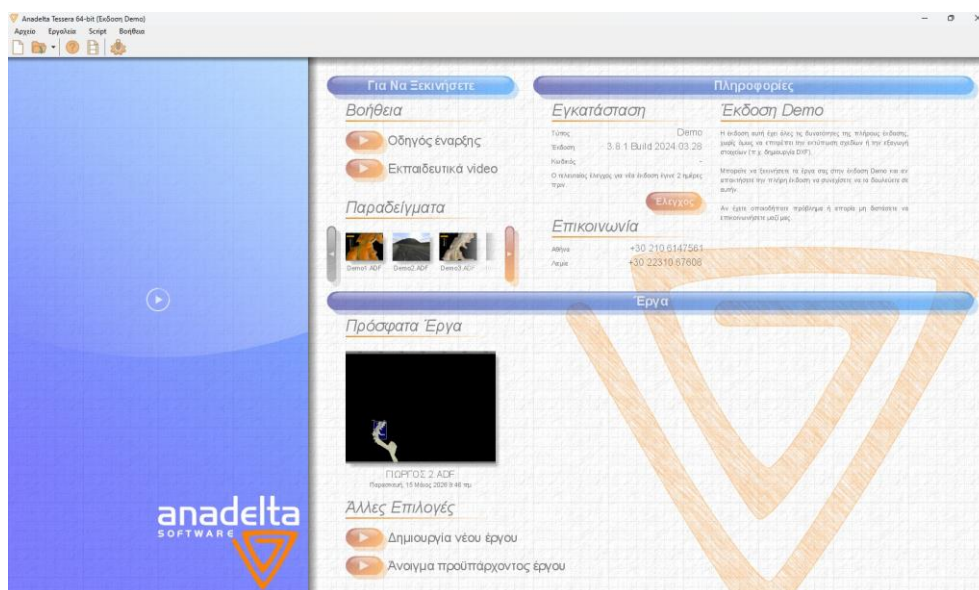
Η αξία του Anadelta στο BIM 5D πλαίσιο είναι θεμελιώδης: αντί για χειροκίνητη εκτίμηση ποσοτήτων — που εισάγει αβεβαιότητα $\pm 10\text{--}20\%$ στους προϋπολογισμούς, το λογισμικό εξάγει ποσότητες απευθείας από το τρισδιάστατο γεωμετρικό μοντέλο, με ακρίβεια που εξαρτάται από την πυκνότητα των εγκάρσιων διατομών. Στο παρόν έργο, οι διατομές ανά 10–20 m εξασφαλίζουν αξιόπιστη αριθμητική ολοκλήρωση των ογκομετρικών υπολογισμών.

4.2 Λογισμικό Anadelta Tessera — Επισκόπηση

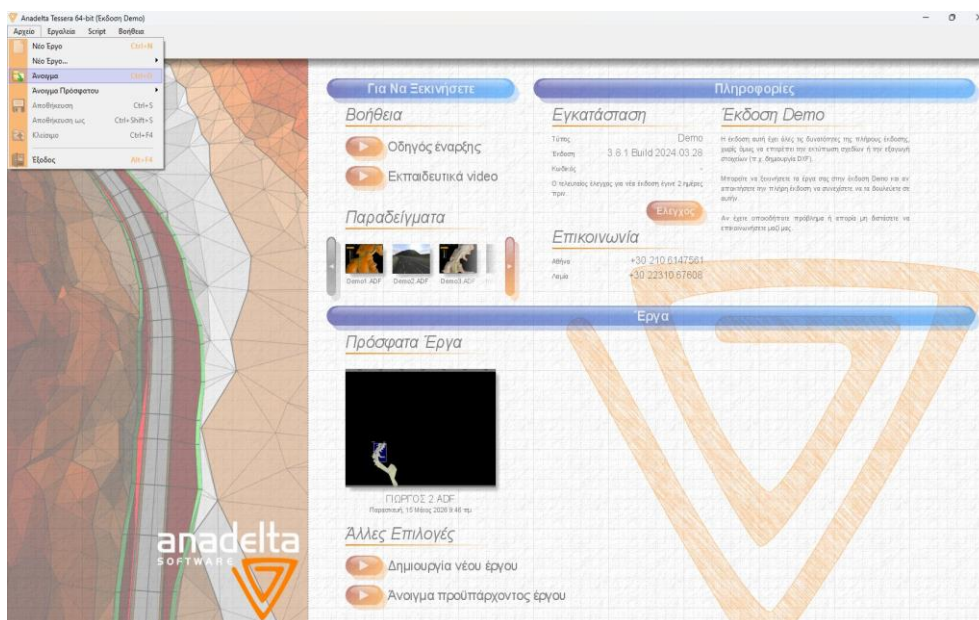
4.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Το Anadelta Tessera αποτελεί το κυρίαρχο ελληνικό λογισμικό μελέτης οδοποιίας, ευρέως χρησιμοποιούμενο από ιδιωτικά μελετητικά γραφεία, κατασκευαστικές εταιρείες και Διευθύνσεις Τεχνικών Έργων. Υποστηρίζει ολοκληρωμένη ροή μελέτης οδοποιίας: τοπογραφία → χάραξη → μηκοτομή → διατομές → ποσότητες → προϋπολογισμός.

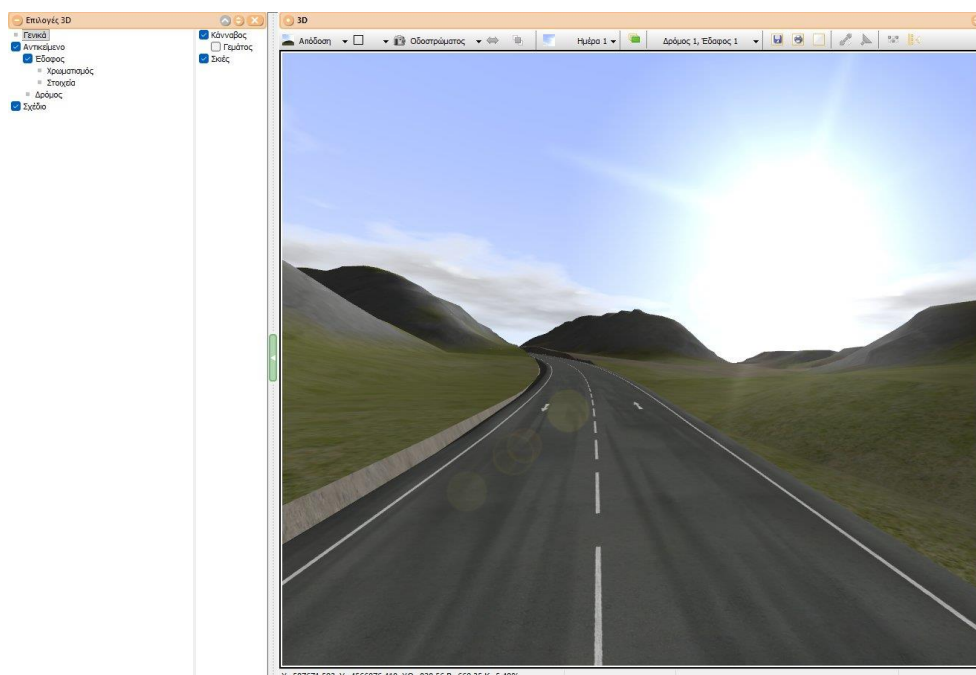
«Στο πλαίσιο της 5D BIM υλοποίησης, το Anadelta αποτελεί τον ψηφιακό πυρήνα του τρισδιάστατου μοντέλου (3D BIM): παράγει τη χωρική γεωμετρία (σύνθεση οριζοντιογραφίας, μηκοτομής και τυπικής διατομής) και εξάγει τις αντίστοιχες ποσότητες εργασιών. Αυτά τα δεδομένα εισάγονται στη συνέχεια στο MS Project για τη χρονική μοντελοποίηση (4D) και την Μέθοδο Κερδισμένης Αξίας (EVM), ολοκληρώνοντας τη διαχείριση του κόστους (5D).»



Εικόνα 4: Αρχικό περιβάλλον εργασίας Anadelta Tessera (Έκδοση Demo 3.8.1 Build 2024.03.28)



Εικόνα 5: Διαδικασία ανοίγματος αρχείου έργου οδοποιίας (Αρχείο → Άνοιγμα)



Εικόνα 6: Τρισδιάστατη απεικόνιση (3D View) του έργου οδοποιίας — Anadelta Tessera

4.2.2 Αρχεία Μοντέλου

Το μοντέλο του παρόντος έργου αποτελείται από τρία (3) αρχεία DXF και έναν πίνακα ποσοτήτων:

- ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΑ.dxf — Κάτοψη οδού, άξονας, πρανή, όρια απαλλοτρίωσης
- ΜΗΚΟΤΟΜΗ.dxf — Μηκοτομή ερυθράς, κλίσεις, κατακόρυφες καμπύλες, υψόμετρα
- ΔΙΑΤΟΜΕΣ.dxf — 104 εγκάρσιες διατομές με ποσότητες ανά στρώση
- ΠΙΝΑΚΑΣ_ΠΟΣΟΤΗΤΩΝ.xls — Αναλυτικός πίνακας χωματισμών, οδοστρωσίας, ασφαλτικών ανά διατομή

4.3 Ανάλυση Αρχείων DXF — Layers και Περιεχόμενο

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τα κυριότερα επίπεδα (layers) των τριών DXF αρχείων, το είδος των γεωμετρικών οντοτήτων που περιέχουν και τη σημασία τους για το BIM 5D μοντέλο.

Αρχείο DXF	Layer	Τύπος	Περιεχόμενο / Σημασία
Οριζοντιογραφία	AXONIKI_R1	LWPOLYLINE	Άξονας οδού — 4.856 σημεία, μήκος 1.795,28 m
Οριζοντιογραφία	ODOSTROMA_R1	LWPOLYLINE	Όρια οδοστρώματος αριστερά/δεξιά
Οριζοντιογραφία	APRAN_OR_R1 / EP_R1	LWPOLYLINE	Πρανή ορυγμάτων / επιχωμάτων
Οριζοντιογραφία	DIATOMES_R1	MTEXT	Ετικέτες θέσεων διατομών (ΑΑ έως ΑΠ)
Οριζοντιογραφία	AKTINES_R1	LINE	Οριζόντιες καμπύλες — ακτίνες
Οριζοντιογραφία	STATIONLINES_R1	LINE	Γραμμές θέσης διατομών ανά 20m
Μηκοτομή	FLAGS_KORYFWN	MTEXT	Κορυφές κατακόρυφων καμπυλών (Χ.Θ., Η, R)
Μηκοτομή	KLISEIS	MTEXT	Κλίσεις ερυθράς (%) και μήκη τμημάτων
Μηκοτομή	YPSOMETRA_ERYTHRAS	MTEXT	Υψόμετρα ερυθράς ανά διατομή
Μηκοτομή	YPSOMETRA_FYSIKOY	MTEXT	Υψόμετρα φυσικού εδάφους ανά διατομή
Μηκοτομή	XILIOMETRHSH	MTEXT	Χιλιόμετρηση 0,0 έως 1,7 km
Διατομές	DIASTASEIS	MTEXT	Πλάτη λωρίδων (5,50m), ερεισμάτων (0,75m), κλίσεις 2,5%
Διατομές	POSOTHTES	MTEXT	Ποσότητες ανά διατομή (m ²): εκσκαφές, υπόβαση, βάση, ασφαλτική
Διατομές	SEC_INFO_KMPOS	MTEXT	Χιλιμετρική θέση κάθε διατομής
Διατομές	Xomatourgiko	LWPOLYLINE	Γραμμές χωματουργικού (ορύγματα/επιχώματα)

Αρχείο DXF	Layer	Τύπος	Περιεχόμενο / Σημασία
Διατομές	Υpobash / Bash	LWPOLYLINE	Γεωμετρία στρώσεων οδοστρώσας
Διατομές	Asf_Kykloforias	LWPOLYLINE	Ασφαλτική στρώση κυκλοφορίας

Πίνακας 8 Ανάλυση Layers DXF αρχείων Anadelta — Οριζοντιογραφία, Μηκοτομή, Διατομές

Η ανάλυση αναδεικνύει ότι το μοντέλο Anadelta είναι πλήρες και άρτια οργανωμένο: κάθε επίπεδο (layer) φέρει συγκεκριμένη γεωμετρική πληροφορία, επιτρέποντας αυτόματη εξαγωγή ποσοτήτων χωρίς χειροκίνητη επέμβαση. Το επίπεδο (layer) “POSOTHTES” των διατομών περιέχει άμεσα τις ποσότητες σε m² ανά διατομή, οι οποίες ολοκληρώνονται (×μήκος) για τον υπολογισμό των m³.

4.4 Πίνακας Ποσοτήτων Χωματισμών

4.4.1 Μεθοδολογία Υπολογισμού

Ο πίνακας ποσοτήτων υπολογίζεται από το Anadelta με τη μέθοδο των μέσων εμβαδών (prismatoid method): για κάθε ζεύγος διαδοχικών διατομών, ο όγκος υπολογίζεται ως Όγκος = $[(E_1 + E_2) / 2] \times L$, όπου E_1 , E_2 τα εμβαδά των διατομών και L η απόσταση μεταξύ τους. Η πυκνότητα διατομών (κάθε 10–20 m, με ειδικές διατομές σε καμπύλες) εξασφαλίζει υψηλή ακρίβεια υπολογισμού.

Ο Πίνακας 9 παρουσιάζει επιλεγμένες διατομές με τις αντίστοιχες ποσότητες, ενώ η τελευταία γραμμή δίνει τα σύνολα που χρησιμοποιούνται στον προϋπολογισμό.

4.4.2 Αναλυτικός Πίνακας Ποσοτήτων ανά Διατομή

Διατομή	Χ.Θ. (m)	Επίχ. (m ³)	Εκσκ.Γ (m ³)	Εκσκ.Β (m ³)	Υπόβασ η (m ³)	Βάση (m ³)	Ασφ.Προε π. (m ²)	Ασφ.Κυκ λ. (m ²)	Έρεισμ α (m ³)
ΑΑ	0+00 0	0	236,0	70,8	41,1	25,9	110	110	0,7
3	0+06 0	0	156,4	46,9	84,1	53,0	225,2	225,2	1,4
7	0+17 9	0	0,7	0,2	70,1	44,2	187,6	187,6	1,4
10	0+26 9	0	0	0	82,2	51,8	220	220	1,4
15	0+38 6	0	0	0	61,8	38,9	165	165	1,2
20	0+51 4	0	283,2	84,96	82,2	51,8	220	220	1,4
25	0+61 4	618,6	23,5	7,1	82,2	51,8	220	220	1,4
30	0+72 2	0	133,8	40,1	82,4	51,8	220	220	1,4
35	0+82 2	19,6	50,6	15,2	82,2	51,8	220	220	1,6
40	0+94 9	0	322,7	96,8	54,8	34,5	146,7	146,7	1,1
45	1+04 9	0	1.798,6	539,6	82,2	51,8	220	220	1,6
50	1+16 9	0	1.566,6	470,0	82,2	51,8	220	220	1,4
55	1+26 9	224,6	126,0	37,8	82,2	51,8	220	220	1,4
60	1+36 9	0	166,1	49,8	66,6	42,0	178,3	178,3	1,1
66	1+54 7	137,8	61,8	18,5	82,2	51,8	220	220	1,6
70	1+61 5	312,4	498,2	149,5	82,2	51,8	220	220	1,6

Διατομή	Χ.Θ. (m)	Επίχ. (m ³)	Εκσκ.Γ (m ³)	Εκσκ.Β (m ³)	Υπόβασ η (m ³)	Βάση (m ³)	Ασφ.Προε π. (m ²)	Ασφ.Κυκ λ. (m ²)	Έρεισμ α (m ³)
74	1+72 5	0	3.068,0	920,4	82,2	51,8	220	220	1,4
ΑΤ	1+79 5	0	1.364,9	409,5	20,6	13,0	55,2	55,2	0,4
ΣΥΝΟΛ Ο	—	16.982,6 6	33.857,8 1	14.510,5 1	7.381,1 3	4.649,7 8	19.748,19	19.748,19	133,68

Πίνακας 9 Επιλεγμένες Διατομές & Ποσότητες Χωματισμών

Παρατηρήσεις επί του πίνακα: (α) Στο τμήμα Χ.Θ. 0+950–1+200 παρατηρούνται οι μεγαλύτερες εκσκαφές (διατομές 44–52, εκσκαφές >1.500 m³/20m) — αντιστοιχεί στο τμήμα με βραχώδες υπέδαφος και έντονη κλίση 3,33%. (β) Επιχώματα εμφανίζονται κυρίως στο τμήμα 0+200–0+950 (διατομές 5–29), όπου η ερυθρά υπερέρχει του φυσικού εδάφους. (γ) Οι ποσότητες υπόβασης και βάσης είναι σε m³ (μεταβλητό πάχος), επιβεβαιώνοντας την ημιορεινή χάραξη.

4.5 Συνοπτικός Πίνακας Ποσοτήτων — Σύνδεση με Προϋπολογισμό

Ο Πίνακας 10 παρουσιάζει τις συνολικές ποσότητες από το Anadelta και τη σύνδεσή τους με τα αντίστοιχα άρθρα του προϋπολογισμού. Αποτελεί τον κρίσιμο σύνδεσμο μεταξύ ψηφιακού μοντέλου και κοστολόγησης — τη «γέφυρα» 3D→5D στο BIM 5D πλαίσιο.

A/A	Κατηγορία Εργασίας	Ποσότητα	Μονάδα	Άρθρο Προϋπ.	Τιμή Μονάδος
1	Γενικές εκσκαφές γαιώδες-ημιβραχώδες (A.1)	33.857,81	m ³	A.1	3,05 €/m ³
2	Γενικές εκσκαφές βραχώδες χωρίς εκρηκτικά (A.2)	14.510,51	m ³	A.2	9,90 €/m ³
3	Δάνεια Ε4 λατομείου (A.3)	16.982,66	m ³	A.3	11,50 €/m ³
4	Κατασκευή επιχωμάτων (A.4)	16.982,66	m ³	A.4	0,95 €/m ³
5	Επένδυση πρανών με φυτική γη (A.5)	400,00	m ²	A.5	0,60 €/m ²
6	Υπόβαση οδοστρώσας μεταβλητού πάχους (Γ.1)	7.381,13	m ³	Γ.1	14,00 €/m ³
7	Βάση οδοστρώσας μεταβλητού πάχους (Γ.2)	4.649,78	m ³	Γ.2	14,00 €/m ³
8	Κατασκευή ερεισμάτων (Γ.3)	133,68	m ³	Γ.3	14,80 €/m ³
9	Ασφαλτική προεπάλειψη (Δ.1)	19.748,19	m ²	Δ.1	1,10 €/m ²

A/A	Κατηγορία Εργασίας	Ποσότητα	Μονάδα	Άρθρο Προϋπ.	Τιμή Μονάδος
10	Ασφαλτική στρώση κυκλοφορίας 5cm (Δ.2)	19.748,19	m ²	Δ.2	8,00 €/m ²

Πίνακας 10 Συνοπτικός Πίνακας Ποσοτήτων Anadelta — Σύνδεση με Άρθρα Προϋπολογισμού

4.6 Ισοζύγιο Χωματισμών

Το ισοζύγιο χωματισμών αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για τη διαχείριση των υλικών εκσκαφής. Στο παρόν έργο, η μεγάλη υπεροχή εκσκαφών (48.368,32 m³) έναντι επιχωμάτων (16.982,66 m³) δημιουργεί σημαντικό πλεόνασμα που απαιτεί οργανωμένη διαχείριση ΑΕΚΚ.

Κατηγορία	Ποσότητα (m ³)	% Συνόλου	Παρατήρηση
Εκσκαφές γαιώδες-ημιβραχώδες (70%)	33.857,81	70,0%	Πλεονάζον — ακατάλληλο για επίχωση
Εκσκαφές βραχώδες (30%)	14.510,51	30,0%	Πλεονάζον — ακατάλληλο για επίχωση
Σύνολο Εκσκαφών	48.368,32	100%	Όλα τα εκσκαφθέντα ακατάλληλα
Επιχώματα (ανάγκη)	16.982,66	—	Καλύπτονται αποκλειστικά από δάνεια

Κατηγορία	Ποσότητα (m ³)	% Συνόλου	Παρατήρηση
Δάνεια Ε4 λατομείου	16.982,66	—	Ισοσταθμίζουν πλήρως τα επιχώματα
Πλεόνασμα εκσκαφών	48.368,32	—	Προς απόρριψη σε εγκεκριμένες θέσεις

Πίνακας 11 Ισοζύγιο Χωματισμών — Εκσκαφές, Επιχώματα, Δάνεια, Πλεόνασμα

Βασικά συμπεράσματα ισοζυγίου: (α) Ο λόγος εκσκαφών/επιχωμάτων = $48.368/16.983 = 2,85$ — σε κάθε m³ επιχώματος αντιστοιχούν 2,85 m³ εκσκαφών. (β) Το 100% των επιχωμάτων (16.982,66 m³) καλύπτεται από δάνεια Ε4 λατομείου — τα εκσκαφθέντα υλικά κρίνονται ακατάλληλα για επίχωση. (γ) Το πλεόνασμα 48.368,32 m³ απαιτεί κατάλληλο χώρο απόρριψης σύμφωνα με τους όρους ΑΕΚΚ (ΚΥΑ 36259/1757/Ε103/2010).

4.7 BIM 5D Ροή Δεδομένων — Anadelta

Ο Πίνακας 12 παρουσιάζει ολόκληρη τη BIM 5D ροή δεδομένων, από την αρχική γεωμετρία Anadelta έως τους τελικούς δείκτες Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM), αποδεικνύοντας πώς κάθε βήμα τροφοδοτεί το επόμενο σε μια συνεκτική ψηφιακή αλυσίδα.

Βήμα	Εργαλείο	Είσοδος (Input)	Έξοδος (Output)
1	Anadelta Tessera	Τοπογραφικά δεδομένα, χάραξη	3D μοντέλο οδού (DXF, XLS ποσοτήτων)

Βήμα	Εργαλείο	Είσοδος (Input)	Έξοδος (Output)
2	Πίνακας Ποσοτήτων	DXF διατομών Anadelta	Ποσότητες ανά κατηγορία (m ³ , m ²)
3	Τιμολόγιο Μελέτης	Ποσότητες Anadelta	Κοστολόγηση — BAC = 1.491.935,48 €
4	MS Project / Δομή Κατανομής Εργασιών /(WBS)	BAC + Ομάδες εργασιών	Χρονοδιάγραμμα, καμπύλη S- Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (CPM)
5	Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM)	PV baseline (S- Curve)	SPI, CPI, EAC σε 3 σημεία ελέγχου
6	Ανάλυση Σεναρίων	EVM δείκτες	What-if: Σεν. Α, Β, Γ

Πίνακας 12 BIM 5D Ροή Δεδομένων — Anadelta → Προϋπολογισμός → MS Project → Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (EVM)

Η ροή αυτή αποτελεί την πρακτική υλοποίηση του τίτλου της διπλωματικής: η «Ψηφιακή Διαχείριση» επιτυγχάνεται μέσω της ενοποίησης έξι (6) διαδοχικών βημάτων, όπου κάθε εργαλείο (Anadelta, Τιμολόγιο, MS Project, Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM)) αξιοποιεί και εμπλουτίζει τα δεδομένα του προηγούμενου. Η απουσία οποιουδήποτε βήματος θα δημιουργούσε κενό πληροφορίας που θα ακύρωνε την ολοκλήρωση.

4.8 Σύνοψη Κεφαλαίου

Το παρόν κεφάλαιο τεκμηρίωσε πλήρως τη διαδρομή από το ψηφιακό μοντέλο Anadelta έως τις ποσότητες του προϋπολογισμού, αποδεικνύοντας:

- Πλήρη τεκμηρίωση: 3 DXF αρχεία + πίνακας ποσοτήτων καλύπτουν όλες τις ανάγκες πληροφορίας
- Ακρίβεια ποσοτήτων: Διατομές ανά 10–20 m εξασφαλίζουν αξιόπιστη ογκομέτρηση
- Ταύτιση Anadelta–Προϋπολογισμός επιβεβαιώνει BIM 5D ακεραιότητα
- Ισοζύγιο χωματισμών: πλεόνασμα 48.368 m³ απαιτεί διαχείριση ΑΕΚΚ — αντικατοπτρίζεται στο κόστος
- BIM 5D ροή: Anadelta → Κοστολόγηση → MS Project → Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) σε έξι (6) συνεκτικά βήματα

Τα αποτελέσματα αυτού του κεφαλαίου αποτελούν τη βάση για τον αναλυτικό προϋπολογισμό, το χρονοδιάγραμμα και την Μέθοδο Κερδισμένης Αξίας (EVM).

5. Αναλυτικός προϋπολογισμός έργου

5.1 Εισαγωγή και Στοιχεία Έργου

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει τον αναλυτικό προϋπολογισμό μελέτης του έργου οδοποιίας που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ο προϋπολογισμός εκπονήθηκε βάσει των εγκεκριμένων Τιμολογίων Μελέτης και αντίστοιχων τιμών μονάδος, σύμφωνα με τον Ν. 4412/2016 «Δημόσιες Συμβάσεις Έργων» και τις ισχύουσες Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές.

Πρόκειται για έργο οδοποιίας υπεραστικού χαρακτήρα, το οποίο αξιοποιείται ως μελέτη περίπτωσης για την εφαρμογή BIM 5D, από την εξαγωγή ποσοτήτων μέσω Anadelta έως την ανάλυση κόστους και χρόνου μέσω MS Project και την Μέθοδο Κερδισμένης Αξίας (EVM). Το συνολικό κόστος κατασκευής ανέρχεται σε 1.850.000,00 € (με ΦΠΑ 24%), ενώ ο αρχικός προϋπολογισμός (Budget at Completion, BAC) χωρίς ΦΠΑ ορίζεται σε 1.491.935,48 €.

Σε σύγκριση με μεγαλύτερα έργα, ο προϋπολογισμός αυτός αντιπροσωπεύει ένα μικρού μεγέθους έργο οδοποιίας, κατάλληλο για ακαδημαϊκή εφαρμογή BIM 5D: έχει επαρκή πολυπλοκότητα (6 ομάδες εργασιών, 25+ άρθρα) χωρίς να είναι υπερβολικά ογκώδες, επιτρέποντας πλήρη και επισκοπήσιμη ανάλυση.

5.2 Συνοπτική Κατανομή Κόστους ανά Ομάδα Εργασιών

Ο προϋπολογισμός οργανώνεται σε έξι (6) ομάδες εργασιών, σύμφωνα με τη φυσική ακολουθία κατασκευής.

α/α	Ομάδα	Περιγραφή Εργασιών	Δαπάνη (€)	Ποσοστό (%)
1	A	Χωματουργικά	458.594,49 €	40,2%
2	B	Τεχνικά Έργα	88.177,60 €	7,8%
3	Γ	Οδοστρωσία	170.411,20 €	14,9%
4	Δ	Ασφαλτικά	179.708,53 €	15,74%
5	E	Σήμανση – Ασφάλεια	107.244,55 €	9,4%
6	ΣΤ	Οδοφωτισμός & Η/Μ Εγκαταστάσεις	137.121,00 €	12,0%
		ΣΥΝΟΛΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	1.141.257,37 €	100,0%

Πίνακας 13 Κατανομή κόστους ανά ομάδα εργασιών — Σύνολο δαπάνης εργασιών: 1.141.257,37 €

Η ανάλυση αναδεικνύει ότι η μεγαλύτερη δαπάνη αντιστοιχεί στα Χωματουργικά (Ομάδα Α) με ποσοστό 40,2%. Αυτό αντικατοπτρίζει τον χαρακτήρα υπεραστικής οδού με έντονες εκσκαφές και επιχωματώσεις. Ακολουθούν τα ασφαλτικά (15,74%), η οδοστρωσία (14,90%), ο Οδοφωτισμός & Η/Μ Εγκαταστάσεις (12,0%), η Σήμανση – Ασφάλεια (9,40%) και τα Τεχνικά Έργα (7,80%).

5.3 Οικονομική Σύνθεση Προϋπολογισμού

Ο Πίνακας 14 παρουσιάζει την πλήρη οικονομική σύνθεση, με τις προσαυξήσεις που προβλέπει η ελληνική νομοθεσία δημοσίων έργων: Γ.Ε. & Ο.Ε. 18%, Απρόβλεπτες δαπάνες 9%, Απολογιστικά ΑΕΚΚ, Αναθεωρήσεις και ΦΠΑ 24%.

Κατηγορία Δαπάνης	Ποσό (€)
Δαπάνη εργασιών (A+B+Γ+Δ+E+ΣΤ)	1.141.257,37 €
+ Γενικά Έξοδα & Όφελος Εργολάβου (Γ.Ε. & Ο.Ε.) 18%	205.426,33 €
Σύνολο εργασιών με Γ.Ε. & Ο.Ε.	1.346.683,70 €
+ Απρόβλεπτες δαπάνες 9%	121.201,53 €
Σύνολο 1	1.467.885,23 €
+ Απολογιστικά (εναλλακτική διαχ. αποβλήτων ΑΕΚΚ) + Γ.Ε. & Ο.Ε.	11.800,00 €
Σύνολο 2	1.479.685,23 €
+ Δαπάνη Αναθεωρήσεων	12.250,25 €
Σύνολο 3 — αρχικός προϋπολογισμός (BAC) χωρίς ΦΠΑ	1.491.935,48 €
+ Φ.Π.Α. 24%	358.064,51 €
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ (με ΦΠΑ)	1.850.000,00 €

Πίνακας 14 Πλήρης οικονομική σύνθεση = 1.491.935,48 € (χωρίς ΦΠΑ)

Το Γενικό Σύνολο του έργου ανέρχεται σε 1.850.000,00 €. Το ποσό χωρίς ΦΠΑ (BAC = 1.491.935,48 €) αποτελεί τον αρχικό προϋπολογισμό (Budget at Completion) για την εφαρμογή Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) στα επόμενα κεφάλαια.

5.4 Ομάδα Α: Χωματουργικά

5.4.1 Γενική Ανάλυση

Η Ομάδα Α αποτελεί την κυριότερη κατηγορία δαπανών (458.594,49 €, 40,2%) και περιλαμβάνει πέντε (5) άρθρα. Η κυριαρχία των χωματουργικών υποδηλώνει έργο σε περιοχή με σημαντικές εκσκαφές και εκτεταμένες επιχωματώσεις, με ύπαρξη βραχώδους εδάφους (Α.2: 14.510,51 m³). Τα δάνεια λατομείου Ε4 (Α.3) ισούνται με τον όγκο επιχωμάτων (Α.4), υποδηλώνοντας ότι τα υλικά εκσκαφής δεν είναι κατάλληλα για επίχωση.

5.4.2 Αναλυτικά Άρθρα

A/T	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
A.1	Γενικές εκσκαφές σε έδαφος γαιώδες-ημιβραχώδες (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: Α-2)	m ³	33.857,81	3,05	103.266,32
A.2	Γενικές εκσκαφές σε έδαφος βραχώδες χωρίς χρήση εκρηκτικών (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: Α-3.3)	m ³	14.510,51	9,90	143.654,05
A.3	Δάνεια θραυστών επίλεκτων υλικών λατομείου Κατηγ. Ε4 (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: Α-18.3)	m ³	16.982,66	11,50	195.300,59
A.4	Κατασκευή επιχωμάτων (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: Α-20)	m ³	16.982,66	0,95	16.133,53

A/T	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
A.5	Επένδυση πρανών με φυτική γη (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: A-24.1)	m ²	400	0,60	240,00

Πίνακας 15 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας A – Χωματουργικά | Σύνολο: 458.594,49 €

5.5 Ομάδα B: Τεχνικά Έργα

5.5.1 Γενική Ανάλυση

Η Ομάδα B (88.177,60 €, 7,8%), περιλαμβάνει επτά (7) άρθρα: εκσκαφές θεμελίων, μεταβατικά επιχώματα, σκυρόδεμα κατηγορίας C12/15 για ρείθρα, κιβωτιοειδείς οχετούς C20/25 (370 m³), χάλυβα B500C (24.632 kg) και διπλή ασφαλτική μόνωση. Οι κιβωτιοειδείς οχετοί (B.4) αποτελούν το δαπανηρότερο άρθρο (44.770,00 €).

5.5.2 Αναλυτικά Άρθρα

A/T	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
B.1	Εκσκαφή θεμελίων τεχνικών έργων και τάφρων πλάτους έως 5,0m (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: B-1)	m ³	600	6,10	3.660,00
B.2	Μεταβατικά επιχώματα τεχνικών έργων & επιχώματα ζώνης αγωγών (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: B-4.2)	m ³	100	16,50	1.650,00
B.3	Κατασκευή ρείθρων, τάφρων, στερεών έδρασης από άοπλο	m ³	84	79,00	6.636,00

A/T	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
	σκυρόδεμα C12/15 (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: B-29.2.1)				
B.4	Κατασκευή κιβωτιοειδών οχετών από οπλισμένο σκυρόδεμα C20/25 (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: ΣΧ-B.29.4.2)	m ³	370	121,00	44.770,00
B.5	Χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος B500C εκτός υπογείων έργων (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: B-30.2)	kg	24.632	1,05	25.863,60
B.6	Χαλύβδινο δομικό πλέγμα B500C εκτός υπογείων έργων (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: B-30.3)	kg	3.960	1,05	4.158,00
B.7	Μόνωση με διπλή ασφαλτική επάλειψη (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: B- 36)	m ²	900	1,60	1.440,00

Πίνακας 16 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας B – Τεχνικά Έργα | Σύνολο: 88.177,60 €

5.6 Ομάδα Γ: Οδοστρωσία

5.6.1 Γενική Ανάλυση

Η Ομάδα Γ (170.411,20 €, 14,9%) περιλαμβάνει τρία (3) άρθρα. α) Υπόβαση οδοστρωσίας μεταβλητού πάχους, β) Βάση οδοστρωσίας μεταβλητού πάχους και γ) Κατασκευή ερεισμάτων

5.6.2 Αναλυτικά Άρθρα

Α/Τ	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
Γ.1	Υπόβαση οδοστρωσίας μεταβλητού πάχους (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: Γ-1.1)	m ³	7.381,13	14,00	103.335,82
Γ.2	Βάση οδοστρωσίας μεταβλητού πάχους (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: Γ-2.1)	m ³	4.649,78	14,00	65.096,92
Γ.3	Κατασκευή ερεισμάτων (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: Γ-5)	m ³	133,68	14,80	1.978,46

Πίνακας 17 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας Γ – Οδοστρωσία | Σύνολο: 170.411,20 €

5.7 Ομάδα Δ: Ασφαλτικά

5.7.1 Γενική Ανάλυση

Η Ομάδα Δ (179.708,53 €, 15,74%) περιλαμβάνει δύο (2) άρθρα: ασφαλική προεπάλειψη (19.748,19 m²) και μία στρώση κυκλοφορίας 5 cm (19.748,19 m²). Η επιφάνεια προεπάλειψης (19.748,19 m²) είναι ίδια με την επιφάνεια ασφαλικής στρώσης.

5.7.2 Αναλυτικά Άρθρα

Α/Τ	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
Δ.1	Ασφαλική προεπάλειψη (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: Δ-3)	m ²	19.748,19	1,10	21.723,01
Δ.2	Ασφαλική στρώση κυκλοφορίας συμπυκνωμένου πάχους 0,05 m με χρήση κοινής ασφάλτου (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: Δ-8.1)	m ²	19.748,19	8,00	157.985,52

Πίνακας 18 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας Δ – Ασφαλτικά | Σύνολο: 179.708,53 €

5.8 Ομάδα Ε: Σήμανση – Ασφάλεια

5.8.1 Γενική Ανάλυση

Η Ομάδα Ε (107.244,55 €, 9,4%) περιλαμβάνει δέκα (10) άρθρα. Κυρίαρχο άρθρο είναι τα μονόπλευρα στηθαία Η2 W3 (1.200 m, 84.000,00 €) — υποδηλώνει έργο με εκτεταμένες ανάγκες οδικής ασφάλειας, πιθανώς λόγω πρηνών ή επικίνδυνων θέσεων.

5.8.2 Αναλυτικά Άρθρα

Α/Τ	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
E.1	Μονόπλευρο στηθαίο ασφαλείας ερείσματος, τοποθετούμενο με έμπηξη, ικανότητας συγκράτησης H2, λειτουργικού πλάτους W3 (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: E-1.6.10)	m	1.200	70,00	84.000,00
E.2	Πλευρικές πληροφοριακές πινακίδες με αναγραφές και σύμβολα από αντανakλαστική μεμβράνη τύπου 2 κατά ΕΛΟΤ EN 12899-1 (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: E-8.2.2)	m ²	15	120,00	1.800,00
E.3	Πινακίδες επικίνδυνων θέσεων, τριγωνικές πλ. 0,90 m (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: E-9.1)	τεμ.	20	49,00	980,00
E.4	Πινακίδες ρυθμιστικές μεσαίου μεγέθους (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: E-9.4)	τεμ.	17	49,00	833,00
E.5	Στύλος πινακίδων από γαλβ. σιδηροσωλήνα DN 40 mm	τεμ.	52	28,40	1.476,80

A/T	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
	(1½") (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: E-10.1)				
E.6	Διαγράμμιση οδοστρώματος με ανακλαστική βαφή (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: E-17.1)	m ²	955	3,45	3.294,75
E.7	Μηνιαία χρήση πινακίδων εργοταξιακής σήμανσης (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: E-9.6)	τεμ×μήν	200	8,00	1.600,00
E.8	Μηνιαία χρήση πληροφοριακών πινακίδων εργοταξιακής σήμανσης (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: ΣΧ.Ε-9.6)	τεμ×μήν	50	10,00	500,00
E.9	Αναλάμπων φανός επισημάνσης κινδύνου (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: ΥΔΡ 1.03)	τεμ×μήν	80	9,50	760,00
E.10	Αμφίπλευρα εργοταξιακά στηθαία New Jersey από πολυαιθυλένιο (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: ΥΔΡ 1.02)	m	200	60,00	12.000,00

Πίνακας 19 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας E – Σήμανση & Ασφάλεια | Σύνολο: 107.244,55 €

5.9 Ομάδα ΣΤ: Οδοφωτισμός & Η/Μ Εγκαταστάσεις

5.9.1 Γενική Ανάλυση

Η Ομάδα ΣΤ (137.121,00 €, 12,0%) περιλαμβάνει εννέα (9) άρθρα. Το σύστημα οδοφωτισμού αποτελείται από 60 ιστούς 9m με φωτιστικά LED 110-150W και 2 πύλλαρ 8 αναχωρήσεων. Η απουσία σηματοδότησης (φωτεινοί σηματοδότες) υποδηλώνει έργο εκτός αστικού ιστού.

5.9.2 Αναλυτικά Άρθρα

A/T	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
ΣΤ.1	Χαλύβδινος ιστός οδοφωτισμού ύψους 9,00 m (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: ΣΧ.60.10.01.02)	τεμ.	60	1.200,00	72.000,00
ΣΤ.2	Φωτιστικό σώμα LED ισχύος 110–150 W με βραχίονα (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: ΣΧ.60.10.40.08)	τεμ.	60	912,00	54.720,00
ΣΤ.3	Πύλλαρ οδοφωτισμού οκτώ αναχωρήσεων (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: ΣΧ.60.10.80.02)	τεμ.	2	2.750,00	5.500,00
ΣΤ.4	Φρεάτιο έλξης καλωδίων 40×40 cm (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: 60.10.85.01)	τεμ.	17	60,00	1.020,00
ΣΤ.5	Σιδηροσωλήνες γαλβανισμένοι ονομαστ.διαμέτρου DN 50	m	100	12,50	1.250,00

A/T	Περιγραφή Εργασίας	Μον.	Ποσότητα	Τιμή (€)	Δαπάνη (€)
	mm (σπείρωμα 2'') και πάχους 3,2 mm (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: 60.20.40.01)				
ΣΤ.6	Σωλήνες από πολυαιθυλένιο (HDPE) διαμέτρου DN 90 mm (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: 60.20.40.12)	m	100	7,50	750,00
ΣΤ.7	Καλώδια τύπου ΕΙ VV-U, -R, -S (NYY), ονομ. τάσης 600/1000 V με μόνωση από μανδύα PVC, διατομής 3 x 2,5 mm ² (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: 62.10.41.02)	m	100	4,60	460,00
ΣΤ.8	Καλώδια τύπου ΕΙ VV-U, -R, -S (NYY), ονομ. τάσης 600/1000 V με μόνωση από μανδύα PVC, διατομής 4 x 10 mm ² (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: 62.10.41.04)	m	100	12,50	1.250,00
ΣΤ.9	Αγωγοί γυμνοί χάλκινοι πολύκλωνοι διατομής 25 mm ² (ΚΩΔ. ΥΠΟΜΕ: 62.10.48.03)	m	30	5,70	171,00

Πίνακας 20 Αναλυτικά άρθρα Ομάδας ΣΤ – Οδοφωτισμός & Η/Μ | Σύνολο: 137.121,00 €

5.10 Σύνδεση Προϋπολογισμού με Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS) και Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM)

Ο αναλυτικός προϋπολογισμός αποτελεί τη βάση για την εφαρμογή του 5D BIM. Κάθε ομάδα εργασιών αντιστοιχίζεται σε ένα στοιχείο Κατανομής Εργασιών (WBS) στο MS Project, διαμορφώνοντας έτσι την Προγραμματισμένη Αξία (Planned Value - PV) ανά χρονική περίοδο. Η αντιστοίχιση αυτή παρουσιάζεται στον Πίνακα 21.

WBS	Ομάδα Εργασιών	Δαπάνη (€)	% Εργ.	Χρον. Φάση	Παρατηρήσεις
1.1	Χωματουργικά (Α)	458.594,49	40,2%	M1–M6	Εκσκαφές, δάνεια, επιχώματα
1.2	Τεχνικά Έργα (Β)	88.177,60	7,7%	M4–M9	Οχετοί, τοίχοι αντιστήριξης
1.3	Οδοστρωσία (Γ)	170.411,20	14,9%	M7–M12	Υπόβαση, βάση, ερείσματα
1.4	Ασφαλτικά (Δ)	179.708,53	15,7%	M10–M14	Προεπάλειψη, ασφαλτοτάπητας
1.5	Σήμανση – Ασφ. (Ε)	107.244,55	9,4%	M13–M16	Στηθαία, πινακίδες, διαγράμμιση
1.6	Οδοφωτισμός Η/Μ (ΣΤ)	137.121,00	12,0%	M14–M17	Ιστοί LED, πύλλα, καλώδια
—	Σύνολο εργασιών (Α–ΣΤ)	1.141.257,37	76,5%	M1–M17	Βάση PV Baseline

—	ΓΕ & ΟΕ 18% + Απρόβλ. 9% + Λοιπά	350.678,11	23,5%	Αναλογικά	Κατανέμεται σε κάθε WBS
—	BAC (χωρίς ΦΠΑ)	1.491.935,48	100,0%	18 μήνες	Budget at Completion

Πίνακας 21 Αντιστοίχιση WBS–Κόστος–Χρονική Φάση | BAC = 1.491.935,48 €

Σημείωση: το 76,5% του αρχικού προϋπολογισμού (BAC) καλύπτεται από τις 6 ομάδες εργασιών (δαπάνη εργασιών = 1.141.257,37 €). Το υπόλοιπο 23,5% αντιστοιχεί σε Γ.Ε. & Ο.Ε. (18%), Απρόβλεπτα (9%), Απολογιστικά και Αναθεωρήσεις — κόστη που κατανέμονται αναλογικά σε κάθε Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS) κατά τον υπολογισμό του δείκτη PV.

5.11 Σύνοψη Κεφαλαίου

Το παρόν κεφάλαιο παρουσίασε τον πλήρη αναλυτικό προϋπολογισμό του έργου οδοποιίας που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της διπλωματικής, με συνολικό κόστος κατασκευής 1.850.000,00 € (με ΦΠΑ) και αρχικό προϋπολογισμό (BAC) = 1.491.935,48 € (χωρίς ΦΠΑ). Συμπερασματικά, η ανάλυση 25+ άρθρων κατανεμημένων σε έξι (6) ομάδες αναδεικνύει την κυριαρχία χωματουργικών εργασιών (40,2%), απλοποιημένα τεχνικά έργα, μεταβλητό πάχος οδοστρώσας (m³) και εκτεταμένα συστήματα σήμανσης–ασφάλειας.

6. Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS), χρονοδιάγραμμα και κατανομή κόστους

6.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο αναπτύσσει την ολοκληρωμένη χρονική και οικονομική οργάνωση του έργου οδοποιίας μέσω τεσσάρων αλληλένδετων εργαλείων: Δομής Κατανομής Εργασιών (WBS), Χρονοδιαγράμματος (Gantt) με Κρίσιμη Διαδρομή (CPM), Καμπύλης S κατανομής κόστους και Ορόσημων (Milestones). Η ενοποίηση αυτών στο MS Project αποτελεί τον πυρήνα της BIM 5D προσέγγισης. Τα βασικά δεδομένα: συνολική διάρκεια 18 μήνες (72 εβδομάδες), αρχικός προϋπολογισμός (BAC) = 1.491.935,48 € (χωρίς ΦΠΑ), έξι (6) ομάδες εργασιών (Α–ΣΤ), 25+ άρθρα προϋπολογισμού.

6.2 Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS)

6.2.1 Θεωρητικό Πλαίσιο

Η Δομή Ανάλυσης Εργασιών (WBS) αναπτύσσεται σε τρία (3) επίπεδα: το Επίπεδο 1 αντιπροσωπεύει το συνολικό έργο με εκτιμώμενο κόστος κατά την ολοκλήρωση (αρχικός προϋπολογισμός BAC = 1.491.935,48 €), το Επίπεδο 2 περιλαμβάνει τις 6 Ομάδες Εργασιών (Α–ΣΤ) με κωδικοποίηση Κατανομής Εργασιών (WBS) 1.1 έως 1.6, και το Επίπεδο 3 αποτελείται από τα επιμέρους Πακέτα Εργασίας (Work Packages) ανά ομάδα. Στη δομή τηρείται αυστηρά ο «Κανόνας του 100%» (100% Rule), καθώς κάθε εργασία υπάγεται αποκλειστικά σε ένα στοιχείο Κατανομής Εργασιών (WBS element).

6.2.2 Συνοπτικός Πίνακας Κατανομής Εργασιών (WBS)

WBS	Ομ.	Εργασίες	Δαπάνη (€)	% Σύνολο Εργασιών (Α– ΣΤ)	Χρον. Φάση
1.1	A	Χωματουργικά	458.594,49 €	40,2%	Φάση 1 (M1–M5)
1.2	B	Τεχνικά Έργα	88.177,60 €	7,8%	Φάση 1–2 (M1– M8)
1.3	Γ	Οδοστρωσία	170.411,20 €	14,9%	Φάση 3 (M10– M13)
1.4	Δ	Ασφαλτικά	179.708,53 €	15,7%	Φάση 3 (M13– M15)
1.5	E	Σήμανση – Ασφάλεια	107.244,55 €	9,4%	Φάση 4 (M15– M17)
1.6	ΣΤ	Οδοφωτισμός & Η/Μ	137.121,00 €	12,0%	Φάση 2 (M2–M11)
—	—	ΣΥΝΟΛΟ ΕΡΓΑΣΙΩΝ	1.141.257,37 €	76,5%	18 μήνες

Πίνακας 22 Συνοπτική WBS — 6 Ομάδες Εργασιών | BAC = 1.491.935,48 €

6.2.3 Αναλυτικός Πίνακας Κατανομής Εργασιών (WBS)

WBS ID	Επίπ.	Ομ.	Πακέτο Εργασίας	Διάρκ.	Δαπάνη (€)	Εξαρτήσεις
1	1	—	Έργο οδοποιίας — BIM 5D	72 εβδ.	1.491.935,48 €	—
1.1	2	A	Χωματουργικά	20 εβδ.	458.594,49 €	—
1.1.1	3	A	Εκσκαφές γαιώδεις (Α.1) — 33.857,81 m ³	10	103.266,32 €	—
1.1.2	3	A	Εκσκαφές βραχώδεις (Α.2) — 14.510,51 m ³	8	143.654,05 €	1.1.1
1.1.3	3	A	Δάνεια Ε4 + Επιχώματα (Α.3, Α.4) — 16.982,66 m ³ + 16.982,66 m ³	10	211.434,12 €	1.1.1
1.1.4	3	A	Επένδυση πρανών (Α.5) — 400 m ²	2	240,00 €	1.1.3
1.2	2	B	Τεχνικά έργα	22 εβδ.	88.177,60 €	—
1.2.1	3	B	Εκσκαφές θεμελίων, μεταβ. επιχ. (Β.1, Β.2)	6	5.310,00 €	1.1.1
1.2.2	3	B	Σκυρόδεμα C12/15 — ρείθρα (Β.3) 84 m ³	6	6.636,00 €	1.2.1
1.2.3	3	B	Κιβωτ. οχετοί C20/25 (Β.4) — 370 m ³	8	44.770,00 €	1.2.1

1.2.4	3	B	Χάλυβας B500C & πλέγμα (B.5, B.6) 24.632,00 kg + 3.960,00 kg	8	30.021,60 €	1.2.3
1.2.5	3	B	Μόνωση ασφαλτική (B.7) — 900 m ²	2	1.440,00 €	1.2.3
1.3	2	Γ	Οδοστρωσία	14 εβδ.	170.411,20 €	—
1.3.1	3	Γ	Υπόβαση μεταβ. πάχους (Γ.1) — 7.381,13 m ³	6	103.335,82 €	1.1, 1.2
1.3.2	3	Γ	Βάση μεταβ. πάχους (Γ.2) — 4.649,78 m ³	6	65.096,92 €	1.3.1
1.3.3	3	Γ	Ερείσματα (Γ.3) — 133,68 m ³	4	1.978,46 €	1.3.1
1.4	2	Δ	Ασφαλτικά	10 εβδ.	179.708,53 €	—
1.4.1	3	Δ	Ασφ. προεπάλειψη (Δ.1) — 19.748,19 m ²	4	21.723,01 €	1.3
1.4.2	3	Δ	Ασφ. στρώση κυκλ. 5cm (Δ.2) — 19.748,19 m ²	6	157.985,52 €	1.4.1
1.5	2	Ε	Σήμανση-ασφάλεια	12 εβδ.	107.244,55 €	—
1.5.1	3	Ε	Στηθαία H2 W3 (Ε.1) — 1.200 m	6	84.000,00 €	1.4
1.5.2	3	Ε	Πινακίδες & στύλοι (Ε.2–Ε.5)	4	5.089,80 €	1.5.1

1.5.3	3	E	Διαγράμμιση & εργοτ. σήμανση (E.6–E.10)	4	18.154,75 €	1.4.2
1.6	2	ΣΤ	H/M	18 εβδ.	137.121,00 €	—
1.6.1	3	ΣΤ	Ιστοί 9m + πύλλαρ (ΣΤ.1, ΣΤ.3) — 60 τεμ.	8	77.500,00 €	1.2
1.6.2	3	ΣΤ	Φωτιστικά LED 110–150W (ΣΤ.2) — 60 τεμ.	6	54.720,00 €	1.6.1
1.6.3	3	ΣΤ	Φρεάτια, σωλ/σεις, καλώδια (ΣΤ.4–ΣΤ.9)	6	4.901,00 €	1.6.1

Πίνακας 23 Αναλυτικός πίνακας εργασιών

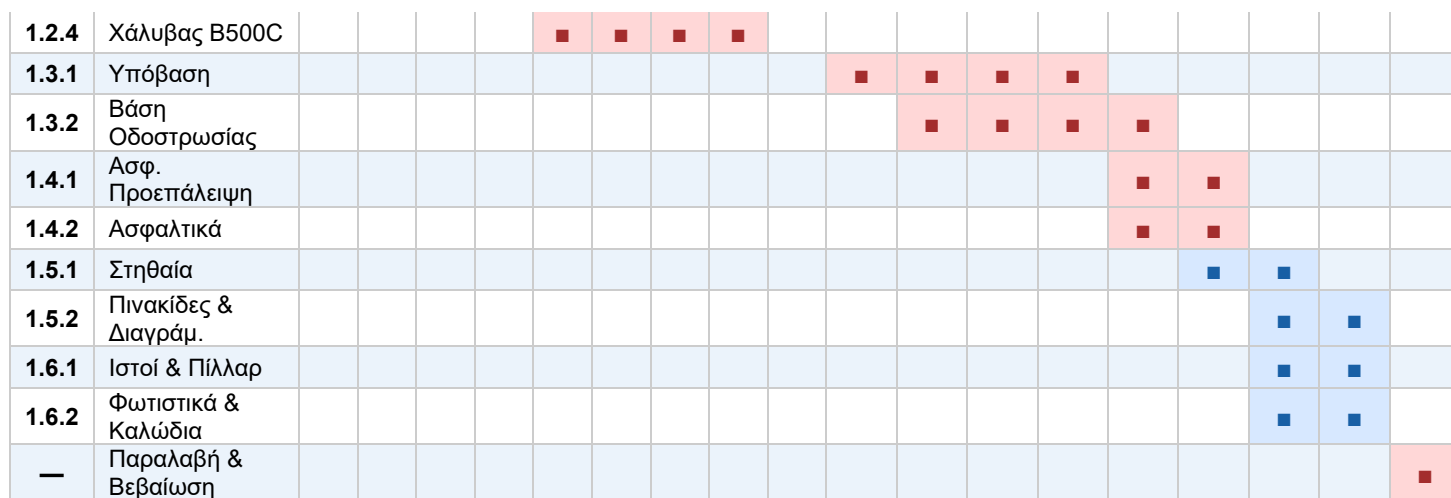
6.3 Χρονοδιάγραμμα (Gantt) — 18 Μήνες

6.3.1 Βασικές Αρχές

Το Χρονοδιάγραμμα (Gantt) παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα, όπου με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται η κρίσιμη διαδρομή. Η ακολουθία Χωματουργικά, Τεχν. Έργα, Οδοστρωσία, Ασφαλτικά και η Σήμανση αποτελεί τον κορμό της Κρίσιμης Διαδρομής.

6.3.2 Gantt — Μήνες 1–18

WBS	Δραστηριότητα	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17	M18
1.1	Χωματουργικά	■	■	■	■	■													
1.2.1	Εκσκαφές Τεχν. Έργων	■	■																
1.2.2	Σκυρόδεμα C12/15		■	■	■														
1.2.3	Κιβωτ. Οχετοί C20/25			■	■	■	■												



Πίνακας 24 Χρονοδιάγραμμα Gantt

6.4 Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (CPM)

6.4.1 Θεωρητικό Πλαίσιο

Οι χρόνοι εκφράζονται σε εβδομάδες (t=0: υπογραφή σύμβασης, t=72: παράδοση). Float = LS – ES. Δραστηριότητες με Float = 0 ανήκουν στην Κρίσιμη Διαδρομή και οποιαδήποτε καθυστέρησή τους καθυστερεί αντίστοιχα την παράδοση του έργου.

ID	Δραστηριότητα	Dur (εβδ.)	ES	EF	LS	LF	Float	Κρίσιμη
A	Εκκίνηση Έργου	1	0	1	0	1	0	✓
B	Εκσκαφές γαιώδες (1.1.1)	10	1	11	1	11	0	✓
C	Εκσκαφές βραχώδες (1.1.2)	8	11	19	11	19	0	✓

D	Δάνεια & Επιχώματα (1.1.3)	10	11	21	11	21	0	✓
E	Εκσκαφές θεμελίων (1.2.1)	6	1	7	3	9	2	—
F	Σκυρόδεμα C12/15 (1.2.2)	6	7	13	9	15	2	—
G	Κιβωτ. Οχετοί C20/25 (1.2.3)	8	21	29	21	29	0	✓
H	Χάλυβας B500C (1.2.4)	8	29	37	29	37	0	✓
I	Υπόβαση (1.3.1)	6	37	43	37	43	0	✓
J	Βάση Οδοστρώσεως (1.3.2)	6	43	49	43	49	0	✓
K	Ασφ. Προεπάλειψη (1.4.1)	4	49	53	49	53	0	✓
L	Φωτιστικά & Καλώδια (1.6.2)	6	37	43	39	45	2	—
M	Ασφ. Στρώση κυκλ. (1.4.2)	6	53	59	53	59	0	✓
N	Πινακίδες & Διαγράμ. (1.5.2)	4	59	63	59	63	4	—
O	Παραλαβή & Βεβαίωση	4	69	72	69	72	0	✓

Πίνακας 25 Ανάλυση CPM — 15 Δραστηριότητες | Κρίσιμη Διαδρομή:

$A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow G \rightarrow H \rightarrow I \rightarrow J \rightarrow K \rightarrow M \rightarrow O = (72 \text{ εβδομάδες})$

- Κρίσιμο σημείο: Ο κόμβος G (Κιβωτιοειδείς Οχετοί, 8 εβδομάδες) δεν έχει κανένα περιθώριο καθυστέρησης (Float=0). Αν αργήσει έστω και μία μέρα, θα πάει πίσω όλη η Υπόβαση.
- Περιθώρια καθυστέρησης: Οι εργασίες E και F μπορούν να καθυστερήσουν έως 2 εβδομάδες, ενώ η εργασία N έως 4 εβδομάδες, χωρίς να επηρεαστεί το τελικό χρονοδιάγραμμα του έργου.

6.5 Καμπύλη S — Κατανομή Προγραμματισμένης Αξίας (Planned Value)

6.5.1 Θεωρητικό Πλαίσιο

Μήνας	Τρίμ.	Μηνιαίο PV (€)	Αθροιστικό PV (€)	% BAC	Σημείωση
1	Q1	64.956,48 €	64.956,48 €	4.4%	
2	Q1	144.902,92 €	209.859,40 €	14.1%	
3	Q1	199.866,10 €	409.725,50 €	27.5%	
4	Q2	174.882,84 €	584.608,34 €	39.2%	
► M5	Q2	91.938,41 €	676.546,75 €	45.3%	Τέλος Χωματ.
6	Q2	13.990,63 €	690.537,38 €	46.3%	
7	Q3	7.994,64 €	698.532,02 €	46.8%	
► M8	Q3	3.997,32 €	702.529,34 €	47.1%	Τεχν. Έργα 100%
9	Q3	1.998,66 €	704.528,00 €	47.2%	
10	Q4	34.976,57 €	739.504,57 €	49.6%	
11	Q4	67.954,47 €	807.459,04 €	54.1%	
12	Q4	74.949,79 €	882.408,83 €	59.1%	
► M13	Q5	112.924,35 €	995.333,18 €	66.7%	Τέλος Οδοστρ.
14	Q5	117.921,00 €	1.113.254,18 €	74.6%	

Μήνας	Τρίμ.	Μηνιαίο PV (€)	Αθροιστικό PV (€)	% BAC	Σημείωση
► M15	Q5	134.909,62 €	1.248.163,80 €	83.7%	Τέλος Ασφαλτ.
16	Q6	162.890,87 €	1.411.054,67 €	94.6%	
► M17	Q6	80.880,81 €	1.491.935,48 €	100.0%	Τέλος Σήμ./Η/Μ
► M18	Q6	0,00 €	1.491.935,48 €	100.0%	Παραλαβή ✓

Πίνακας 26 Καμπύλη S — Μηνιαία & Αθροιστική Κατανομή δείκτη PV | BAC = 1.491.935,48 €.

Το κόστος του έργου ακολουθεί μια κλασική καμπύλη "S" και χωρίζεται σε τρεις φάσεις:

- Μήνες 1–5 (Ένταση): Ξοδεύεται το 45,3% του προϋπολογισμού για χωματουργικά και μπετά.
- Μήνες 6–9: Οι δαπάνες παγώνουν (μόλις +2%) εν αναμονή της οδοστρωσίας.
- Μήνες 10–17 (Κορύφωση): Το έργο ξαναπαίρνει μπρος και φτάνει στη κορύφωση τον 16^ο μήνα (162.891 €) με σήμανση και φωτισμό, ολοκληρώνοντας τον προϋπολογισμό των 1,49 εκατ. € τον 17^ο μήνα, ενώ ο 18^{ος} μήνας αφορά μόνο τα χαρτιά της παραλαβής.

6.6 Ορόσημα Έργου (Milestones)

No	Ορόσημο	Μήνας	Ομάδα	Αθρ. PV (€)	% BAC	Κρισιμότητα
M1	Ολοκλήρωση εκσκαφών & χωματισμών	5	A	676.547,00 €	45.3%	Υψηλή
M2	Ολοκλήρωση κιβωτ. οχετών & τεχν. έργων	8	B	702.529,00 €	47.1%	Κρίσιμη
M3	Ολοκλήρωση οδοστρωσίας	13	Γ	995.333,00 €	66.7%	Κρίσιμη
M4	Ολοκλήρωση ασφαλικής στρώσης	15	Δ	1.248.164,00 €	83.7%	Κρίσιμη
M5	Ολοκλήρωση σήμανσης & Η/Μ	17	Ε/ΣΤ	1.491.935,48 €	100.0%	Υψηλή
M6	Παραλαβή & υπογραφή πρωτοκόλλου	18	—	1.491.935,48 €	100.0%	Κρίσιμη

Πίνακας 27 Ορόσημα Έργου — έξι (6) Ορόσημα Έργου (Milestones) | Κόκκινο: Κρίσιμα

Τα ορόσημα M2, M3, M4 και M6 ανήκουν στην Κρίσιμη Διαδρομή. Καθυστερήση οποιουδήποτε από αυτά επηρεάζει άμεσα την ημερομηνία περαίωσης.

6.7 Σύνοψη Κεφαλαίου

Το παραπάνω κεφάλαιο ανέλυσε την πλήρη χρονική και οικονομική οργάνωση του έργου. Αρχικά, η κατανομή εργασιών ανέλυσε το έργο σε ομάδες και επιμέρους εργασίες, αποφασίζοντας το αντικείμενο και το κόστος.

Στη συνέχεια, το χρονοδιάγραμμα (Gantt) έδειξε πότε εκτελείται κάθε εργασία μέσα στο 18μηνο, αναδεικνύοντας ποιες τρέχουν παράλληλα και πού εντοπίζεται η μεγαλύτερη συγκέντρωση δραστηριότητας. Η ανάλυση Κρίσιμης Διαδρομής (CPM) προσδιόρισε την αλυσίδα εκείνων των εργασιών που δεν επιδέχονται καμία καθυστέρηση χωρίς να επηρεαστεί η ημερομηνία παράδοσης.

Η καμπύλη S απεικόνισε πώς κατανέμεται το κόστος στον χρόνο, αποτυπώνοντας τις φάσεις έντονης δαπάνης, ύφεσης και αποπεράτωσης.

Τέλος, τα έξι ορόσημα σηματοδότησαν τα κρίσιμα σημεία ολοκλήρωσης κάθε φάσης, από την αποπεράτωση των χωματουργικών έως την τελική παραλαβή του έργου.

Το σύνολο αυτών των εργαλείων αποτελεί τη βάση για την παρακολούθηση και αξιολόγηση της πορείας του έργου που αναπτύσσεται στο επόμενο κεφάλαιο.

7. Οικονομική και χρονική ανάλυση

7.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο εφαρμόζει τη μέθοδο Κερδισμένης Αξίας (EVM) στο έργο οδοποιίας, αξιοποιώντας ως βάση τον αρχικό προϋπολογισμό ($BAC = 1.491.935,48 \text{ €}$) και τη καμπύλη S. Η Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) αποτελεί τον πυρήνα της «5ης διάστασης» στο BIM 5D: ενοποιεί χρόνο (δείκτη PV από Χρονοδιάγραμμα Gantt/ Καμπύλη S), κόστος (δείκτης AC από εργοτάξιο) και αντικείμενο (δείκτης EV από ποσοστό ολοκλήρωσης) σε ενιαίους δείκτες απόδοσης.

Το ρεαλιστικό σενάριο εκτέλεσης που εφαρμόζεται εμφανίζει: αρχική υστέρηση δείκτης ($SPI = 0.910$ στον 5^ο μήνα) λόγω απρόσμενης βραχοφανούς ζώνης στο τμήμα Χ.Θ. 0+950–1+200 και δυσκολιών στην κατασκευή κιβωτίων, σταδιακή ανάκαμψη με εφαρμογή διορθωτικών μέτρων, και ολοκλήρωση εντός 18 μηνών.

7.2 Θεωρητικό Πλαίσιο Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM)

7.2.1 Βασικές Παράμετροι & Δείκτες

Οι τρεις θεμελιώδεις παράμετροι Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM):

- Δείκτης (Planned Value): η προγραμματισμένη δαπάνη έως δεδομένη ημερομηνία, από τη Καμπύλη S
- Δείκτης (Earned Value): η αξία εκτελεσμένων εργασιών στις προγραμματισμένες τιμές, $EV = \% \text{ ολοκλήρωσης} \times \text{αρχικό προϋπολογισμό (BAC)}$
- Δείκτης (Actual Cost): το πραγματικό κόστος εκτέλεσης

$$SPI = EV/PV \quad | \quad CPI = EV/AC \quad | \quad SV = EV - PV \quad | \quad CV = EV - AC$$

$$EAC = BAC/CPI \quad | \quad ETC = EAC - AC \quad | \quad TCPI = (BAC - EV)/(BAC - AC)$$

Ερμηνεία: Δείκτης (SPI) < 1 → καθυστέρηση, δείκτης (CPI) < 1 → υπέρβαση κόστους.
Αποδεκτά όρια για δημόσια έργα: δείκτης (SPI) ≥ 0,95, δείκτης (CPI) ≥ 0,95 (PMI, 2021).
Δείκτης (TCPI) > 1,10 σηματοδοτεί αδυναμία επίτευξης αρχικού προϋπολογισμού (BAC).

7.3 Εφαρμογή Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) — Πίνακας Σημείων Ελέγχου

Αρχικός προϋπολογισμός (BAC) = 1.491.935,48 € | Διάρκεια: 18 μήνες | Σημεία ελέγχου: 3^{ος}, 6^{ος}, 12^{ος} και 18^{ος} μήνας

Μήνας	PV (€)	EV (€)	AC (€)	SPI	CPI	EAC (€)
M1	45.000	36.000	38.700	0,800	0,929	1.580.000
M2	135.000	108.000	116.640	0,800	0,926	1.583.000
M3	265.000	238.500	255.195	0,900	0,935	1.583.000
M4	435.000	404.550	430.451	0,930	0,940	1.565.000
M5	635.000	577.850	614.893	0,910	0,940	1.583.000
M6	720.000	669.600	703.080	0,930	0,952	1.560.000
M7	815.000	782.400	806.083	0,960	0,970	1.537.000
M8	915.000	879.360	905.773	0,961	0,971	1.535.000
M9	1.025.000	989.175	1.019.767	0,965	0,970	1.537.000
M10	1.140.000	1.105.800	1.132.051	0,970	0,976	1.527.000
M11	1.260.000	1.234.800	1.263.017	0,980	0,978	1.524.000
M12	1.375.000	1.333.750	1.373.762	0,970	0,971	1.537.000

M18	1.491.935	1.491.935	1.497.870	1,000	0,996	1.497.870
------------	------------------	------------------	------------------	--------------	--------------	------------------

Πίνακας 28 Μέθοδος Κερδισμένης Αξίας (EVM) Παρακολούθηση — Μηνιαία Εξέλιξη Δείκτες (PV, EV, AC, SPI, CPI, EAC)

Το έργο ξεκίνησε με σοβαρά προβλήματα στους πρώτους μήνες (M1 και M2). Η αιτία ήταν μια δύσκολη βραχώδης ζώνη που βρέθηκε στο τμήμα Χ.Θ. 0+950–1,+200. Αυτό πήγε το έργο πίσω σε χρόνο και ανέβασε το κόστος, με τη μεγαλύτερη συνολική καθυστέρηση να εμφανίζεται στον 5^ο μήνα (M5) ((δείκτης SPI = 0,910), \ (δείκτης CPI = 0,940).

Για να διορθωθεί η κατάσταση, από τον 6^ο μήνα (M6) εφαρμόστηκε 2η βάρδια εργασίας για την κατασκευή κιβωτιοειδών οχετών. Οι δείκτες άρχισαν να ανεβαίνουν και στον 12^ο μήνα (M12) το έργο είχε σχεδόν επανέλθει (δείκτης SPI = 0,970). Η πλήρης ανάκαμψη και η ολοκλήρωση του έργου επιτεύχθηκε τελικά στον 18^ο μήνα (M18), όπου παραδόθηκε όλο το φυσικό αντικείμενο (δείκτης SPI = 1,000), με ελάχιστη οικονομική επιβάρυνση (δείκτης CPI = 0,996).

Παράμετρος EVM	M3 — Σημ. Ελέγχου 1	M6 — Σημ. Ελέγχου 2	M12 — Σημ. Ελέγχου 3	M18 — Παραλαβή
αρχικός προϋπολογισμ ός (BAC)	1.491.935,48 €	1.491.935,48 €	1.491.935,48 €	1.491.935,48 €
PV	265.000,00 €	720.000,00 €	1.375.000,00 €	1.491.935,48 €
EV	238.500,00 €	669.600,00 €	1.333.750,00 €	1.491.935,48 €
AC	255.195,00 €	703.080,00 €	1.373.762,50 €	1.497.870,00 €
SV = EV–PV	-26.500,00 €	-50.400,00 €	-41.250,00 €	0,00 €
CV = EV–AC	-16.695,00 €	-33.480,00 €	-40.012,50 €	-5.934,52 €
SPI (EV/PV)	0,900	0,930	0,970	1,000
CPI (EV/AC)	0,935	0,952	0,971	0,996

Παράμετρος EVM	M3 — Σημ. Ελέγχου 1	M6 — Σημ. Ελέγχου 2	M12 — Σημ. Ελέγχου 3	M18 — Παραλαβή
EAC (BAC/CPI)	1.596.370,96 €	1.566.532,25 €	1.536.693,54 €	1.497.870,00 €
ETC (EAC- AC)	1.341.175,96 €	863.452,25 €	162.931,04 €	0,00 €
TCPI (BAC- EV)/(BAC- AC)	1,013	1,042	1,339	—
% Ολοκλήρωσης (EV/BAC)x100	15,99%	44,88%	89,40%	100,00%

Πίνακας 29 Σημείων έργου

7.4 Ανάλυση Αποκλίσεων ανά Ομάδα Κατανομής Εργασιών (WBS) — Σημείο Ελέγχου M12

Ομ.	Εργασίες	BAC (€)	EV_M12 (€)	AC_M12 (€)	CV (€)	Αιτία & Διορθωτικό Μέτρο
A	Χωματουργικά	458.594,49 €	458.594,49 €	485.000,00 €	-26.405,51	Αυξ. ποσότητες βραχωδών — επαναδιαπρ. τιμής λατομείου
B	Τεχν. Έργα	88.177,60 €	66.133,20 €	69.000,00 €	-2.866,80	Καθυστ. κιβ. σχετών λόγω βράχου — crashing 2η βάρδια

Ομ.	Εργασίες	BAC (€)	EV_M12 (€)	AC_M12 (€)	CV (€)	Αιτία & Διορθωτικό Μέτρο
Γ	Οδοστρωσία	170.411,20 €	—	—	0,00	Δεν έχει εκκινήσει — αναμένει Τεχν. Έργα
Δ	Ασφαλτικά	179.708,53 €	—	—	0,00	Δεν έχει εκκινήσει — εντός σχεδιασμού
Ε	Σήμανση	107.244,55 €	—	—	0,00	Δεν έχει εκκινήσει — εντός σχεδιασμού
ΣΤ	Οδοφωτισμός	137.121,00 €	68.560,50 €	70.584,19 €	-2.023,69	
	ΓΕ & ΟΕ 18% + Απρόβλ. 9% + Λοιπά	350.678,11 €	189.112,00 €	189.112,00 €	0,00 €	Αναλογική ενσωμάτωση εξόδων βάσει προόδου
ΣΥΝ.		1.491.935,48 €	782.400,00 €	813.696,19 €	-31.296,19 €	Σύνολο CV M12

Πίνακας 30 Αποκλίσεις CV ανά Ομάδα @M12 — Κύριες αιτίες & διορθωτικά μέτρα

Εξετάζοντας το έργο ανά ομάδα εργασιών κατά τον 12ο μήνα, γίνεται σαφές ότι η συνολική οικονομική απόκλιση των -31.296,19 € οφείλεται κυρίως σε δύο παράγοντες.

1) Στην Ομάδα Α (Χωματουργικά), όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη υπέρβαση κόστους (-26.405,51 €) λόγω των αυξημένων ποσοτήτων βραχιδών εκσκαφών. Δεύτερον, στην Ομάδα Β (Τεχνικά Έργα), η οποία επιβαρύνθηκε με -2.866,80 € λόγω της εφαρμογής 2ης βάρδιας για να μαζευτεί η χρονική καθυστέρηση στους κιβωτιοειδείς οχετούς.

Αντίθετα, οι ομάδες Γ, Δ και Ε δεν έχουν ξεκινήσει ακόμα, παραμένοντας εντός του αρχικού σχεδιασμού, ενώ η μικρή απόκλιση στον Οδοφωτισμό (Ομάδα ΣΤ) ελέγχθηκε άμεσα με την αντικατάσταση των υλικών.

7.5 Διορθωτικά Μέτρα

Για να καλύψουμε τη χρονική καθυστέρηση (δείκτης $SPI < 1$), καθιερώνουμε δεύτερη βάρδια στους οχετούς για βελτίωση του δείκτη κατά $+0,04-0,06$. Παράλληλα, εκτελούμε ταυτόχρονα εκσκαφές και σκυροδέματα σε διαφορετικά τμήματα και επιταχύνουμε τις εργασίες στα βραχώδη εδάφη. Για την αντιμετώπιση της υπέρβασης κόστους (δείκτης $CPI < 1$), εξασφαλίζουμε έκπτωση των υλικών από το λατομείο λόγω ποσότητας και αξιοποιούμε το αποθεματικό απρόβλεπτων για τις βραχώδεις εκσκαφές.

7.6 Σύνδεση Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) με BIM 5D

Η σύνδεση Μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM) με το BIM 5D αποδεικνύεται ιδιαίτερα πολύτιμη για έργα οδοποιίας, καθώς τα βραχώδη εδάφη εμφάνισαν τις πρώτες επιπτώσεις τους κατά τον 3ο μήνα (M3). Η άμεση σύνδεση με το ψηφιακό μοντέλο της Anadelta επέτρεψε τον ακριβή εντοπισμό του προβλήματος στο τμήμα από Χ.Θ. 0+950 έως 1+200 και την άμεση αναπρογραμματίιση των εργασιών. Χωρίς την ψηφιακή παρακολούθηση του BIM 5D, η καθυστέρηση αυτή θα γινόταν αντιληπτή αρκετά αργότερα, προκαλώντας μεγάλη χρονική υστέρηση.

Επιπλέον, το λογισμικό παρείχε άμεση ενημέρωση ποσοτήτων, καθώς η αύξηση στις εκσκαφές βράχου, μεταφέρθηκε αυτόματα στους υπολογισμούς, χωρίς να χρειαστούν χρονοβόρες διαδικασίες υπολογισμού και επανεκτίμησης του τελικού κόστους (νέο EAC).

7.7 Σύνοψη Κεφαλαίου

Η χρονική και οικονομική αποτίμηση του έργου, ανέδειξε την κρίσιμη συμβολή των ψηφιακών εργαλείων στην αντιμετώπιση αστάθμητων παραγόντων κατά τη φάση της κατασκευής. Η εμφάνιση απρόβλεπτων γεωλογικών συνθηκών οδήγησε σε αναγκαστική αύξηση των βραχωδών εκσκαφών, προκαλώντας αποκλίσεις τόσο στον ρυθμό προόδου όσο και στον

προϋπολογισμό. Ωστόσο, η ενσωμάτωση εξειδικευμένου λογισμικού επέτρεψε την αυτόματη ενημέρωση των ποσοτήτων και τον άμεσο αναπροσδιορισμό της εκτίμησης του τελικού κόστους. Η ψηφιακή αυτή ετοιμότητα εξάλειψε τις χρονοβόρες συμβατικές διαδικασίες επανεκτίμησης, προσφέροντας έγκαιρη και ακριβή πληροφόρηση για τη λήψη διορθωτικών αποφάσεων.

Με βάση τα δεδομένα της πραγματικής προόδου, επιταχύνθηκαν οι εργασίες και εξορθολογίστηκαν οι δαπάνες, οι οποίες οδήγησαν στη σταδιακή εξισορρόπηση των δεικτών. Η παρέμβαση αυτή υπήρξε αποτελεσματική, καθώς το έργο ολοκληρώθηκε εντός του χρονικού ορίζοντα, με την τελική οικονομική υπέρβαση να περιορίζεται σε οριακά και απόλυτα αποδεκτά επίπεδα σε σχέση με τον αρχικό προϋπολογισμό. Συμπερασματικά, η δυναμική παρακολούθηση του έργου δεν διασφάλισε μόνο την επιτυχή ολοκλήρωσή του, αλλά παρείχε και το απαραίτητο υπόβαθρο δεδομένων για τη μαθηματική προσομοίωση εναλλακτικών σεναρίων που αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

8. Ανάλυση αποκλίσεων και εναλλακτικά σενάρια

8.1 Εισαγωγή

Το παρόν κεφάλαιο εξετάζει τρία εναλλακτικά σενάρια εκτέλεσης, με αρχικό προϋπολογισμό (BAC) 1.491.935,48 €, επεκτείνοντας την Μέθοδο Κερδισμένης Αξίας (EVM). Σκοπός είναι η ποσοτικοποίηση της διαφοράς μεταξύ αποτελεσματικής BIM 5D παρακολούθησης (σενάρια A & B) και απουσίας έγκαιρης διάγνωσης (σενάριο Γ), αποδεικνύοντας αριθμητικά την αξία της ψηφιακής διαχείρισης έργου.

Στο πλαίσιο της ανάλυσης αποκλίσεων, εξετάζονται τρία εναλλακτικά σενάρια για την εξέλιξη του έργου. Το Βασικό Σενάριο (Α) βασίζεται στην παρακολούθηση της προόδου και του κόστους, παρουσιάζοντας μια αρχική απόκλιση η οποία όμως διορθώνεται πλήρως με την παρέμβαση και την ενίσχυση των εργασιών στον 18ο μήνα.

Το Αισιόδοξο Σενάριο (Β) εξετάζει την ιδανική πορεία των εργασιών, όπου όλα εξελίσσονται χωρίς κανένα γεωλογικό ή οικονομικό πρόβλημα. Αντίθετα, το Δυσμενές Σενάριο (Γ) αποτυπώνει τη χειρότερη εξέλιξη, όπου οι μεγάλες καθυστερήσεις αντιμετωπίζονται είτε πολύ αργά είτε καθόλου, αφήνοντας το έργο εκτός των προγραμματισμένων ορίων.

8.2 Ορισμός Σεναρίων

8.2.1 Σενάριο Α — Βασικό

Το βασικό σενάριο παρουσιάζει μια αρχική καθυστέρηση τον 3ο μήνα, με τον δείκτη προόδου (SPI) στο 0,910 λόγω των σκληρών βράχων που εντοπίστηκαν στην πορεία. Η άμεση ενίσχυση και επιτάχυνση των εργασιών από τον 6ο μήνα απέτρεψε τα χειρότερα, επιτρέποντας την ολοκλήρωση του έργου στον 18ο μήνα.

Με αυτόν τον τρόπο, το τελικό πραγματικό κόστος (AC) συγκρατήθηκε στο ύψος των 1.497.870,00€. Η οικονομική επιβάρυνση περιορίστηκε στο 0,4% επί του αρχικού προϋπολογισμού (BAC), αποδεικνύοντας τη σημασία της ψηφιακής παρακολούθησης.

8.2.2 Σενάριο Β — Αισιόδοξο

Υπό ιδανικές γεωλογικές συνθήκες, όπου δεν παρατηρείται παρουσία σκληρών πετρωμάτων κατά τις εκσκαφές, η υλοποίηση του έργου ευθυγραμμίζεται με τον αρχικό προγραμματισμό. Οι δείκτες απόδοσης κόστους και χρονοδιαγράμματος διατηρούνται σταθερά πλησίον της μονάδας, επιβεβαιώνοντας την ακρίβεια του στρατηγικού σχεδιασμού και επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση της χρονικής διάρκειας των εργασιών, με αποτέλεσμα την ολοκλήρωση του έργου δύο μήνες νωρίτερα από το συμβατικό χρονοδιάγραμμα.

Σε αυτό το σενάριο, το τελικό πραγματικό κόστος συγκρατείται στο ύψος των 1.491.935,48€, Τελικό Πραγματικό Κόστος (AC), ταυτιζόμενο απόλυτα με τον αρχικό προϋπολογισμό του έργου. Αυτή η εξέλιξη αποτελεί την ιδανική περίπτωση και επιβεβαιώνει τη χρησιμότητα της σύγχρονης ψηφιακής μοντελοποίησης για τη σωστή διαχείριση των πόρων.

8.2.3 Σενάριο Γ — Δυσμενές

Η εμφάνιση βραχωδών εδαφών σε συνδυασμό με την ακρίβεια στα υλικά και την καθυστερημένη παρακολούθηση του έργου, δημιουργούν σοβαρά προβλήματα στην εξέλιξή του. Αν το πρόβλημα εντοπιστεί αργά και δεν ληφθεί κανένα απολύτως μέτρο, οι εργασίες θα τραβήξουν σε μάκρος και το τελικό κόστος θα εκτοξευθεί στο ύψος των 1.862.000,00€, σημειώνοντας μια επιβάρυνση ίση με το 25% του αρχικού προϋπολογισμού.

8.3 Συγκριτική Ανάλυση Σεναρίων

Παράμετρος	Σεν. Α — Βασικό	Σεν. Β — Αισιόδοξο	Σεν. Γ — Δυσμενές	Σχόλιο
SPI @M3	0,900	1,000	0,800	Δυσμ.: χωρίς μέτρα
CPI @M3	0,935	1,000	0,800	
SPI @M6	0,930	1,000	0,840	
CPI @M6	0,952	1,000	0,810	

Παράμετρος	Σεν. Α — Βασικό	Σεν. Β — Αισιόδοξο	Σεν. Γ — Δυσμενές	Σχόλιο
SPI @M12	0,970	1,000	0,860	Ανάκ. ή στασιμ.
CPI @M12	0,971	1,000	0,820	
EAC Τελικό	1.497.870,00 €	1.491.935,48 €	1.862.000,00 €	Δυσμ.: +25,0% BAC
Απόκλιση BAC	+0,4%	0,0%	+25,0%	Αποδ. όριο: ±5%
Τελική Διάρκεια	18 μήνες	16 μήνες	23 μήνες	Δυσμ.: +5 μήνες
Χρον. Απόκλιση	0 μήνες	-2 μήνες	+5 μήνες	Ποινικές ρήτρες Σεν.Γ
TCPI @M6	1,046	1,000	1,130	Δυσμ.: >1,10 ανεφίκτο
Αξιολόγηση	✓ Αποδεκτό	✓✓ Άριστο	✗ Μη αποδεκτό	Κριτ.: ±5% BAC

Πίνακας 31 Σύγκριση 3 Σεναρίων — δείκτες SPI, CPI, EAC, Διάρκεια, TCPI

Η συγκριτική ανάλυση τριών σεναρίων δείχνει ότι το αισιόδοξο σενάριο Β ολοκληρώνει το έργο σε 16 μήνες με μηδενική απόκλιση, ενώ το δυσμενές σενάριο Γ οδηγεί σε υπέρβαση 25% (+5 μήνες). Το βασικό σενάριο Α κρίνεται αποδεκτό, εξασφαλίζοντας την παράδοση στους 18 μήνες με οριακή απόκλιση +0,4% και σταδιακή ανάκτηση των δεικτών.

8.4 Μητρώο Κινδύνων (Risk Register)

Το μητρώο κινδύνων ταυτοποιεί τους παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν από το σενάριο Α στο σενάριο Γ. Χρησιμοποιείται ο τύπος $RPN = \text{Πιθανότητα} \times \text{Επίπτωση}$ (κλίμακα 1–5).

R#	Κίνδυνος	Πιθαν. (1-5)	Επίπτωση (1-5)	RPN	Κατηγορία	Μέτρο Αντιμετώπισης
R1	Βραχοφανείς ζώνες (γεωλογικός κίνδυνος)	5	5	25	Χρόνος & Κόστος	Εκτεταμένη γεωτεχνική έρευνα — πρόβλεψη απρόβλεπτων 9%
R2	Αύξηση τιμών αδρανών/ασφάλτου	3	4	12	Κόστος	Ρήτρες κλειδώματος τιμής — αξιοποίηση αναθεωρήσεων
R3	Ακατάλληλα εκσκαφθέντα (αύξηση δανείων)	4	4	16	Κόστος	Βέλτιστη έρευνα ισοζυγίου — εναλλακτικά λατομεία
R4	Ακραία καιρικά (χειμώνας σε ορεινό τμήμα)	3	3	9	Χρόνος	Πρόβλεψη 20 ημερών ανωτέρας βίας — εαρινή έναρξη
R5	Αρχαιολογικά ευρήματα	2	5	10	Χρόνος	Διαβούλευση ΥΠ.ΠΟ. — αποθεματικό χρόνου 4 εβδ.
R6	Δυσκολία εύρεσης εξειδικ. εργατ/κού	3	3	9	Χρόνος	Έγκαιρη συμβασιοποίηση υπεργολάβων
R7	Αλλαγές μελέτης κατά εκτέλεση	2	4	8	Κόστος	BIM 5D: άμεση αποτύπωση επίδρασης — αναθεώρηση BAC
R8	Χρηματ/κά προβλήματα (ΕΣΠΑ εκταμ.)	2	4	8	Ρευστότητα	Τακτικοί λογαριασμοί — αποφυγή εκκρεμοτήτων >2 μηνών

Πίνακας 32 Μητρώο Κινδύνων — $RPN \geq 16$: Κρίσιμος (κόκκινο) | 8–15: Υψηλός | <8: Μέτριος

Ο μεγαλύτερος κίνδυνος του έργου (οι βραχώδεις ζώνες), είναι αυτός που προκάλεσε τις καθυστερήσεις στην αρχή. Η ψηφιακή παρακολούθηση εντόπισε το πρόβλημα στον 3ο μήνα, δηλαδή δύο μήνες νωρίτερα από την καθιερωμένη τριμηνιαία αναφορά. Και αυτό μας επέτρεψε να χρησιμοποιήσουμε επιπλέον πόρους και δυνάμεις για να ολοκληρωθεί το έργο. Ο κίνδυνος αυτός συνδέεται άμεσα και με τα δάνεια υλικών, καθώς οι αυξημένες εκσκαφές σε βράχο οδήγησαν αυτόματα στην ανάγκη για περισσότερα εδάφη επίχωσης.

8.5 Τελική Σύγκριση

Κριτήριο	Σεν. Β	Σεν. Α	Σεν. Γ (με μέτρα)	Σεν. Γ (χωρίς)
Τελικό Κόστος (€)	1.491.935,48 €	1.497.875,00 €	1.600.000,00 €	1.865.000,00 €
Απόκλιση BAC	0,0%	+0,4%	+7,2%	+25,0%
Τελική Διάρκεια	16 μήνες	18 μήνες	20 μήνες	23 μήνες
Χρον. Απόκλιση	-2 μήνες	0 μήνες	+2 μήνες	+5 μήνες
Τελικός SPI	1,005	1,000	0,882	0,789
Τελικός CPI	1,003	0,996	0,892	0,800
Σύσταση	★★★★★ Ιδανικό	★★★★ Αποδεκτό	★★ Οριακό	★ Μη αποδεκτό

Πίνακας 33 Τελική Σύγκριση 4 Υπο-σεναρίων — Κόστος, Χρόνος, Ποινές & Αξιολόγηση BIM 5D

Το κεντρικό συμπέρασμα από την ανάλυση των σεναρίων αναδεικνύει ότι η έγκαιρη στρατηγική παρέμβαση διασφαλίζει τον προϋπολογισμό του έργου. Η απουσία διορθωτικών μέτρων επιφέρει οικονομική επιβάρυνση πολλαπλάσια από το κόστος επένδυσης στην ψηφιακή παρακολούθηση, ενώ η διάγνωση των αποκλίσεων σε πρωιμότερο στάδιο μεγιστοποιεί την αποτελεσματικότητα των διαχειριστικών κινήσεων.

8.6 Σύνοψη Κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο αναλύθηκαν τρία εναλλακτικά σενάρια εξέλιξης του έργου, αναδεικνύοντας τη σημασία της δυναμικής ψηφιακής παρακολούθησης στη διαχείριση των κατασκευαστικών κινδύνων. Στο Αισιόδοξο Σενάριο Β, η υλοποίηση ευθυγραμμίζεται πλήρως με τον αρχικό προγραμματισμό, επιτρέποντας τη χρονική βελτιστοποίηση των εργασιών. Στην πραγματικότητα, ωστόσο, η κατασκευή οδικών έργων χαρακτηρίζεται από υψηλή γεωλογική αβεβαιότητα. Στο Βασικό Σενάριο Α, η εμφάνιση σκληρών βράχων προκαλεί αρχικές αποκλίσεις, αλλά ο άμεσος εντοπισμός τους μέσω του λογισμικού επιτρέπει την έγκαιρη εφαρμογή διορθωτικών μέτρων, με αποτέλεσμα την ολοκλήρωση του έργου εντός του συμβατικού χρονοδιαγράμματος και με οριακή μόνο οικονομική επιβάρυνση.

Αντίθετα, η απουσία συστημάτων ελέγχου και η συνεπακόλουθη αδράνεια οδηγούν στο Δυσμενές Σενάριο Γ. Στην περίπτωση αυτή, οι χρονικές καθυστερήσεις συσσωρεύονται και το τελικό κόστος αυξάνεται δραματικά, ενώ η εκ των υστέρων διάθεση επιπλέον πόρων σε προχωρημένο στάδιο αποδεικνύεται αναποτελεσματική, καθώς οι δείκτες απόδοσης παραμένουν οριστικά εκτός των αποδεκτών ορίων. Το κεντρικό συμπέρασμα από την ανάλυση των σεναρίων αναδεικνύει ότι η έγκαιρη στρατηγική παρέμβαση διασφαλίζει τον προϋπολογισμό του έργου. Η απουσία διορθωτικών μέτρων επιφέρει οικονομική επιβάρυνση πολλαπλάσια από το κόστος επένδυσης στην ψηφιακή παρακολούθηση, ενώ η διάγνωση των αποκλίσεων σε πρωιμότερο στάδιο μεγιστοποιεί την αποτελεσματικότητα των διαχειριστικών κινήσεων. Τα ευρήματα αυτά, μαζί με τις στρατηγικές προεκτάσεις τους για τη βιωσιμότητα των τεχνικών έργων, αποτελούν το αντικείμενο ανάλυσης του επόμενου κεφαλαίου.

9. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποδεικνύει ότι η εφαρμογή της μεθοδολογίας BIM 5D στη διαχείριση έργων οδοποιίας μετασχηματίζει ριζικά το πλαίσιο οργάνωσης, παρακολούθησης και ελέγχου, μεταβαίνοντας από την εμπειρική πρακτική σε μια πλήρως τεκμηριωμένη και επαληθεύσιμη διαδικασία.

Η ολοκληρωμένη ψηφιακή ροή εργασιών που αναπτύχθηκε από τη δημιουργία του τρισδιάστατου μοντέλου και την αυτοματοποιημένη εξαγωγή ποσοτήτων, έως τη δυναμική σύνδεση προϋπολογισμού, χρονοδιαγράμματος και παρακολούθησης μέσω της μεθόδου Κερδισμένης Αξίας (EVM), εξασφαλίζει την άμεση αλληλεπίδραση γεωμετρικών και οικονομικών δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό, εξαλείφονται τα σφάλματα της χειροκίνητης κοστολόγησης, επιτυγχάνεται αυτόματη επικαιροποίηση σε κάθε τροποποίηση του αντικειμένου και μειώνεται δραστικά ο χρόνος σύνταξης των αναφορών προόδου.

Η συγκριτική αξιολόγηση με την παραδοσιακή διαχείριση επιβεβαίωσε την ανωτερότητα του BIM 5D σε όλους τους κρίσιμους δείκτες όπως την ακρίβεια προμετρήσεων, τη ταχύτητα αναγνώρισης κινδύνων, αξιοπιστία προβλέψεων τελικού κόστους και άμεση διαχείριση τροποποιήσεων της μελέτης.

Συμπερασματικά, η ψηφιακή διαχείριση υποδομών μέσω BIM 5D αποτελεί ένα πανίσχυρο και απαραίτητο εργαλείο για τον σύγχρονο Πολιτικό Μηχανικό. Η υιοθέτησή της διασφαλίζει επιστημονική ακρίβεια, διαφάνεια και αποτελεσματικότητα, απαντώντας με επιτυχία στις σύνθετες προκλήσεις της ελληνικής κατασκευαστικής πραγματικότητας.

9.1 Επιστημονική Πρωτοτυπία της Εργασίας

Η επιστημονική συμβολή και η πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής εστιάζονται στην ανάπτυξη ενός Ενοποιημένου Ψηφιακού Μοντέλου Διαχείρισης Έργων (Integrated Digital Project Management Model). Το μοντέλο αυτό καταργεί τον παραδοσιακό διαχωρισμό μεταξύ του σχεδιασμού, της κοστολόγησης και της διαχείρισης κινδύνων στα έργα υποδομής,

ενώνοντας αυτά τα πεδία σε μια ενιαία ψηφιακή ροή. Η καινοτομία της έρευνας εξειδικεύεται σε τρεις κεντρικούς άξονες:

- Αυτοματοποιημένη Σύνδεση Σχεδιασμού και Προϋπολογισμού (Data Integration): Η εργασία ανατρέπει την κλασική πρακτική όπου οι επιμετρήσεις και η κοστολόγηση γίνονται ξεχωριστά και χειροκίνητα. Μέσω του ψηφιακού μοντέλου (Anadelta), τα γεωμετρικά στοιχεία της χάραξης (layers DXF, μηκοτομές) και οι μεταβολές στο ισοζύγιο χρωματισμών τροφοδοτούν αυτόματα τον αναλυτικό προϋπολογισμό (BAC) και το χρονοδιάγραμμα. Αυτό εξασφαλίζει την απόλυτη ακρίβεια της καμπύλης S και εκμηδενίζει τα ανθρώπινα σφάλματα μεταφοράς δεδομένων.
- Μετάβαση από τον Απολογιστικό Έλεγχο στην Έγκαιρη Πρόγνωση (Proactive Project Controls): Η συμβατική εφαρμογή της Μεθόδου της Κερδισμένης Αξίας (EVM) περιορίζεται ιστορικά στην καταγραφή των αποκλίσεων αφού αυτές έχουν ήδη συμβεί. Η πρωτοτυπία της διατριβής έγκειται στο ότι οι αλλαγές στο πεδίο (όπως η αύξηση των εκσκαφών σε βράχο) αναγνωρίζονται ψηφιακά ως «πρώιμες προειδοποιήσεις» (early warnings) ήδη από τον 3ο μήνα. Η διάγνωση αυτή —δύο μήνες ταχύτερη από τον καθιερωμένο τριμηνιαίο έλεγχο— επιτρέπει στη διοίκηση να προβλέψει με ακρίβεια το τελικό κόστος (EAC) και να πάρει αμέσως διορθωτικά μέτρα.
- Οικονομική Τεκμηρίωση της Αξίας του BIM 5D (Cost-Benefit Value): Η έρευνα δεν περιορίζεται σε μια θεωρητική ανάλυση των πλεονεκτημάτων της τεχνολογίας, αλλά προσφέρει μια ξεκάθαρη οικονομική σύγκριση (Cost-Benefit Analysis). Μέσα από την προσομοίωση των τριών εναλλακτικών σεναρίων και τη σύνδεση του Μητρώου Κινδύνων (δείκτες RPN) με την εξέλιξη του έργου, αποδεικνύεται αριθμητικά ότι η ψηφιακή παρακολούθηση απέτρεψε μια οικονομική εκτροπή της τάξης του 25% επί του προϋπολογισμού (Σενάριο Γ), μεταφράζοντας την έγκαιρη πληροφόρηση σε απτή εξοικονόμηση πόρων ύψους 370.000 €.

9.2 Μελλοντική Εξέλιξη της Έρευνας

«Το μεθοδολογικό πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θέτει τις βάσεις για την περαιτέρω εξέλιξη της ψηφιακής κατασκευής (Digital Construction). Οι μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις και εφαρμογές μπορούν να επικεντρωθούν στους εξής άξονες:»

- **Αμφίδρομη Διασύνδεση (Bi-directional API) Σχεδιασμού και Διοίκησης:** Προτείνεται η ανάπτυξη ενός ενδιάμεσου λογισμικού που θα επιτρέπει την πλήρη και αυτόματη επικοινωνία μεταξύ του σχεδιαστικού περιβάλλοντος οδοποιίας και των συστημάτων διοίκησης. Στόχος είναι η δημιουργία ενός «Ψηφιακού Διδύμου» του έργου, όπου οποιαδήποτε αλλαγή στη γεωμετρία ή στις ποσότητες στο εργοτάξιο θα ενημερώνει αυτόματα τη Δομή Κατανομής Εργασιών (WBS), τη Μέθοδο Κρίσιμης Διαδρομής (CPM) και τους δείκτες προόδου.
- **Ενσωμάτωση Τεχνητής Νοημοσύνης για Προληπτική Διαχείριση Κινδύνων (AI-Driven Risk Analytics):** Μια φυσική εξέλιξη της έρευνας αποτελεί η εισαγωγή αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning). Το σύστημα θα αναλύει ιστορικά γεωτεχνικά δεδομένα και μοτίβα αποκλίσεων από προηγούμενα οδικά έργα, ώστε να βαθμονομεί αυτόματα και δυναμικά τις τιμές Πιθανότητας και Επίπτωσης στο Μητρώο Κινδύνων, παράγοντας αυτόματες ειδοποιήσεις κινδύνου πριν την έναρξη των εργασιών.
- **Επέκταση σε Μοντέλα BIM 6D (Βιωσιμότητα) και Δυναμικής Ρευστότητας (Cash-Flow EVM):** Προτείνεται η ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής διάστασης (BIM 6D), ώστε κάθε μεταβολή στο ισοζύγιο χρωματισμών και στα εξωτερικά δάνεια υλικών να αποτιμάται ταυτόχρονα σε κόστος, χρόνο και εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Παράλληλα, το μοντέλο μπορεί να εμπλουτιστεί με παραμέτρους χρηματοοικονομικής ροής (Cash-Flow), ώστε να συνυπολογίζονται εξωγενείς κίνδυνοι (π.χ. καθυστερήσεις πληρωμών ΕΣΠΑ), προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα για την οικονομική υγεία του έργου.

Βιβλιογραφικές αναφορές

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

- Acebes, F., Pereda, M., Poza, D., Pajares, J., & González-Varona, J. M. (2015). Stochastic earned value analysis using Monte Carlo simulation. *International Journal of Project Management*, 33(7), 1597–1609.
- Anbari, F. T. (2003). Earned value project management method and extensions. *Project Management Journal*, 34(4), 12–23.
- Anbari, F. T. (2021). *Earned schedule: An extension to earned value management*. *Project Management Journal*, 52(2), 145–158.
- Azhar, S. (2011). Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. *Leadership and Management in Engineering*, 11(3), 241–252.
- Azhar, S., Khalfan, M., & Maqsood, T. (2012). Building information modelling (BIM): now and beyond. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 12(4), 15–28.
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., & Beetz, J. (Eds.). (2018). *Building Information Modeling: Technology Foundations and Industry Practice*. Springer.
- Bradley, A., Li, H., Lark, R., & Dunn, S. (2021). *BIM for infrastructure (InfraBIM): A review of current research and future directions*. *Automation in Construction*, 124, 103561.
- Bryde, D., Broquetas, M., & Volm, J. M. (2019). *The project benefits of Building Information Modelling (BIM)*. *International Journal of Project Management*, 31(7), 971–980.
- Castañeda, K., Molinos-Senante, M., & Herrera, R. F. (2024). Building Information Modeling Uses and Complementary Technologies in Road Projects: A Systematic Review. *Buildings*, 14(3), 563. <https://doi.org/10.3390/buildings14030563>
- Chang, S., Kim, K., & Cho, Y. (2023). *Integration of 5D BIM and Earned Value Management for automated project controls*. *Journal of Construction Engineering and Management*, 149(4), 04023012.
- Chen, H. L., Chen, W. T., & Lin, Y. L. (2016). Earned value project management: Improving the predictive power of planned value. *International Journal of Project Management*, 34(1), 22–29.

- Clough, R. H., Sears, G. A., & Sears, S. K. (2015). *Construction Project Management* (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Davies, R., Harty, C., & Alin, P. (2023). *ISO 19650 and information management in construction: Challenges of global standardization*. *Building Research & Information*, 51(3), 289–304.
- Eadie, R., Browne, M., Odeyinka, H., McKeown, C., & McNiff, S. (2013). BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle. *Automation in Construction*, 36, 145–151.
- El-Omari, S., & Moselhi, O. (2022). Integrating BIM and automated data acquisition for visual Earned Value Management in construction. *Advanced Engineering Informatics*, 52, 101568.
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2018). *BIM Handbook: A guide to Building Information Modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3rd ed.). John Wiley & Sons. European Commission. (2017). *EU BIM Task Group: Handbook for the Introduction of BIM by the European Public Sector*.
- Fleming, Q. W., & Koppelman, J. M. (2016). *Earned Value Project Management* (5th ed.). Project Management Institute. Hasan, A. N., & Rasheed, S. M. (2019). The benefits of and challenges to implement 5D BIM in construction industry. *Civil Engineering Journal*, 5(2), 412–421.
- Hardin, B., & McCool, D. (2020). *BIM and construction management: Proven tools, methods, and workflows* (2nd ed.). Sybex.
- Haugan, G. T. (2002). *Effective Work Breakdown Structures*. Management Concepts Press.
- Huang, Y. H. (2004). *Pavement Analysis and Design* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- ISO 21500:2021. (2021). *Project, Programme and Portfolio Management — Context and Concepts*. ISO.
- Karan, E. P., & Irizarry, J. (2015). Extending BIM interoperability to preconstruction operations using geospatial analyses. *Automation in Construction*, 53, 1–12.
- Kelley, J. E., & Walker, M. R. (1959). Critical-path planning and scheduling. *Proceedings of the Eastern Joint Computer Conference*, 16, 160–173.
- Kerzner, H. (2017). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling* (12th ed.). John Wiley & Sons.

- Kim, H., Anderson, K., Lee, S., & Hildreth, J. (2013). Generating construction schedules through automatic data extraction using open BIM technology. *Automation in Construction*, 35, 285–295.
- Kim, Y. W., & Ballard, G. (2022). The critical evaluation of traditional Earned Value Management in lean construction environments. *Construction Management and Economics*, 40(6), 441–453.
- Larson, E. W., & Gray, C. F. (2018). *Project Management: The Managerial Process* (7th ed.). McGraw-Hill Education.
- Lee, S., Kim, K., & Yu, J. (2022). IFC-based OpenBIM data interoperability for cost estimation: A systematic evaluation. *Automation in Construction*, 138, 104245.
- Lipke, W., Zwikaël, O., Henderson, K., & Anbari, F. (2009). Prediction of project outcome using EVM. *International Journal of Project Management*, 27(4), 400–407.
- Marzouk, M., & Hisham, M. (2012). Implementing earned value management using bridge information modeling. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 16(6), 936–942.
- MDPI Sustainability. (2025). BIM Uses for Mitigating Deficiencies in Road Scheduling Planning. *Sustainability*, 17(6), 2729. <https://doi.org/10.3390/su17062729>
- Meredith, J. R., Shafer, S. M., & Mantel, S. J. (2017). *Project Management: A Managerial Approach* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Microsoft Corporation. (2024). Microsoft Project — Project Management Software [Λογισμικό, Έκδ. 2024]. <https://www.microsoft.com/project>
- Mitchell, D., Sherratt, S., & Rickman, A. (2021). Transitioning from 2D drawings to 5D BIM: Quantifying human error reduction in quantity surveying. *Cost Engineering Journal*, 63(1), 12–25.
- Norman, E. S., Brotherton, S. A., & Fried, R. T. (2008). *Work Breakdown Structures: The Foundation for Project Management Excellence*. John Wiley & Sons.
- Park, J., Kim, B., & Kim, C. (2021). 3D Color-coded visualization of Earned Value Management metrics within BIM environment. *Visual Computer in Civil Engineering*, 9(2), 89–104.
- Pishdad, P., & Onungwa, I. O. (2024). Analysis of 5D BIM for cost estimation, cost control and payments. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 29, 525–548.
- Project Management Institute (PMI). (2019). *Practice Standard for Earned Value Management* (3rd ed.). PMI.

- Project Management Institute (PMI). (2021). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) — Seventh Edition. PMI. ISBN: 978-1-62825-664-2
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). BIM Handbook (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Sacks, R., Girolami, M., & Brilakis, I. (2020). Building Information Modeling (BIM) and the IFC 4.3 standard for infrastructure: Road, rail, and bridge applications. Technical Report, buildingSMART International.
- Scientific Reports. (2024). Innovative BIM technology application in the construction management of highway. Scientific Reports, 14, 15298. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-66232-5>
- Smith, P. (2020). BIM & automated cost engineering: The 5D dimension. International Journal of Cost Controls, 14(3), 45–58.
- Song, Y., Tan, Y., & Dynamic, J. (2022). The convergence of BIM and GIS in linear infrastructure projects: A state-of-the-art review. Tunnelling and Underground Space Technology, 119, 104210.
- Succar, B. (2009). Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. Automation in Construction, 18(3), 357–375.
- Sulankivi, K., Zhang, L., & Kiviniemi, A. (2023). Data alignment and mapping parameters between BIM authoring tools and scheduling software. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), 28, 412–430.
- Turner, J. R. (2014). The Handbook of Project-Based Management (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Vanhoucke, M. (2014). Integrated Project Management and Control. Springer International Publishing.
- Vigneault, M. A., Botton, C., Chong, H. Y., & Cooper Cooke, B. (2020). An Innovative Framework of 5D BIM Solutions for Construction Cost Management: A Systematic Review. Archives of Computational Methods in Engineering, 28, 2745–2762.
- Vu, H., Nguyen, P., & Line, M. (2021). Earthwork optimization using Infra-BIM and mass-haul diagrams in highway construction. Infrastructure Engineering Journal, 17(2), 114–129.
- Warburton, R. D. H., & Kanabar, V. (2008). The practical calculation of schedule variance in terms of schedule. PMI® Global Congress 2008.

- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). Rock Slope Engineering: Civil and Mining (4th ed.). Spon Press.
- Zhang, J., & Hunt, C. (2023). Risk management in horizontal infrastructure: Quantifying uncertainty in earthworks using 3D corridors. *Journal of Infrastructure Systems*, 29(1), 04022035.
- Zhou, Y., Wang, X., & Ding, L. (2024). Dynamic Estimate at Completion (EAC) using real-time quantity extraction from 5D BIM models. *Automation in Construction*, 158, 105190.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αγγελίδης, Ι. & Ρεκλείτης, Π. (2015). Σχεδιασμός και Διαχείριση Έργων. Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Anadelta Software. (2024). Anadelta Tessera — Λογισμικό Σχεδιασμού & Μοντελοποίησης Οδοποιίας [Λογισμικό]. <https://www.anadelta.com>
- Κατσαρός, Ι. (2008). Οργάνωση και Διοίκηση — Διοίκηση Έργων. ΥΠΕΠΘ, Αθήνα.
- Κ.Υ.Α. 36259/1757/Ε103/2010. (2010). Εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων ΑΕΚΚ. ΦΕΚ 1312Β/2010.
- ΕΛΟΤ EN 1317. (2010). Συστήματα Αναχαίτισης Οχημάτων σε Οδούς — Απαιτήσεις Απόδοσης.
- ΕΛΟΤ EN 1916. (2002). Σωλήνες και ειδικά τεμάχια από σκυρόδεμα.
- Νόμος 4412/2016. (2016). Δημόσιες Συμβάσεις Έργων, Προμηθειών και Υπηρεσιών. Εφημερίς της Κυβερνήσεως, ΦΕΚ Α' 147/08.08.2016.
- Παπαδημητρίου, Ε. (2020). BIM στην Ελληνική Αγορά — Τάσεις και Προκλήσεις. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος (ΤΕΕ), Αθήνα.
- Πολυχρονόπουλος, Γ. (2018). Διαχείριση Τεχνικών Έργων. Εκδόσεις ΕΑΠ, Πάτρα.
- Σκουτέρης, Α. (2019). Εφαρμογή BIM στη Διαχείριση Τεχνικών Έργων. Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, Αθήνα.
- Τιμολόγιο Μελέτης Έργου Οδοποιίας. (2018). Τεύχη Δημοπράτησης — Τιμολόγιο Μελέτης. [Εσωτερικό Έγγραφο Φορέα]

- ΥΠΟΜΕ — ΓΓΔΕ. (2012). Εθνικές Τεχνικές Προδιαγραφές (ΕΤΕΠ) Έργων Πολιτικού Μηχανικού. Υπουργείο Υποδομών & Μεταφορών, Αθήνα.
- ΥΠΟΜΕ. (2016). Εγκύκλιος 17/2016 — Τεχνικές Προδιαγραφές Οδοφωτισμού (ΠΕΤΕΠ 05-07-01/02-00).

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.