



ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Διεθνών Προτύπων για τη
Διαχείριση Εργαστηρίων Δοκιμών σε Έργα Οδοποιίας και
Σιδηροδρομικών Υποδομών**

ΤΣΙΓΓΑΝΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ
ΣΑΠΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΤΡΑ
ΜΑΪΟΣ, 2026

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή/της φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο/η 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/της 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/της συγγραφέα/δημιουργού. Ο/Η συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



**Βιβλιογραφική Ανασκόπηση Διεθνών Προτύπων για τη
Διαχείριση Εργαστηρίων Δοκιμών σε Έργα Οδοποιίας και
Σιδηροδρομικών Υποδομών**

ΤΣΙΓΓΑΝΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:
Σαπίδης Νικόλαος

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:
Πολύζος Δημοσθένης

ΠΑΤΡΑ
ΜΑΪΟΣ, 2026

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει ανάλυση του σχεδιασμού και της διαχείρισης των διαδικασιών δοκιμών, διασφάλισης συμμόρφωσης και θέσης σε λειτουργία του τμήματος Ροδοδάφνη–Ρίο του σιδηροδρομικού έργου Κιάτο–Πάτρα, με ιδιαίτερη έμφαση στη σήραγγα Παναγοπούλας και στα επιμέρους υποσυστήματα σταθμών, ηλεκτροκίνησης, σηματοδότησης, ETCS και τηλεπικοινωνιών. Βασισμένη σε μια δομημένη μεθοδολογία μελέτης περίπτωσης, βασισμένη στο ISO/IEC 17025, τους Ευρωκώδικες, τα πρότυπα EN και τα ευρωπαϊκά πλαίσια διαλειτουργικότητας, η έρευνα δημιουργεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο διασφάλισης, το οποίο συνδέει την επαλήθευση υλικών, τη διακυβέρνηση διεπαφών και την πειθαρχία θέσης σε λειτουργία. Η ανάλυση έδειξε ότι η αξιοπιστία της υποδομής υπό συνθήκες κρίσιμων για την ασφάλεια σιδηροδρομικών μεταφορών εξαρτάται από την αξιοπιστία των μετρήσεων που επιτυγχάνονται μέσω της διαπίστευσης, τις αλυσίδες αποδεικτικών στοιχείων που είναι ιχνηλάσιμα και την επικύρωση υποσυστημάτων αντί για την τεχνική συμμόρφωση μεμονωμένα. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στις λειτουργίες ασφάλειας των σιδηροδρόμων, οι οποίες είναι ο συνδυασμός της λογικής θέσης σε λειτουργία και του ελέγχου διαμόρφωσης ως καθοριστικών παραγόντων της ετοιμότητας για εργασία. Η ανάγκη για διακυβέρνηση ποιότητας που βασίζεται στην απόδοση υποστηρίζεται από τη σύγκριση απόδοσης με ευρωπαϊκά μεγάλα έργα. Η εργασία διαπιστώνει ότι η συστηματική διαχείριση αποδεικτικών στοιχείων και η διασφάλιση με βάση τη διεπαφή παίζουν βασικό ρόλο στην ασφάλεια, τη σταθερότητα και τη μακροπρόθεσμη ακεραιότητα των σιδηροδρόμων.

Λέξεις-κλειδιά: ISO/IEC 17025, σιδηροδρομική υποδομή, ασφάλεια σιδηροδρόμων, διασφάλιση ποιότητας, διαλειτουργικότητα.

Abstract

The present diploma thesis presents an analysis of the design and management of testing, assurance and commissioning processes for the Rododafni–Rio section of the Kiato–Patra railway project, with particular emphasis on the Panagopoula tunnel and the associated subsystems of stations, electrification, signalling, ETCS and telecommunications. Based on a structured case study methodology, based on ISO/IEC 17025, Eurocodes, EN standards and European interoperability frameworks, the research creates an integrated assurance model, which connects material verification, interface governance and commissioning discipline. The analysis has shown that infrastructure reliability under condition of safety-critical railway conditions is contingent on the measurement credibility realized by accreditation, chains of evidence which are traceable, and subsystem validation instead of technical compliance in isolation. The special consideration is provided to tunnel safety functions, which is the combination of commissioning logic and configuration control as the determinants of the readiness to work. The need of quality governance being performance-based is supported by the performance comparison with European megaprojects. The paper finds that systematized evidence management and interface-oriented assurance play the key role in the safety, stability and long-term integrity of the railways.

Keywords: ISO/IEC 17025, railway infrastructure, tunnel safety, quality assurance, interoperability.

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	1
1.1	Ερευνητικό Υπόβαθρο	1
1.2	Σκοπός της Έρευνας	3
1.3	Ερευνητικά Ερωτήματα	5
1.4	Σημασία της Έρευνας	6
1.5	Δομή της Έρευνας.....	7
2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	9
2.1	Συστήματα Διαχείρισης Ποιότητας σε Εργαστήρια Δοκιμών.....	9
2.1.1	Εξέλιξη Συστημάτων Ποιότητας	9
2.1.2	ISO 9001 και ISO/IEC 17025	10
2.1.3	Κουλτούρα ποιότητας και διαπίστευσης σε έργα υποδομών.....	11
2.2	Πρότυπο ISO/IEC 17025:2017.....	12
2.2.1	Δομή του Προτύπου.....	12
2.2.2	Απαιτήσεις Αμεροληψίας και Εμπιστευτικότητας	13
2.2.3	Απαιτήσεις πόρων.....	14
2.2.4	Απαιτήσεις Διαδικασίας.....	15
2.2.5	Απαιτήσεις Συστήματος Διαχείρισης	16
2.3	Πρότυπα Δοκιμών Δομικών Υλικών	17
2.3.1	Πρότυπα Δοκιμών Σκυροδέματος (EN και ASTM).....	17
2.3.2	Πρότυπα Δοκιμών Ασφάλτου.....	18
2.3.3	Πρότυπα Δοκιμών Εδάφους	19
2.3.4	Πρότυπα Δοκιμών Αδρανών Υλικών	20
2.3.5	Εναρμόνιση μεταξύ των πλαισίων EN και ASTM	21
2.4	Μετρολογία και Αξιοπιστία Μετρήσεων.....	23
2.4.1	Ιχνηλασιμότητα.....	23

2.4.2	Αβεβαιότητα μέτρησης.....	24
2.4.3	Βαθμονόμηση και Διαχείριση Εξοπλισμού.....	24
2.5	Διαχείριση Κινδύνου σε Εργαστήρια Δοκιμών.....	25
2.6	Ο ρόλος των εργαστηρίων δοκιμών στη διασφάλιση ποιότητας υποδομών.....	26
3	Μεθοδολογία.....	28
3.1	Ερευνητικός Σχεδιασμός.....	28
3.2	Πλαίσιο Αξιολόγησης Συμμόρφωσης.....	29
3.2.1	Δείκτες Εργαστηριακής Αξιοπιστίας.....	29
3.2.2	Πίνακας αντιστοίχισης προτύπων και εφαρμοζόμενων πρακτικών.....	30
3.3	Πηγές Δεδομένων.....	31
3.4	Μέθοδος Συλλογής Δεδομένων.....	32
3.5	Μέθοδος Ανάλυσης Δεδομένων.....	33
3.6	Περιορισμοί της Έρευνας.....	34
4	Μελέτη Περίπτωσης: Σιδηροδρομική Γραμμή Κιάτο–Πάτρα.....	36
4.1	Ορισμός περίπτωσης και όριο συστήματος.....	36
4.2	Ανάλυση ανά Υποσύστημα και Διεπαφές.....	37
4.3	Πλαίσιο Προτύπων και Απαιτήσεων.....	41
4.4	Μοντέλο Αποδεικτικών Στοιχείων για τη Διασφάλιση Ποιότητας και την Αποδοχή	45
4.5	Λογική Ασφαλείας Κεντρικής Σήραγγας για την Παναγοπούλα.....	47
4.6	Εφαρμογή των προτύπων ISO/IEC 17025.....	48
4.7	Λογική διασφάλισης υποδομής σταθμού και στάσεων.....	50
4.8	Σύγκριση με Άλλες Ευρωπαϊκές Περιπτώσεις.....	54
4.9	Αποτελέσματα της Μελέτης Περίπτωσης.....	56
5	Συμπεράσματα.....	59
5.1	Συζήτηση.....	59
5.2	Κρίσιμοι Παράγοντες Επιτυχίας.....	60

5.3	Επιπτώσεις στη Διασφάλιση Ποιότητας Υποδομών	62
5.4	Προτάσεις για Βέλτιστες Πρακτικές.....	63
5.5	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	64
	Βιβλιογραφία	65

1 Εισαγωγή

1.1 Ερευνητικό Υπόβαθρο

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας (ΜΔΕ) εντάσσεται στο πεδίο της οργάνωσης και διοίκησης εργαστηρίων δοκιμών δομικών υλικών που λειτουργούν σε περιβάλλοντα έργων μεγάλης κλίμακας, ιδίως σε σιδηροδρομικά και συγκοινωνιακά έργα με αυξημένες απαιτήσεις ασφάλειας και επιδόσεων. Η σύγχρονη βιβλιογραφία επισημαίνει ότι τα διαπιστευμένα εργαστήρια δεν αποτελούν απλώς τεχνικές οντότητες που εκτελούν τυποποιημένες δοκιμές, αλλά δομημένα συστήματα διαχείρισης ποιότητας τα οποία επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία, την ιχνηλασιμότητα και την εγκυρότητα των τεχνικών αποφάσεων (Ceylan & Cansız, 2022· Panagiotidou et al., 2024).

Σύμφωνα με το ISO/IEC 17025:2017, η επάρκεια ενός εργαστηρίου δεν περιορίζεται στις τεχνικές διαδικασίες δοκιμών, αλλά περιλαμβάνει την αμεροληψία, τη βασισμένη στον κίνδυνο σκέψη, την επάρκεια πόρων, τη μετρολογική ιχνηλασιμότητα, την επικύρωση μεθόδων, την εκτίμηση της αβεβαιότητας μέτρησης και τη συστηματική τεκμηρίωση (ISO, 2017). Εμπειρικές μελέτες καταδεικνύουν ότι η εφαρμογή του ISO/IEC 17025 ενισχύει ουσιαστικά τα εσωτερικά συστήματα διαχείρισης ποιότητας σε εργαστήρια πολιτικού μηχανικού, βελτιώνοντας την τυποποίηση διαδικασιών, τη λογοδοσία και τη συνέπεια των επιδόσεων (Ceylan & Cansız, 2022· Manikandan et al., 2024). Επιπλέον, οι Panagiotidou et al. (2025) αναγνωρίζουν κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας για την αποτελεσματική εφαρμογή του προτύπου, όπως η δέσμευση της ανώτατης διοίκησης, η δομημένη διαχείριση επάρκειας προσωπικού, οι μηχανισμοί εσωτερικού ελέγχου και τα συστήματα παρακολούθησης επιδόσεων.

Τα σιδηροδρομικά έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας, τα οποία περιλαμβάνουν κατασκευές από σκυρόδεμα, ασφαλτικά οδοστρώματα, γεωτεχνικούς σχηματισμούς και δομικά στοιχεία, εξαρτώνται από την εργαστηριακή επαλήθευση ιδιοτήτων υλικών όπως η αντοχή σε θλίψη, ο βαθμός συμπύκνωσης, η κοκκομετρική διαβάθμιση και οι παράμετροι ανθεκτικότητας. Σε τέτοια περιβάλλοντα κρίσιμα για την ασφάλεια, τα εργαστηριακά αποτελέσματα επηρεάζουν άμεσα αποφάσεις αποδοχής και προσδοκίες μακροχρόνιας απόδοσης. Η έρευνα επιβεβαιώνει ότι η διαπίστευση κατά ISO/IEC 17025 ενισχύει την τεχνική αξιοπιστία, μειώνει τα σφάλματα

και αυξάνει την εμπιστοσύνη των ενδιαφερόμενων μερών στα αποτελέσματα δοκιμών (Okezie et al., 2020· Alomair et al., 2025). Τα ευρύτερα οφέλη της διαπίστευσης, συμπεριλαμβανομένης της βελτίωσης της εταιρικής διακυβέρνησης και της λειτουργικής πειθαρχίας, τεκμηριώνονται επίσης σε κλαδικές αναλύσεις εργαστηρίων πολιτικού μηχανικού (Panagiotidou et al., 2024).

Από μετρολογική σκοπιά, η επικύρωση μεθόδων και η εκτίμηση της αβεβαιότητας μέτρησης αποτελούν θεμελιώδεις προϋποθέσεις της εργαστηριακής αξιοπιστίας, καθώς επιτρέπουν στο εργαστήριο να αποδεικνύει ότι οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι κατάλληλες για τον επιδιωκόμενο σκοπό και ότι τα παραγόμενα αποτελέσματα συνοδεύονται από τεκμηριωμένο επίπεδο αβεβαιότητας (Faradika & Paulina, 2025). Στο ίδιο πλαίσιο, τα συστήματα διακρίβωσης και οι αλυσίδες μετρολογικής ιχνηλασιμότητας διασφαλίζουν ότι τα όργανα και τα πρότυπα αναφοράς συνδέονται με αναγνωρισμένα εθνικά ή διεθνή πρότυπα, ώστε τα αποτελέσματα των δοκιμών να είναι συγκρίσιμα, επαληθεύσιμα και αναπαραγώγιμα.

Η υιοθέτηση της έκδοσης ISO/IEC 17025:2017 δεν περιορίζεται σε μια τυπική αναθεώρηση της τεκμηρίωσης, αλλά προϋποθέτει ουσιαστικές οργανωτικές και λειτουργικές προσαρμογές. Ειδικότερα, η νέα έκδοση ενισχύει τη λογική της βασισμένης στον κίνδυνο προσέγγισης, δηλαδή την απαίτηση το εργαστήριο να εντοπίζει εκ των προτέρων παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του και να λαμβάνει τεκμηριωμένα προληπτικά μέτρα για τον έλεγχό τους. Οι εμπειρίες εφαρμογής του προτύπου δείχνουν ότι η προσαρμογή αυτή επηρεάζει τόσο την εσωτερική οργάνωση όσο και τις διαδικασίες τεκμηρίωσης, ευθύνης προσωπικού και παρακολούθησης κρίσιμων σημείων της εργαστηριακής λειτουργίας (Fletcher et al., 2023).

Παράλληλα, η σύγχρονη βιβλιογραφία και η σχετική κανονιστική καθοδήγηση (ISO, 2017; MHRA, 2021; WHO, 2021; Gokulakrishnan et al., 2024; Otkhozoria & Petriashvili, 2025) αποδίδουν ιδιαίτερη σημασία στην προστασία των εργαστηριακών πληροφοριών και στη διασφάλιση της ακεραιότητας των δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτό, το εργαστήριο οφείλει να ελέγχει συστηματικά τους κινδύνους που μπορεί να αλλοιώσουν, να αποδυναμώσουν ή να καταστήσουν μη αξιόπιστα τα δεδομένα του, όπως σφάλματα καταχώρισης, μη εξουσιοδοτημένες τροποποιήσεις, απώλεια ηλεκτρονικών αρχείων, ελλιπή ίχνη ελέγχου και ανεπαρκή προστασία των πληροφοριακών συστημάτων. Επομένως, η αξιοπιστία ενός διαπιστευμένου εργαστηρίου δεν εξαρτάται μόνο από τη σωστή εκτέλεση της μέτρησης, αλλά και από το κατά πόσο μπορεί να αποδείξει ότι όλα τα δεδομένα που τη στηρίζουν παραμένουν

ακριβή, πλήρη, ασφαλή και πλήρως ιχνηλάσιμα σε όλη τη διάρκεια της εργαστηριακής διαδικασίας (ISO, 2017; MHRA, 2021; WHO, 2021; Gokulakrishnan et al., 2024; Otkhozoria & Petriashvili, 2025).

Τέλος, οι συγκριτικές αναλύσεις μεταξύ του ISO 9001 και του ISO/IEC 17025 καταδεικνύουν ότι, παρότι και τα δύο πρότυπα ενσωματώνουν αρχές διαχείρισης ποιότητας, δεν έχουν τον ίδιο σκοπό ούτε το ίδιο επίπεδο τεχνικής εξειδίκευσης. Το ISO 9001 επικεντρώνεται κυρίως στη συνολική οργάνωση των διαδικασιών ποιότητας ενός φορέα, στη συνέπεια των λειτουργιών του και στη βελτίωση της ικανοποίησης του πελάτη. Αντίθετα, το ISO/IEC 17025 είναι ειδικά σχεδιασμένο για εργαστήρια δοκιμών και διακριβώσεων και απαιτεί πολύ αυστηρότερη τεχνική τεκμηρίωση ως προς τη μετρολογική ιχνηλασιμότητα, την επικύρωση μεθόδων, την εκτίμηση αβεβαιότητας, την επάρκεια του προσωπικού και την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Για τον λόγο αυτό, το ISO/IEC 17025 δεν αποτελεί απλώς ένα γενικό σύστημα ποιότητας, αλλά ένα εξειδικευμένο πλαίσιο τεχνικής και οργανωσιακής αξιοπιστίας για εργαστηριακά περιβάλλοντα (Miguel et al., 2021).

1.2 Σκοπός της Έρευνας

Ο πρωταρχικός σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας (ΜΔΕ) είναι η συστηματική διερεύνηση της οργανωτικής δομής, των πρακτικών διοίκησης και των μηχανισμών συμμόρφωσης εργαστηρίων δοκιμών δομικών υλικών που λειτουργούν στο πλαίσιο σιδηροδρομικών έργων υποδομής μεγάλης κλίμακας, καθώς και η αξιολόγηση της ευθυγράμμισής τους με διεθνή πρότυπα διαπίστευσης και ποιότητας, και ειδικότερα με το ISO/IEC 17025:2017. Η έρευνα επιδιώκει να γεφυρώσει το χάσμα μεταξύ κανονιστικής θεωρίας και επιχειρησιακής πραγματικότητας, αναλύοντας τον τρόπο με τον οποίο οι διεθνώς καθιερωμένες απαιτήσεις διαχείρισης εργαστηρίων εφαρμόζονται στο απαιτητικό περιβάλλον της σύγχρονης σιδηροδρομικής κατασκευής.

Σε διοικητικό επίπεδο, η ΜΔΕ αποσκοπεί στην αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο τα εργαστήρια δοκιμών οργανώνονται, διοικούνται και ενσωματώνονται στα συστήματα διοίκησης έργου. Τα μεγάλα έργα υποδομής χαρακτηρίζονται από τη συμμετοχή πολλαπλών αναδόχων, υπεργολάβων, επιβλεπουσών αρχών και φορέων διαπίστευσης. Εντός αυτού του σύνθετου οργανωτικού πλαισίου, τα εργαστήρια οφείλουν να λειτουργούν με σαφή οργανωτική δομή, καθορισμένες αρμοδιότητες, τεκμηριωμένες διαδικασίες και ισχυρούς

μηχανισμούς εσωτερικού ελέγχου. Συνεπώς, κεντρικός στόχος αποτελεί η αξιολόγηση του κατά πόσο τα συστήματα διοίκησης των εργαστηρίων υποστηρίζουν αποτελεσματικά την τεχνική επάρκεια, την αμεροληψία, τη μετρολογική ιχνηλασιμότητα και τη λήψη αποφάσεων βάσει εκτίμησης κινδύνου.

Από πλευράς συμμόρφωσης, η ΜΔΕ επικεντρώνεται στην αποτίμηση της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις του ISO/IEC 17025, το οποίο αποτελεί το διεθνές πρότυπο για την επάρκεια, την αμεροληψία και τη συνεπή λειτουργία των εργαστηρίων δοκιμών και διακριβώσεων, καθώς και με τα σχετικά πρότυπα δοκιμών EN και ASTM, τα οποία είναι κρίσιμα για την ουσιαστική αξιολόγηση της εργαστηριακής πρακτικής. Ειδικότερα, τα EN (European Standards) είναι ευρωπαϊκά πρότυπα που εκδίδονται στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού συστήματος τυποποίησης και λειτουργούν ως κοινές τεχνικές αναφορές για προϊόντα, υλικά, διαδικασίες και μεθόδους, ενώ τα πρότυπα ASTM εκδίδονται από τον οργανισμό ASTM International και αποτελούν διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα συναινετικής τυποποίησης για υλικά, προϊόντα, συστήματα και μεθόδους δοκιμών (ASTM International, n.d.; CEN & CENELEC, n.d.; International Organization for Standardization [ISO], 2017). Στο πλαίσιο των εργαστηρίων δοκιμών δομικών υλικών, τα πρότυπα αυτά έχουν ιδιαίτερη σημασία, διότι δεν αποτυπώνουν απλώς γενικές κανονιστικές απαιτήσεις, αλλά καθορίζουν τον συγκεκριμένο τρόπο εκτέλεσης των δοκιμών, τις τεχνικές συνθήκες εφαρμογής τους και τα κριτήρια με βάση τα οποία διασφαλίζονται η αξιοπιστία, η επαναληψιμότητα και η συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων· συνεπώς, ο στόχος της ΜΔΕ δεν περιορίζεται στη διαπίστωση της τυπικής διαπίστευσης, αλλά επεκτείνεται σε κριτική ανάλυση του βάθους και της ουσιαστικής εφαρμογής των απαιτήσεων αυτών στην οργάνωση και λειτουργία του εργαστηρίου (ASTM International, n.d.; CEN & CENELEC, n.d.; ISO, 2017).

Επιπλέον, σημαντικός στόχος της έρευνας αποτελεί η ανάπτυξη και εφαρμογή ενός δομημένου πλαισίου αξιολόγησης συμμόρφωσης, το οποίο επιτρέπει τη συστηματική αντιστοίχιση των απαιτήσεων των προτύπων με τις παρατηρούμενες εργαστηριακές πρακτικές. Μέσω αυτού του αναλυτικού εργαλείου, η ΜΔΕ επιδιώκει την παραγωγή μετρήσιμων δεικτών συμμόρφωσης και τον εντοπισμό κρίσιμων παραγόντων επιτυχίας που επηρεάζουν την αξιοπιστία των εργαστηρίων.

Τέλος, η έρευνα αποσκοπεί στην αξιολόγηση της ευρύτερης επίδρασης της εργαστηριακής απόδοσης στο επίπεδο διασφάλισης ποιότητας του έργου. Μέσω της εξέτασης του τρόπου με τον οποίο τα αποτελέσματα δοκιμών επηρεάζουν την αποδοχή εργασιών, τις διορθωτικές

ενέργειες και τη συμβατική συμμόρφωση, αναδεικνύεται ο στρατηγικός ρόλος των εργαστηρίων στη διασφάλιση της ασφάλειας και της ανθεκτικότητας των σιδηροδρομικών υποδομών.

1.3 Ερευνητικά Ερωτήματα

Τα ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας (ΜΔΕ) διαμορφώνονται με στόχο τη διερεύνηση των οργανωτικών, τεχνικών και κανονιστικών διαστάσεων των εργαστηρίων δοκιμών δομικών υλικών που υποστηρίζουν έργα σιδηροδρομικής υποδομής μεγάλης κλίμακας. Τα ερωτήματα δεν περιορίζονται σε βιβλιογραφική αποτύπωση, αλλά συνδέουν τη θεωρητική και κανονιστική βάση με την εφαρμογή της στο πλαίσιο της επιλεγμένης μελέτης περίπτωσης, δηλαδή του έργου κατασκευής σιδηροδρομικών σταθμών και στάσεων, επιδομής, ηλεκτροκίνησης, σηματοδότησης – τηλεδιοίκησης, ETCS, τηλεπικοινωνιών και Η/Μ εγκαταστάσεων της σήραγγας Παναγοπούλας στο τμήμα Ροδοδάφνη–Ρίο.

Κύριο Ερευνητικό Ερώτημα 1: Πώς οργανώνονται και διοικούνται τα εργαστήρια δοκιμών δομικών υλικών που υποστηρίζουν έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας και σε ποιο βαθμό η οργανωτική τους αρχιτεκτονική ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις του ISO/IEC 17025;

Το ερώτημα αυτό αποσκοπεί στην αποσαφήνιση του τρόπου με τον οποίο οι δομές διακυβέρνησης, η κατανομή ρόλων, η διαχείριση πόρων, η επάρκεια προσωπικού και οι μηχανισμοί διασφάλισης αμεροληψίας οργανώνονται σε εργαστηριακά περιβάλλοντα που λειτουργούν σε απαιτητικά τεχνικά έργα. Η βιβλιογραφία παρέχει το θεωρητικό και κανονιστικό υπόβαθρο, ενώ η μελέτη περίπτωσης επιτρέπει την εξέταση του τρόπου με τον οποίο αυτά τα στοιχεία αποτυπώνονται ή απαιτείται να αποτυπώνονται στην πράξη.

Κύριο Ερευνητικό Ερώτημα 2: Ποιοι μηχανισμοί τεχνικής επάρκειας, μετρολογικής διασφάλισης και ελέγχου διεργασιών είναι κρίσιμοι για τη συμμόρφωση με το ISO/IEC 17025 και τα πρότυπα EN/ASTM, και πώς αυτοί συνδέονται με τις απαιτήσεις ποιοτικής αποδοχής σε ένα σύνθετο σιδηροδρομικό έργο όπως το Ροδοδάφνη–Ρίο;

Το ερώτημα αυτό αφορά τον λειτουργικό πυρήνα της εργαστηριακής αξιοπιστίας. Εξετάζει ζητήματα όπως η επικύρωση μεθόδων, η αβεβαιότητα μέτρησης, η ιχνηλασιμότητα, οι διακριβώσεις, ο έλεγχος τεκμηρίωσης και η διαχείριση μη συμμορφώσεων. Η ανάλυση δεν παραμένει σε θεωρητικό επίπεδο, αλλά συνδέεται με τις πραγματικές απαιτήσεις αποδοχής

έργων όπως σκυροδέματα σταθμών και αποβαθρών, γεωτεχνικές στρώσεις επιδομής, υλικά υποδομής και διεπαφές με κρίσιμα υποσυστήματα της σήραγγας Παναγοπούλας.

Κύριο Ερευνητικό Ερώτημα 3: Πώς επηρεάζει η αξιοπιστία, η διαπίστευση και η τεκμηριωμένη συμμόρφωση των εργαστηρίων δοκιμών τη συνολική διασφάλιση ποιότητας, την ασφάλεια και τη μακροχρόνια ανθεκτικότητα των σιδηροδρομικών έργων υποδομής μεγάλης κλίμακας;

Το ερώτημα αυτό μεταφέρει την ανάλυση από το επίπεδο της εσωτερικής εργαστηριακής λειτουργίας στο επίπεδο της επίδρασης στο ίδιο το έργο. Εξετάζει τη σχέση μεταξύ αξιόπιστων εργαστηριακών αποτελεσμάτων, αποδοχής κατασκευών, ελέγχου αποκλίσεων, ασφάλειας κρίσιμων υποσυστημάτων και απόδοσης των έργων σε ορίζοντα κύκλου ζωής. Η βιβλιογραφία χρησιμοποιείται για τη θεωρητική τεκμηρίωση αυτής της σχέσης, ενώ η μελέτη περίπτωσης λειτουργεί ως πεδίο εφαρμογής για την κατανόηση των πρακτικών συνεπειών της.

1.4 Σημασία της Έρευνας

Η σημασία της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας (ΜΔΕ) έγκειται στη συστηματική εξέταση των εργαστηρίων δοκιμών δομικών υλικών ως κρίσιμων μηχανισμών διασφάλισης ποιότητας σε σιδηροδρομικά και λοιπά έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας. Παρότι η διαπίστευση κατά ISO/IEC 17025 έχει αναλυθεί εκτενώς σε γενικά εργαστηριακά περιβάλλοντα, οι ειδικές της επιπτώσεις στο πεδίο της πολιτικής μηχανικής και των συγκοινωνιακών υποδομών παραμένουν σχετικά αποσπασματικά συντεθειμένες στη διεθνή βιβλιογραφία. Η παρούσα ΜΔΕ συμβάλλει στη συγκέντρωση και συστηματοποίηση διάσπαρτων επιστημονικών, κανονιστικών και τεχνικών πηγών σε ένα συνεκτικό αναλυτικό πλαίσιο προσανατολισμένο στη διοίκηση εργαστηρίων που υποστηρίζουν έργα υποδομής.

Από επιστημονική άποψη, η έρευνα προάγει τον ακαδημαϊκό διάλογο γύρω από τα συστήματα διαχείρισης ποιότητας, ενοποιώντας τρία πεδία που συχνά εξετάζονται διακριτά: τη θεωρία διαπίστευσης εργαστηρίων, τη μετρολογική αξιοπιστία και τη διακυβέρνηση έργων υποδομής. Μέσω της σύνθεσης διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με την εφαρμογή του ISO/IEC 17025, τα τεχνικά πρότυπα EN και ASTM και τη διοίκηση εργαστηρίων βάσει εκτίμησης κινδύνου, η ΜΔΕ συμβάλλει στη διαμόρφωση μιας πιο συνεκτικής θεωρητικής κατανόησης του τρόπου με τον οποίο τα εργαστηριακά συστήματα λειτουργούν ως θεσμοθετημένοι μηχανισμοί εμπιστοσύνης, τεχνικής επικύρωσης και κανονιστικής συμμόρφωσης. Παράλληλα, αποσαφηνίζεται η εννοιολογική σχέση μεταξύ διαπίστευσης εργαστηρίων και ευρύτερων

πλαισίων διασφάλισης ποιότητας κατασκευών, ιδίως σε σιδηροδρομικά περιβάλλοντα αυξημένης επικινδυνότητας.

Από τεχνική σκοπιά, η έρευνα αναδεικνύει τον κεντρικό ρόλο της μετρολογίας, της ιχνηλασιμότητας, της εκτίμησης αβεβαιότητας μέτρησης και των συστημάτων διακρίβωσης στη διασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων δοκιμών. Σε έργα υποδομής όπου η απόδοση των υλικών επηρεάζει άμεσα τη δομική ανθεκτικότητα και την επιχειρησιακή ασφάλεια, τα εργαστηριακά αποτελέσματα δεν αποτελούν απλώς τεχνικά δεδομένα αλλά κρίσιμα εργαλεία λήψης αποφάσεων. Μέσα από την ανάλυση του τρόπου με τον οποίο η βιβλιογραφία ορίζει τις βέλτιστες πρακτικές ελέγχου διεργασιών, διαχείρισης επάρκειας προσωπικού και χειρισμού αποκλίσεων, η ΜΔΕ συμβάλλει στη βελτιστοποίηση επιχειρησιακών προτύπων λειτουργίας ευθυγραμμισμένων με διεθνείς κανονιστικές απαιτήσεις.

Σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής, η έρευνα παρέχει δομημένη γνώση χρήσιμη για μηχανικούς, υπευθύνους εργαστηρίων, επιβλέποντες έργων και φορείς διαπίστευσης. Η σύνθεση τεκμηριωμένων βέλτιστων πρακτικών και μηχανισμών συμμόρφωσης διαμορφώνει ένα πλαίσιο αναφοράς που μπορεί να υποστηρίξει την οργάνωση, αξιολόγηση και αναβάθμιση εργαστηρίων δοκιμών που εμπλέκονται σε σιδηροδρομικά και οδικά έργα. Ιδίως στο ευρωπαϊκό κανονιστικό περιβάλλον, όπου τα έργα υποδομής υπόκεινται σε αυστηρή εποπτεία και αυξημένη δημόσια λογοδοσία, τα ευρήματα της ΜΔΕ ενισχύουν τη διακυβέρνηση, την τεκμηρίωση και την ετοιμότητα για επιθεωρήσεις και ελέγχους.

1.5 Δομή της Έρευνας

Η δομή της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας (ΜΔΕ) ακολουθεί ένα λογικά προοδευτικό σχήμα, το οποίο εκκινεί από τις εννοιολογικές και θεωρητικές βάσεις, προχωρά σε συστηματική αναλυτική σύνθεση και ολοκληρώνεται με ερμηνευτική αποτίμηση των ευρημάτων. Η οργάνωση των κεφαλαίων έχει σχεδιαστεί ώστε να διασφαλίζεται συνοχή μεταξύ θεωρητικού υποβάθρου, ερευνητικών ερωτημάτων και τελικών συμπερασμάτων.

Η ΜΔΕ ξεκινά με το Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή, στο οποίο θεμελιώνεται το εννοιολογικό και θεσμικό πλαίσιο της έρευνας. Στο κεφάλαιο αυτό ορίζεται το αντικείμενο της μελέτης, αποσαφηνίζονται ο σκοπός και οι επιμέρους στόχοι, διατυπώνονται τα ερευνητικά ερωτήματα και τεκμηριώνεται η επιστημονική και πρακτική σημασία του θέματος. Παράλληλα, τα εργαστήρια δοκιμών δομικών υλικών εντάσσονται στο ευρύτερο πλαίσιο διακυβέρνησης

σιδηροδρομικών και συγκοινωνιακών έργων υποδομής, προσδιορίζοντας την αναλυτική κατεύθυνση της ΜΔΕ.

Το Κεφάλαιο 2: Ανασκόπηση Βιβλιογραφίας αποτελεί τον θεωρητικό πυρήνα της εργασίας. Περιλαμβάνει συστηματική εξέταση της διεθνούς επιστημονικής παραγωγής και των κανονιστικών κειμένων που αφορούν τα συστήματα διαχείρισης ποιότητας σε εργαστήρια δοκιμών, με έμφαση στο ISO/IEC 17025. Αναλύεται η δομή του προτύπου και οι απαιτήσεις του ως προς την αμεροληψία, τους πόρους, τον έλεγχο διεργασιών και το σύστημα διοίκησης. Επιπλέον, εξετάζονται τα πρότυπα δοκιμών EN και ASTM για δομικά υλικά, οι βασικές αρχές μετρολογίας, όπως η ιχνηλασιμότητα, η αβεβαιότητα μέτρησης και η διακρίβωση, καθώς και η εφαρμογή της προσέγγισης βάσει εκτίμησης κινδύνου σε εργαστηριακά περιβάλλοντα. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με σύνθεση της βιβλιογραφίας που συνδέει τη διαπίστευση εργαστηρίων με την επίδοση διασφάλισης ποιότητας έργων υποδομής, απαντώντας άμεσα στα τρία ερευνητικά ερωτήματα μέσω δομημένης θεματικής ανάλυσης.

Το Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία περιγράφει τον ερευνητικό σχεδιασμό που υιοθετείται. Δεδομένου ότι η ΜΔΕ βασίζεται αποκλειστικά σε δευτερογενή βιβλιογραφική έρευνα, παρουσιάζονται τα κριτήρια επιλογής πηγών, οι παράμετροι ένταξης και αποκλεισμού, η θεματική κατηγοριοποίηση και οι αναλυτικές διαδικασίες σύνθεσης των ευρημάτων. Παράλληλα, αποσαφηνίζονται οι μεθοδολογικοί περιορισμοί και τα όρια ερμηνευτικής γενίκευσης.

Το Κεφάλαιο 4: Σύνθεση και Αναλυτική Συζήτηση ενοποιεί τα ευρήματα της βιβλιογραφικής ανασκόπησης σε συνάρτηση με τα ερευνητικά ερωτήματα. Πραγματοποιείται συγκριτική εξέταση οργανωτικών μοντέλων, μηχανισμών συμμόρφωσης και τεκμηριωμένων επιδράσεων της διαπίστευσης σε έργα υποδομής, με στόχο τον εντοπισμό κρίσιμων παραγόντων επιτυχίας και επαναλαμβανόμενων προκλήσεων.

Τέλος, το Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Κατευθύνσεις Μελλοντικής Έρευνας συνοψίζει τα βασικά ευρήματα, ερμηνεύει τις επιπτώσεις τους για τη διοίκηση εργαστηρίων σε περιβάλλοντα έργων υποδομής και διατυπώνει προτάσεις τόσο για πρακτική εφαρμογή όσο και για περαιτέρω ακαδημαϊκή διερεύνηση.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Συστήματα Διαχείρισης Ποιότητας σε Εργαστήρια Δοκιμών

2.1.1 Εξέλιξη Συστημάτων Ποιότητας

Τα Συστήματα Διαχείρισης Ποιότητας σε εργαστήρια δοκιμών έχουν εξελιχθεί ουσιαστικά τις τελευταίες δεκαετίες, μεταβαίνοντας από μηχανισμούς ελέγχου βασισμένους στην επιθεώρηση σε ολοκληρωμένα διοικητικά πλαίσια που θεμελιώνονται στην τυποποίηση διεργασιών, στη διαχείριση κινδύνου και στη συνεχή βελτίωση. Οι πρώιμες προσεγγίσεις διασφάλισης ποιότητας σε τεχνικά περιβάλλοντα είχαν κυρίως αντιδραστικό χαρακτήρα, εστιάζοντας στον έλεγχο του τελικού προϊόντος και στην ανίχνευση ελαττωμάτων (Juran & Godfrey, 1999). Η ανάπτυξη όμως τυποποιημένων προτύπων ποιότητας, και ιδίως της σειράς ISO 9000 που εισήχθη το 1987, μετέφερε το κέντρο βάρους στον προληπτικό έλεγχο διεργασιών και στη συστηματική τεκμηρίωση (Sampaio, Saraiva, & Rodrigues, 2009).

Στο εργαστηριακό περιβάλλον, η αυξανόμενη πολυπλοκότητα της επιστήμης των μετρήσεων και η ανάγκη διεθνούς συγκρισιμότητας των αποτελεσμάτων οδήγησαν στην ανάπτυξη του ISO/IEC Guide 25, το οποίο αντικαταστάθηκε μεταγενέστερα από το ISO/IEC 17025. Η μετάβαση αυτή σηματοδότησε μια κρίσιμη εννοιολογική μετατόπιση. Η ποιότητα ενός εργαστηρίου δεν αξιολογείται πλέον αποκλειστικά σε διοικητικό επίπεδο, αλλά σε συνάρτηση με την τεχνική επάρκεια, τη μετρολογική ιχνηλασιμότητα και την εκτίμηση της αβεβαιότητας μέτρησης (Magnusson & Örnemark, 2014). Η αναθεώρηση του ISO/IEC 17025 το 2017 ενίσχυσε περαιτέρω την ενσωμάτωση της προσέγγισης βάσει εκτίμησης κινδύνου και την εναρμόνιση με ευρύτερα πρότυπα συστημάτων διαχείρισης, υιοθετώντας αρχές συμβατές με το ISO 9001:2015, χωρίς να αποδυναμώνεται η τεχνική αυστηρότητα του προτύπου (ISO, 2017).

Η πρόσφατη βιβλιογραφία (Adaran et al., 2025; Huf et al., 2024; Pillai & Fox, 2025; Yang et al., 2026) επισημαίνει ότι τα σύγχρονα Συστήματα Διαχείρισης Ποιότητας στα εργαστήρια βασίζονται σε ολοκληρωμένες δομές τεκμηρίωσης, εσωτερικές επιθεωρήσεις, διορθωτικές ενέργειες, ανασκοπήσεις από τη διοίκηση και μηχανισμούς συνεχούς βελτίωσης. Στο πλαίσιο του ISO/IEC 17025, τα στοιχεία αυτά δεν λειτουργούν μόνο ως μέσα τυπικής συμμόρφωσης, αλλά ως βασικοί μηχανισμοί που ενισχύουν την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα, τη διαφάνεια, την ποιοτική επίγνωση και τη διαρκή βελτίωση της εργαστηριακής λειτουργίας.

Ειδικότερα, η διερεύνηση των κρίσιμων παραγόντων επιτυχίας για την εφαρμογή του ISO/IEC 17025 δείχνει ότι η συστηματική εσωτερική επιθεώρηση, η ενεργός εμπλοκή της διοίκησης, η παρακολούθηση της επίδοσης και οι οργανωμένες διαδικασίες βελτίωσης συνδέονται άμεσα με την αποτελεσματικότερη λειτουργία και τη μεγαλύτερη αξιοπιστία των διαπιστευμένων εργαστηρίων (Panagiotidou et al., 2025). Επιπλέον, το ίδιο το πρότυπο ISO/IEC 17025:2017 ορίζει ρητά τις εσωτερικές επιθεωρήσεις, τις διορθωτικές ενέργειες, τις ανασκοπήσεις από τη διοίκηση και τις ευκαιρίες βελτίωσης ως βασικά στοιχεία του συστήματος διαχείρισης του εργαστηρίου (ISO, 2017).

2.1.2 ISO 9001 και ISO/IEC 17025

Παρότι τα πρότυπα ISO 9001 και ISO/IEC 17025 παρουσιάζουν κοινά δομικά στοιχεία, όπως ο έλεγχος τεκμηρίωσης, η ευθύνη της διοίκησης και οι διαδικασίες διορθωτικών ενεργειών, το πεδίο εφαρμογής και το επίπεδο τεχνικής αυστηρότητας διαφέρουν ουσιωδώς. Το ISO 9001 αποτελεί γενικό πρότυπο συστήματος διαχείρισης ποιότητας, εφαρμόσιμο σε κάθε τύπο οργανισμού, με έμφαση στην ικανοποίηση του πελάτη, την αποδοτικότητα των διεργασιών και τη συνολική οργανωσιακή αποτελεσματικότητα (Hoyle, 2017). Ο βασικός του προσανατολισμός είναι η διασφάλιση ότι ο οργανισμός συμμορφώνεται σταθερά με απαιτήσεις πελατών και κανονιστικές υποχρεώσεις.

Αντιθέτως, το ISO/IEC 17025 είναι ειδικά σχεδιασμένο για εργαστήρια δοκιμών και διακριβώσεων. Περιλαμβάνει ρητές τεχνικές απαιτήσεις που αφορούν την επάρκεια του προσωπικού, την επικύρωση μεθόδων, τη διακρίβωση εξοπλισμού, τη μετρολογική ιχνηλασιμότητα, τις διαδικασίες δειγματοληψίας και την εκτίμηση της αβεβαιότητας μέτρησης (Eurachem, 2014). Όπως επισημαίνει ο Bell (2013), το ISO/IEC 17025 υπερβαίνει τη διαχειριστική συμμόρφωση, ενσωματώνοντας επιστημονικούς και μετρολογικούς ελέγχους στον πυρήνα του συστήματος ποιότητας. Η διαφοροποίηση αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε εργαστήρια πολιτικού μηχανικού, όπου τα αποτελέσματα δοκιμών επηρεάζουν άμεσα τη δομική ασφάλεια και τη ρυθμιστική έγκριση έργων.

Επιπλέον, το ISO/IEC 17025 συνδέει τα εργαστηριακά αποτελέσματα με διεθνείς μηχανισμούς αναγνώρισης μέσω φορέων διαπίστευσης και συμφωνιών αμοιβαίας αναγνώρισης. Η διαπίστευση, συνεπώς, αποτελεί επίσημη επιβεβαίωση τόσο της διοικητικής όσο και της τεχνικής επάρκειας ενός εργαστηρίου, ενώ η πιστοποίηση κατά ISO 9001 δεν επαληθεύει αυτοτελώς την εγκυρότητα και τη μετρολογική αξιοπιστία των μετρήσεων (ILAC, 2023).

2.1.3 Κουλτούρα ποιότητας και διαπίστευσης σε έργα υποδομών

Σε έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας, και ιδίως σε σιδηροδρομικά και μεταφορικά συστήματα, η διαπίστευση έχει εξελιχθεί από μια τυπική διαδικασία αναγνώρισης τεχνικής επάρκειας σε ουσιαστικό μηχανισμό διακυβέρνησης, ο οποίος ενισχύει τη διαφάνεια, τη λογοδοσία και τη διαχείριση κινδύνων. Στο ευρωπαϊκό ρυθμιστικό περιβάλλον, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων δοκιμών και διακριβώσεων συνδέεται άμεσα με την ικανότητα των εργαστηρίων να λειτουργούν βάσει διεθνώς αναγνωρισμένων απαιτήσεων, όπως αυτές που ορίζονται στο ISO/IEC 17025:2017, το οποίο ενσωματώνει ρητά την αμεροληψία, τη μετρολογική ιχνηλασιμότητα, τον έλεγχο διεργασιών και τη διαχείριση κινδύνων και ευκαιριών (ISO, 2017). Το ίδιο το ILAC υπογραμμίζει ότι η διαπίστευση προωθεί την αυξημένη χρήση και αποδοχή των αποτελεσμάτων διαπιστευμένων εργαστηρίων από τη βιομηχανία και τις κυβερνήσεις, ενισχύοντας έτσι τη θεσμική εμπιστοσύνη στα παραγόμενα δεδομένα (ILAC & IAF, 2023).

Στο πλαίσιο των έργων υποδομής, η διαπίστευση αποκτά πρόσθετη σημασία επειδή οι εργαστηριακές δοκιμές συνδέονται άμεσα με αποφάσεις αποδοχής υλικών, επαλήθευσης κατασκευαστικών φάσεων και τεκμηρίωσης συμβατικής συμμόρφωσης. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει τονίσει, μέσω των κατευθυντήριων οδηγιών της για τις δημόσιες συμβάσεις, τη σημασία της τεκμηρίωσης, της ιχνηλασιμότητας και της αξιόπιστης επαλήθευσης απαιτήσεων σε δημόσια χρηματοδοτούμενα έργα, στοιχείο που καθιστά τη διαπιστευμένη εργαστηριακή λειτουργία κρίσιμο υποστηρικτικό μηχανισμό της διακυβέρνησης έργου (European Commission, 2018). Η σχετική βιβλιογραφία στη διοίκηση κατασκευών δείχνει ότι αστοχίες ποιότητας συχνά προκύπτουν όχι μόνο από τεχνικά σφάλματα, αλλά και από κατακερματισμένη επικοινωνία και ανεπαρκή διασύνδεση μεταξύ των μηχανισμών ελέγχου ποιότητας και της γενικότερης διοίκησης του έργου (Love et al., 2016). Στο πλαίσιο αυτό, η κουλτούρα ποιότητας και διαπίστευσης λειτουργεί ως μηχανισμός ενοποίησης: ενσωματώνει τις εργαστηριακές διαδικασίες στις ευρύτερες δομές διασφάλισης ποιότητας και επιβάλλει πειθαρχία τεκμηρίωσης, εξωτερικής αξιολόγησης και εσωτερικής βελτίωσης.

Η σημασία αυτής της κουλτούρας είναι ακόμη μεγαλύτερη σε σιδηροδρομικά έργα, όπου κρίσιμες τεχνικές παράμετροι, όπως η αντοχή σκυροδέματος, η ποιότητα έρματος, η φέρουσα ικανότητα εδάφους και η αξιοπιστία των γεωτεχνικών και δομικών δοκιμών, επηρεάζουν άμεσα την ασφάλεια, την ανθεκτικότητα και τη μακροχρόνια λειτουργική επίδοση του έργου. Η ενσωμάτωση της λογικής βάσει κινδύνου στο ISO/IEC 17025:2017 ενισχύει περαιτέρω τον

προληπτικό χαρακτήρα του συστήματος, καθώς μετατοπίζει το ενδιαφέρον από την απλή ανίχνευση μη συμμορφώσεων προς τη συστηματική πρόληψη σφαλμάτων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων (ISO, 2017). Σε αυτή τη βάση, η διαπίστευση δεν συνιστά μόνο τεχνική ή κανονιστική υποχρέωση, αλλά αναδεικνύεται σε θεσμικό στοιχείο της οργανωσιακής κουλτούρας ποιότητας, το οποίο υποστηρίζει τη συνεκτική διαχείριση αποδείξεων συμμόρφωσης και την αξιοπιστία των τεχνικών αποφάσεων. Η εξέλιξη, επομένως, των εργαστηριακών συστημάτων ποιότητας σε έργα υποδομής δεν πρέπει να περιγράφεται ως μια στενή, συμμορφωτική προσέγγιση της διαπίστευσης, αλλά ως σταδιακή διαμόρφωση μιας κουλτούρας ποιότητας και διαπίστευσης, μέσα στην οποία η τεχνική επάρκεια, η ιχνηλασιμότητα, οι εξωτερικές αξιολογήσεις και η συνεχής βελτίωση συγκροτούν ενιαίο πλαίσιο διακυβέρνησης.

2.2 Πρότυπο ISO/IEC 17025:2017

2.2.1 Δομή του Προτύπου

Το ISO/IEC 17025:2017 διαρθρώνεται βάσει αρχιτεκτονικής διακριτών παραγράφων, σχεδιασμένης ώστε να ενσωματώνει απαιτήσεις συστήματος διαχείρισης με κριτήρια τεχνικής επάρκειας. Το πρότυπο οργανώνεται σε πέντε κύριες ενότητες μετά τις εισαγωγικές διατάξεις: (1) Γενικές Απαιτήσεις, (2) Διαρθρωτικές Απαιτήσεις, (3) Απαιτήσεις Πόρων, (4) Απαιτήσεις Διεργασιών και (5) Απαιτήσεις Συστήματος Διαχείρισης (ISO, 2017). Η δομή αυτή ευθυγραμμίζεται με την Κοινή Δομή Υψηλού Επιπέδου που υιοθετείται στα πρότυπα συστημάτων διαχείρισης ISO, διευκολύνοντας τη συμβατότητα με το ISO 9001:2015, διατηρώντας παράλληλα την εξειδικευμένη τεχνική αυστηρότητα που απαιτείται σε εργαστηριακά περιβάλλοντα.

Οι Γενικές Απαιτήσεις, Παράγραφος 4, αφορούν την αμεροληψία και την εμπιστευτικότητα, θεμελιώνοντας το ηθικό και λειτουργικό πλαίσιο ανεξαρτησίας του εργαστηρίου. Οι Διαρθρωτικές Απαιτήσεις, Παράγραφος 5, καθορίζουν τη νομική ταυτότητα του εργαστηρίου, τις ευθύνες διακυβέρνησης και την οργανωτική αρμοδιότητα. Οι ενότητες αυτές διασφαλίζουν ότι το εργαστήριο λειτουργεί ως σαφώς προσδιορισμένη οντότητα με μηχανισμούς λογοδοσίας.

Οι Απαιτήσεις Πόρων, Παράγραφος 6, επικεντρώνονται στην επάρκεια προσωπικού, στις εγκαταστάσεις, στον εξοπλισμό, στη μετρολογική ιχνηλασιμότητα και στις εξωτερικά

παρεχόμενες υπηρεσίες. Η ενότητα αυτή συνδέει την οργανωτική επάρκεια με την τεχνική ικανότητα. Οι Απαιτήσεις Διεργασιών, Παράγραφος 7, αποτελούν τον τεχνικό πυρήνα του προτύπου και καλύπτουν την ανασκόπηση συμβάσεων, την επιλογή και επικύρωση μεθόδων, τη δειγματοληψία, τον χειρισμό αντικειμένων δοκιμής, την τήρηση τεχνικών αρχείων, την αξιολόγηση αβεβαιότητας μέτρησης, την αναφορά αποτελεσμάτων και τον έλεγχο μη συμμορφούμενων εργασιών.

Τέλος, οι Απαιτήσεις Συστήματος Διαχείρισης, Παράγραφος 8, περιλαμβάνουν τις εσωτερικές επιθεωρήσεις, τις διορθωτικές ενέργειες, την εφαρμογή προσέγγισης βάσει εκτίμησης κινδύνου και τους μηχανισμούς συνεχούς βελτίωσης. Η εν λόγω δομή διασφαλίζει ότι η επάρκεια του εργαστηρίου αξιολογείται ολιστικά, ενοποιώντας διακυβέρνηση, τεχνική αξιοπιστία και συστηματικό έλεγχο ποιότητας σε ένα ενιαίο πλαίσιο συμμόρφωσης.

2.2.2 Απαιτήσεις Αμεροληψίας και Εμπιστευτικότητας

Η αμεροληψία και η εμπιστευτικότητα αποτελούν θεμελιώδεις πυλώνες του ISO/IEC 17025:2017 και ρυθμίζονται ρητά στην Παράγραφο 4 του προτύπου. Οι απαιτήσεις αυτές αναγνωρίζουν ότι η τεχνική επάρκεια, από μόνη της, δεν επαρκεί για τη διασφάλιση αξιόπιστων αποτελεσμάτων, εφόσον οι εργαστηριακές δραστηριότητες ενδέχεται να επηρεάζονται από συγκρούσεις συμφερόντων ή από υπονόμηση της ακεραιότητας των δεδομένων (ISO, 2017).

Το πρότυπο επιβάλλει στα εργαστήρια την υποχρέωση συνεχούς αναγνώρισης και αξιολόγησης κινδύνων που σχετίζονται με την αμεροληψία, καθώς και την εφαρμογή μηχανισμών για την εξάλειψη ή τον περιορισμό τους. Οι μηχανισμοί αυτοί περιλαμβάνουν διαρθρωτικές δικλίδες, όπως η ανεξαρτησία στη λήψη τεχνικών αποφάσεων, η ύπαρξη τεκμηριωμένων πολιτικών σύγκρουσης συμφερόντων και ο διαχωρισμός των τεχνικών λειτουργιών από εμπορικές πιέσεις. Η προσέγγιση βάσει εκτίμησης κινδύνου ενσωματώνεται ρητά, απαιτώντας από τα εργαστήρια να αξιολογούν προληπτικά πιθανές απειλές που απορρέουν από οργανωτικές σχέσεις, οικονομικές εξαρτήσεις ή εξωτερικές επιρροές.

Η υποχρέωση εμπιστευτικότητας καλύπτει κάθε πληροφορία που λαμβάνεται ή παράγεται κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών δραστηριοτήτων. Τα εργαστήρια οφείλουν να προστατεύουν δεδομένα πελατών, αποτελέσματα δοκιμών και ιδιοκτησιακές πληροφορίες μέσω ελεγχόμενων συστημάτων πρόσβασης, ασφαλών διαδικασιών τεκμηρίωσης και σαφώς

καθορισμένων πρωτοκόλλων επικοινωνίας. Η γνωστοποίηση πληροφοριών επιτρέπεται μόνο κατόπιν εξουσιοδότησης του πελάτη ή όταν επιβάλλεται από τον νόμο, οπότε και ο πελάτης πρέπει να ενημερώνεται σχετικά.

Οι απαιτήσεις αυτές ενισχύουν την εμπιστοσύνη μεταξύ εργαστηρίων, πελατών και ρυθμιστικών αρχών. Σε έργα υποδομής, όπου τα εργαστηριακά αποτελέσματα δύνανται να επηρεάσουν τη συμβατική αποδοχή εργασιών, τις κανονιστικές εγκρίσεις και την επικύρωση της ασφάλειας, η αμεροληψία και η εμπιστευτικότητα αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις για τη διατήρηση τεχνικής αξιοπιστίας και νομικής τεκμηρίωσης. Κατά συνέπεια, η Παράγραφος 4 θεμελιώνει το πλαίσιο ηθικής διακυβέρνησης πάνω στο οποίο οικοδομείται το σύνολο του συστήματος συμμόρφωσης κατά ISO/IEC 17025.

2.2.3 Απαιτήσεις πόρων

Η Παράγραφος 6 του ISO/IEC 17025:2017 καθορίζει τις απαιτήσεις πόρων που είναι αναγκαίες για τη διασφάλιση της επάρκειας του εργαστηρίου, εστιάζοντας στο προσωπικό, στις εγκαταστάσεις και περιβαλλοντικές συνθήκες, στον εξοπλισμό, στη μετρολογική ιχνηλασιμότητα και στα εξωτερικά παρεχόμενα προϊόντα και υπηρεσίες (ISO, 2017). Τα στοιχεία αυτά συνιστούν τον λειτουργικό πυρήνα ενός διαπιστευμένου εργαστηρίου.

Η επάρκεια του προσωπικού αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα αξιοπιστίας. Το πρότυπο απαιτεί από τα εργαστήρια να καθορίζουν τις απαιτήσεις επάρκειας για κάθε λειτουργία που επηρεάζει τα αποτελέσματα δοκιμών και να διασφαλίζουν ότι το προσωπικό διαθέτει τα κατάλληλα προσόντα μέσω εκπαίδευσης, κατάρτισης και εμπειρίας. Η επάρκεια πρέπει να τεκμηριώνεται, να αξιολογείται περιοδικά και να συνοδεύεται από επίσημη εξουσιοδότηση για συγκεκριμένες δραστηριότητες. Οι Magnusson και Örnemark (2014) επισημαίνουν ότι η τεχνική γνώση δεν επαρκεί χωρίς δομημένες διαδικασίες εξουσιοδότησης και παρακολούθησης απόδοσης. Αντίστοιχα, οι Ellison και Williams (2012) τονίζουν ότι τα εργαστήρια οφείλουν να διατηρούν αντικειμενικά αποδεικτικά στοιχεία επάρκειας, ιδίως κατά την εφαρμογή σύνθετων μεθόδων που απαιτούν εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης.

Οι εγκαταστάσεις και οι περιβαλλοντικές συνθήκες πρέπει να είναι κατάλληλες για την ορθή εκτέλεση των εργαστηριακών δραστηριοτήτων. Παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, οι δονήσεις και η επιμόλυνση δύνανται να επηρεάσουν σημαντικά την αξιοπιστία των μετρήσεων. Η Eurachem (2014) υπογραμμίζει ότι ο έλεγχος των περιβαλλοντικών παραμέτρων είναι ιδιαίτερα κρίσιμος σε δοκιμές δομικών υλικών, όπου ακόμη και μικρές αποκλίσεις μπορούν να μεταβάλουν τα αποτελέσματα μηχανικής αντοχής.

Η διαχείριση εξοπλισμού απαιτεί τα όργανα να είναι κατάλληλα για τον σκοπό χρήσης, να διακρίβωνονται ορθά και να είναι ιχνηλάσιμα προς εθνικά ή διεθνή πρότυπα αναφοράς. Τα διαστήματα διακρίβωσης, οι διαδικασίες συντήρησης και η επαλήθευση εξοπλισμού πρέπει να τεκμηριώνονται συστηματικά (ISO, 2017). Η μετρολογική ιχνηλασιμότητα διασφαλίζει αδιάσπαστη αλυσίδα διακρίβωσης που συνδέει τις μετρήσεις με αναγνωρισμένα πρότυπα αναφοράς, εξασφαλίζοντας συγκρισιμότητα αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων και δικαιοδοσιών (JCGM, 2012).

2.2.4 Απαιτήσεις Διαδικασίας

Η Παράγραφος 7 του ISO/IEC 17025:2017 καθορίζει τις απαιτήσεις διεργασιών που διέπουν τη λειτουργία των εργαστηρίων και αποτελεί τον τεχνικό πυρήνα του προτύπου. Οι απαιτήσεις αυτές καλύπτουν ολόκληρο τον κύκλο ζωής της δοκιμής, συμπεριλαμβανομένης της ανασκόπησης συμβάσεων, της επιλογής και επικύρωσης μεθόδων, της δειγματοληψίας, του χειρισμού αντικειμένων δοκιμής, της τήρησης τεχνικών αρχείων, της αξιολόγησης της αβεβαιότητας μέτρησης, της αναφοράς αποτελεσμάτων και της διαχείρισης μη συμμορφούμενων εργασιών (ISO, 2017).

Η επικύρωση και επαλήθευση μεθόδων αποτελούν κρίσιμες διαδικασίες για τη διασφάλιση της καταλληλότητας των εφαρμοζόμενων μεθόδων ως προς τον επιδιωκόμενο σκοπό. Όταν χρησιμοποιούνται τυποποιημένες μέθοδοι, όπως EN ή ASTM, το εργαστήριο οφείλει να επαληθεύει την ικανότητά του να τις εφαρμόζει ορθά. Στην περίπτωση μη τυποποιημένων ή τροποποιημένων μεθόδων απαιτείται πλήρης επικύρωση, ώστε να τεκμηριώνεται η ορθότητα, η ακρίβεια, η επαναληψιμότητα και η μετρητική ικανότητα της μεθόδου (Eurachem, 2014). Οι μελέτες επικύρωσης πρέπει να τεκμηριώνονται και να επανεξετάζονται περιοδικά για τη διασφάλιση της διαρκούς καταλληλότητάς τους.

Οι διαδικασίες δειγματοληψίας είναι εξίσου κρίσιμες, ιδίως στις δοκιμές δομικών υλικών, όπου η αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος επηρεάζει άμεσα την εγκυρότητα των συμπερασμάτων. Το ISO/IEC 17025 απαιτεί τεκμηριωμένα σχέδια και διαδικασίες δειγματοληψίας που λαμβάνουν υπόψη στατιστικές παραμέτρους και τη μεταβλητότητα των υλικών. Οι Magnusson και Örnemark (2014) επισημαίνουν ότι ανεπαρκής δειγματοληψία εισάγει αβεβαιότητα η οποία δεν μπορεί να διορθωθεί σε μεταγενέστερα στάδια ανάλυσης.

Τα τεχνικά αρχεία και η αναφορά αποτελεσμάτων διασφαλίζουν ιχνηλασιμότητα και διαφάνεια. Τα εργαστήρια οφείλουν να τηρούν λεπτομερή αρχεία που επιτρέπουν την ανακατασκευή των δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανομένων πρωτογενών δεδομένων,

υπολογισμών, αναφορών διακρίβωσης και περιβαλλοντικών συνθηκών. Οι εκθέσεις δοκιμών πρέπει να περιλαμβάνουν σαφή αναγνώριση των εφαρμοζόμενων μεθόδων, τα ληφθέντα αποτελέσματα, την αβεβαιότητα μέτρησης όπου απαιτείται και τυχόν αποκλίσεις από τυποποιημένες διαδικασίες (ISO, 2017). Οι Ellison και Williams (2012) τονίζουν ότι η διαφανής αναφορά ενισχύει τη συγκρισιμότητα και τη νομική τεκμηρίωση των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, τα εργαστήρια οφείλουν να διαθέτουν διαδικασίες διαχείρισης μη συμμορφούμενων εργασιών, εφαρμογής διορθωτικών ενεργειών και αξιολόγησης κινδύνων που συνδέονται με τεχνικές διεργασίες. Οι δομημένοι αυτοί μηχανισμοί ελέγχου διασφαλίζουν ότι τα εργαστηριακά αποτελέσματα παραμένουν αξιόπιστα ακόμη και σε σύνθετα και απαιτητικά περιβάλλοντα έργων υποδομής.

2.2.5 Απαιτήσεις Συστήματος Διαχείρισης

Η Παράγραφος 8 του ISO/IEC 17025:2017 καθορίζει τις απαιτήσεις του συστήματος διαχείρισης που διασφαλίζουν ότι τα εργαστήρια λειτουργούν εντός δομημένου πλαισίου διακυβέρνησης, ελέγχου και συνεχούς βελτίωσης. Σε αντίθεση με προηγούμενες εκδόσεις του προτύπου, η αναθεώρηση του 2017 ενσωματώνει ρητά την προσέγγιση βάσει εκτίμησης κινδύνου, ευθυγραμμίζοντας τη διοίκηση εργαστηρίων με σύγχρονες αρχές συστημάτων ποιότητας (ISO, 2017).

Η προσέγγιση βάσει εκτίμησης κινδύνου απαιτεί από τα εργαστήρια να εντοπίζουν και να αντιμετωπίζουν κινδύνους και ευκαιρίες που ενδέχεται να επηρεάσουν την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων. Οι κίνδυνοι αυτοί μπορεί να σχετίζονται με την αμεροληψία, την τεχνική αξιοπιστία, την ακεραιότητα δεδομένων και τη λειτουργική συνέχεια. Το πρότυπο δεν επιβάλλει συγκεκριμένα εργαλεία διαχείρισης κινδύνου, αλλά παρέχει ευελιξία ως προς την εφαρμογή, υπό την προϋπόθεση ότι ο εντοπισμός και τα μέτρα μετριασμού είναι τεκμηριωμένα και αναλογικά προς το επίπεδο κινδύνου (Kruger & Hanlon, 2019). Σε εργαστηριακά περιβάλλοντα, οι κίνδυνοι μπορεί να προκύπτουν από αστοχία εξοπλισμού, ανεπαρκή επάρκεια προσωπικού, ασταθείς περιβαλλοντικές συνθήκες ή εξωτερικές πιέσεις. Η συστηματική αξιολόγηση κινδύνων ενισχύει τον προληπτικό έλεγχο αντί της εκ των υστέρων διόρθωσης.

Οι εσωτερικές επιθεωρήσεις αποτελούν βασικό στοιχείο του συστήματος διαχείρισης. Τα εργαστήρια υποχρεούνται να διενεργούν περιοδικούς ελέγχους προκειμένου να επαληθεύουν τη συμμόρφωση τόσο με το ISO/IEC 17025 όσο και με τις δικές τους τεκμηριωμένες διαδικασίες. Οι επιθεωρήσεις πρέπει να είναι αντικειμενικές, ανεξάρτητες και επαρκώς

τεκμηριωμένες. Σύμφωνα με τον Hoyle (2017), η εσωτερική επιθεώρηση λειτουργεί ως μηχανισμός αυτορρύθμισης, εντοπίζοντας συστημικές αδυναμίες πριν αυτές εξελιχθούν σε μη συμμορφώσεις ή ευρήματα εξωτερικών ελέγχων. Τα αποτελέσματα των επιθεωρήσεων τροφοδοτούν τη διαδικασία ανασκόπησης από τη διοίκηση, διασφαλίζοντας εποπτεία σε ανώτατο επίπεδο.

Οι διορθωτικές ενέργειες ενεργοποιούνται όταν εντοπίζονται μη συμμορφώσεις. Τα εργαστήρια οφείλουν να αναλύουν τα βαθύτερα αίτια, να εφαρμόζουν κατάλληλα διορθωτικά μέτρα και να αξιολογούν την αποτελεσματικότητά τους (ISO, 2017). Ο Dale (2015) επισημαίνει ότι τα αποτελεσματικά συστήματα διορθωτικών ενεργειών υπερβαίνουν την επιφανειακή αντιμετώπιση συμπτωμάτων και εστιάζουν στη διόρθωση των υποκείμενων αποτυχιών διεργασιών, υποστηρίζοντας τη συνεχή βελτίωση. Συνολικά, η προσέγγιση βάσει εκτίμησης κινδύνου, οι εσωτερικές επιθεωρήσεις και οι διορθωτικές ενέργειες συγκροτούν έναν ενιαίο κύκλο ελέγχου που ενισχύει την ανθεκτικότητα, την τεχνική αξιοπιστία και τη μακροχρόνια συμμόρφωση των διαπιστευμένων εργαστηρίων δοκιμών.

2.3 Πρότυπα Δοκιμών Δομικών Υλικών

2.3.1 Πρότυπα Δοκιμών Σκυροδέματος (EN και ASTM)

Ο ποιοτικός έλεγχος σκυροδέματος σε έργα υποδομής διέπεται από διττό κανονιστικό επίπεδο που περιλαμβάνει πρότυπα προδιαγραφών υλικού και πρότυπα μεθόδων δοκιμών. Στο ευρωπαϊκό σύστημα EN, το EN 206 αποτελεί το βασικό κανονιστικό πλαίσιο για την προδιαγραφή, την επίδοση, την παραγωγή και την αξιολόγηση συμμόρφωσης του σκυροδέματος, συνδέοντας κατηγορίες έκθεσης, κατηγορίες αντοχής, απαιτήσεις ανθεκτικότητας και κριτήρια συμμόρφωσης με τον έλεγχο παραγωγής και τις αποφάσεις αποδοχής (British Standards Institution, 2021). Οι εργαστηριακές δοκιμές εξειδικεύουν τις απαιτήσεις αυτές σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής μέσω εναρμονισμένων μεθόδων, κυρίως της σειράς EN 12390 για το σκληρυμένο σκυρόδεμα και της σειράς EN 12350 για το νωπό σκυρόδεμα. Ενδεικτικά, το πρότυπο EN 12390-3 καθορίζει τη μέθοδο προσδιορισμού της αντοχής σε θλίψη δοκιμών, υποστηρίζοντας τον έλεγχο αποδοχής και τη σύγκριση με την καθορισμένη κατηγορία αντοχής (British Standards Institution, 2019).

Παράλληλα, τα πρότυπα ASTM καταλαμβάνουν σημαντική θέση στη διεθνή πρακτική των δοκιμών σκυροδέματος, ιδίως σε έργα όπου η τεχνική τεκμηρίωση και η συμβατική συμμόρφωση στηρίζονται σε πολλαπλά κανονιστικά και προτυποποιητικά πλαίσια. Στη

σχετική βιβλιογραφία επισημαίνεται ότι τα πρότυπα δοκιμών δεν λειτουργούν απλώς ως διαδικαστικές οδηγίες, αλλά ως μηχανισμοί ελέγχου της συγκρισιμότητας, της επαναληψιμότητας και της αποδεικτικής ισχύος των εργαστηριακών αποτελεσμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται τόσο για την τεχνική αξιολόγηση του υλικού όσο και για τη λήψη αποφάσεων συμμόρφωσης και αποδοχής σε επίπεδο έργου (Skrzypczak et al., 2021; Gavela et al., 2023). Ειδικότερα, το ASTM C39/C39M ορίζει τη δοκιμή θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος, ενώ άλλα πρότυπα ASTM καλύπτουν κρίσιμες παραμέτρους του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος, όπως η κάθιση, η περιεκτικότητα αέρα, η πυκνότητα και η δειγματοληψία, συγκροτώντας ένα συνεκτικό πλαίσιο ελέγχου της ποιότητας και της αντιπροσωπευτικότητας των μετρήσεων (ASTM International, 2024a, 2024b, 2024c, 2024d, 2025).

Παρά το γεγονός ότι τα πρότυπα EN και ASTM παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ως προς τη γεωμετρία των δοκιμίων, τις συνθήκες προετοιμασίας και ορισμένες διαδικαστικές λεπτομέρειες, η συγκριτική έρευνα δείχνει ότι αμφότερα επιδιώκουν τη μετρολογικά ελεγχόμενη αποτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος μέσω τυποποιημένων συνθηκών συντήρησης, καθορισμένων ρυθμών φόρτισης και δομημένης αναφοράς αποτελεσμάτων, ώστε να περιορίζεται η αβεβαιότητα και να ενισχύεται η αξιοπιστία της αξιολόγησης (De La Rosa & Ruiz, 2025; Gavela et al., 2023). Υπό αυτή την έννοια, στα σιδηροδρομικά και γενικότερα στα βαρέα έργα υποδομής, τα πρότυπα EN και ASTM δεν αφορούν μόνο την ορθή εκτέλεση των δοκιμών, αλλά συγκροτούν το τεχνικό και συμβατικό υπόβαθρο βάσει του οποίου ελέγχεται η αντοχή, η ανθεκτικότητα και η συμμόρφωση του σκυροδέματος με τις απαιτήσεις του έργου, σε συνάρτηση και με το EN 206 ως βασικό πλαίσιο προδιαγραφής, παραγωγής και ελέγχου συμμόρφωσης του σκυροδέματος (British Standards Institution [BSI], 2021; de Jesus et al., 2025; Skrzypczak et al., 2021).

2.3.2 Πρότυπα Δοκιμών Ασφάλτου

Ο ποιοτικός έλεγχος ασφαλτομιγμάτων βασίζεται σε συνδυασμό προτύπων προδιαγραφών μίγματος και προτύπων μεθόδων δοκιμών που καλύπτουν τη σύνθεση, τα ογκομετρικά χαρακτηριστικά, τη μηχανική απόδοση και την ανθεκτικότητα. Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, η σειρά EN 13108 καθορίζει τις προδιαγραφές υλικών για βασικές κατηγορίες ασφαλτομιγμάτων, όπως το Ασφαλτοσκυρόδεμα και τη Λιθομαστίχη ασφάλτου (Ασφαλτικό σκυρόδεμα τύπου SMA), περιλαμβάνοντας απαιτήσεις επιλογής συστατικών, κλάσεις

επιδόσεων και κριτήρια συμμόρφωσης ανάλογα με τη χρήση (British Standards Institution, n.d.). Οι απαιτήσεις για το συνδετικό υλικό καθορίζονται συνήθως από το EN 12591, το οποίο προσδιορίζει τις ιδιότητες και τα κριτήρια συμμόρφωσης της ασφάλτου οδοποιίας (European Committee for Standardization [CEN], 2009).

Η εργαστηριακή επαλήθευση πραγματοποιείται μέσω της σειράς EN 12697, ενός εκτεταμένου συνόλου τυποποιημένων μεθόδων δοκιμών για ασφαλτομίγματα. Η σειρά καλύπτει δειγματοληψία, παρασκευή δοκιμών, ογκομετρικές ιδιότητες, χαρακτηρισμό δυσκαμψίας και κόπωσης, διαπερατότητα και αντίσταση σε τροχοαυλάκωση, επιτρέποντας συνεπή έλεγχο ποιότητας μεταξύ έργων και χωρών (British Standards Institution, n.d.). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η δοκιμή Marshall, όπως τυποποιείται στο EN 12697-34, η οποία προσδιορίζει τη σταθερότητα, τη ροή και τον λόγο Marshall για πυκνής διαβάθμισης ασφαλτομίγματα υπό ελεγχόμενες συνθήκες ανάμιξης και συμπύκνωσης (CEN, 2020).

Τα πρότυπα ASTM εφαρμόζονται επίσης ευρέως, ιδίως σε έργα όπου τα συμβατικά τεύχη ευθυγραμμίζονται με αμερικανικές προδιαγραφές ή όπου απαιτείται διασυνοριακή συγκρισιμότητα. Το ASTM D6927 καθορίζει τη μέθοδο δοκιμής Marshall για τον προσδιορισμό σταθερότητας και ροής, καθώς και τα όρια εφαρμογής της (ASTM International, 2022). Η πρακτική σημασία των προτύπων αυτών έγκειται στο ότι μετατρέπουν τις παραδοχές σχεδιασμού ασφαλτομίγματος σε μετρήσιμους δείκτες, όπως σταθερότητα, ροή, πυκνότητα και ποσοστό κενών, υποστηρίζοντας αποφάσεις αποδοχής, διερεύνηση αποκλίσεων διεργασίας και διασφάλιση ανθεκτικότητας επιφανειών σε υποδομές υψηλής κυκλοφοριακής φόρτισης.

2.3.3 Πρότυπα Δοκιμών Εδάφους

Τα πρότυπα δοκιμών εδάφους αποτελούν τη βάση επαλήθευσης χωματουργικών εργασιών, θεμελιώσεων και στρώσεων έδρασης σε συγκοινωνιακά έργα, τυποποιώντας τον τρόπο με τον οποίο μετρώνται η φυσική κατάσταση, η ταξινόμηση, η αντοχή, η δυσκαμψία, η συμπίεστικότητα και η υδραυλική συμπεριφορά των εδαφικών υλικών. Στο ευρωπαϊκό πλαίσιο, η σειρά EN ISO 17892 καθορίζει εργαστηριακές μεθόδους δοκιμών εδαφών, καλύπτοντας βασικούς προσδιορισμούς όπως η υγρασία, η κοκκομετρική διαβάθμιση, η συμπίεστικότητα σε οιδητόμετρο, η συνεκτικότητα με κώνο πτώσης, η ανεμπόδιστη θλιπτική αντοχή, η τριαξονική δοκιμή και η άμεση διάτμηση (British Standards Institution, n.d.). Οι μέθοδοι αυτές διασφαλίζουν ότι τα γεωτεχνικά δεδομένα είναι τεχνικά έγκυρα και συγκρίσιμα μεταξύ

διαφορετικών εργαστηρίων, ιδίως όταν χρησιμοποιούνται για ελέγχους σχεδιασμού και αποδοχή χωματουργικών εργασιών.

Ο έλεγχος συμπίκνωσης, που αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για επιχώματα, υπόβαση και τεχνικά βελτιωμένες στρώσεις, βασίζεται επίσης σε τυποποιημένες εργαστηριακές σχέσεις μεταξύ υγρασίας και ξηρής πυκνότητας. Στο πλαίσιο μη δεσμευμένων ή υδραυλικά δεσμευμένων στρώσεων, η σειρά EN 13286 παρέχει μεθόδους δοκιμών για τον προσδιορισμό εργαστηριακής αναφοράς πυκνότητας και βέλτιστης υγρασίας, καθώς και συμπληρωματικές διαδικασίες αξιολόγησης επιδόσεων (British Standards Institution, n.d.). Με τον τρόπο αυτό διαμορφώνονται συνεκτικά κριτήρια αναφοράς για τον έλεγχο συμπίκνωσης στο έργο και ερμηνεία των επιτόπιων μετρήσεων πυκνότητας εντός τυποποιημένου πλαισίου.

Τα πρότυπα ASTM παρέχουν αντίστοιχες, διεθνώς αναγνωρισμένες μεθόδους στη γεωτεχνική μηχανική. Το ASTM D698 καθορίζει τα χαρακτηριστικά εργαστηριακής συμπίκνωσης με «τυπική ενέργεια», παράγοντας την καμπύλη συμπίκνωσης και τις σχέσεις αναφοράς ξηρής μονάδας βάρους και υγρασίας που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο ποιότητας (ASTM International, 2021). Για την αξιολόγηση συνεκτικότητας και ταξινόμησης εδαφών, το ASTM D4318 καθορίζει τον προσδιορισμό των ορίων υδαρότητας και πλαστικότητας και του δείκτη πλαστικότητας, παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα την εκτίμηση συμπεριφοράς, την καταλληλότητα για συμπίκνωση και τον κίνδυνο ευαισθησίας στην υγρασία (ASTM International, 2018).

Κοινός στόχος τόσο του συστήματος EN όσο και του ASTM είναι η μείωση της αβεβαιότητας που προκύπτει από την ετερογένεια των εδαφών μέσω τυποποιημένης δειγματοληψίας, προετοιμασίας, ελέγχου διαδικασιών και αναφοράς αποτελεσμάτων. Η τυποποίηση αυτή είναι καθοριστική για τεκμηριωμένες αποφάσεις αποδοχής σε έργα υποδομής υψηλής απαίτησης ασφάλειας και επιδόσεων.

2.3.4 Πρότυπα Δοκιμών Αδρανών Υλικών

Τα αδρανή υλικά αποτελούν θεμελιώδη συστατικά για σκυρόδεμα, ασφαλτομίγματα και κοκκώδεις στρώσεις, ενώ η τυποποιημένη χαρακτηριστικοποίησή τους είναι κρίσιμη για τον έλεγχο κοκκομετρικής διαβάθμισης, μηχανικής αντοχής, ανθεκτικότητας και μακροχρόνιας απόδοσης, συμπεριλαμβανομένων εφαρμογών όπως το σιδηροδρομικό έρμα. Στο ευρωπαϊκό σύστημα, οι γεωμετρικές ιδιότητες ρυθμίζονται μέσω της σειράς EN 933, με το EN 933-1 να χρησιμοποιείται ευρέως για τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής διαβάθμισης με κοσκίνιση, υποστηρίζοντας τη συμμόρφωση με τις προδιαγραφές και τον έλεγχο παραγωγής (Ελληνικός

Οργανισμός Τυποποίησης, n.d.). Η μηχανική αντοχή αξιολογείται μέσω της σειράς EN 1097 και ειδικότερα του EN 1097-2, το οποίο καθορίζει τη δοκιμή Los Angeles για την αντίσταση σε θραύση και περιλαμβάνει ρητές αναφορές εφαρμογής σε υλικά όπως το σιδηροδρομικό έρμα (CEN, 2020).

Στο πλαίσιο ASTM, η κοκκομετρική διαβάθμιση καθορίζεται συνήθως μέσω του ASTM C136/C136M, που αφορά την κοσκίνιση λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών, αποτελώντας τη βάση για έλεγχο συμμόρφωσης με καμπύλες προδιαγραφών και για τον σχεδιασμό μιγμάτων (ASTM International, 2025). Συλλογικά, τα πρότυπα EN και ASTM παρέχουν το μετρολογικό υπόβαθρο για τον έλεγχο διαβάθμισης και αντοχής σε θραύση, ιδιότητες που επηρεάζουν άμεσα τη συμπεκνωσιμότητα, την αλληλοεμπλοκή κόκκων, τη δυσκαμψία, την αποστράγγιση και τη φθορά υπό κυκλοφοριακή φόρτιση. Κατά συνέπεια, η τυποποιημένη δοκιμή αδρανών υλικών υποστηρίζει άμεσα την ποιότητα μιγμάτων, τη δομική απόδοση και τη διάρκεια ζωής έργων υποδομής.

2.3.5 Εναρμόνιση μεταξύ των πλαισίων EN και ASTM

Η εναρμόνιση μεταξύ των πλαισίων EN και ASTM δεν αποσκοπεί στην ταύτιση των προτύπων, αλλά στη διασφάλιση τεχνικής ισοδυναμίας, μετρολογικής ιχνηλασιμότητας και συμβατικής σαφήνειας. Και τα δύο συστήματα δομούν τις απαιτήσεις τους γύρω από τυποποιημένο εξοπλισμό, ελεγχόμενες συνθήκες προετοιμασίας και συντήρησης, καθορισμένες διαδικασίες και σαφώς ορισμένη αναφορά αποτελεσμάτων, διασφαλίζοντας την παραγωγή επαναλήψιμων δεδομένων, ικανών να υποστηρίξουν αποφάσεις αποδοχής και την επίλυση διαφορών. Ωστόσο, διαφοροποιήσεις στη γεωμετρία δοκιμίων, στις μεθόδους συμπύκνωσης, στα καθεστώτα συντήρησης και στους ορισμούς παραμέτρων μπορεί να οδηγήσουν σε συστηματικές αποκλίσεις εάν τα αποτελέσματα συγκριθούν χωρίς κατάλληλη τεχνική προσαρμογή, όπως συμβαίνει για παράδειγμα με τις συμβάσεις EN και ASTM ως προς τα δοκίμια σκυροδέματος ή τα πρωτόκολλα συμπύκνωσης ασφαλτομιγμάτων.

Σε πολυεθνικά έργα υποδομής, η εναρμόνιση μεταξύ διαφορετικών προτυποποιητικών πλαισίων επιτυγχάνεται συνήθως μέσω τριών βασικών μηχανισμών. Πρώτον, απαιτείται ρητή συμβατική πρόβλεψη της οικογένειας προτύπων που διέπει το έργο, ώστε να αποφεύγονται ασάφειες ως προς τις εφαρμοστέες τεχνικές απαιτήσεις. Δεύτερον, κρίσιμο ρόλο διαδραματίζει η κατάρτιση τεχνικών εγγράφων αντιστοιχίσης και τεκμηριωμένων διαδικασιών εφαρμογής, μέσω των οποίων αποσαφηνίζεται η σχέση μεταξύ διαφορετικών προτύπων και καθορίζονται οι όροι τεχνικής ισοδυναμίας, οι επιτρεπόμενες αποκλίσεις, οι αντιστοιχίσεις διαδικασιών και

οι αποδεκτές ερμηνείες των απαιτήσεων. Τα έγγραφα αυτά λειτουργούν ως πρακτικός μηχανισμός γεφύρωσης μεταξύ των πλαισίων EN και ASTM, επιτρέποντας συνεκτική εφαρμογή τους στο επίπεδο του έργου και μειώνοντας τον κίνδυνο τεχνικών ή συμβατικών παρερμηνειών. Τρίτον, η εναρμόνιση ενισχύεται μέσω της διασφάλισης τεχνικής επάρκειας από εργαστήρια διαπιστευμένα κατά ISO/IEC 17025, τα οποία εγγυώνται τον έλεγχο της μεθόδου, την ιχνηλασιμότητα των μετρήσεων και την τεκμηριωμένη αναφορά των αποτελεσμάτων. Στην πράξη, η προσέγγιση EN συνδέεται συχνά στενότερα με τη λογική της αξιολόγησης συμμόρφωσης και με ευρωπαϊκά πρότυπα προϊόντων και τεχνικών προδιαγραφών, ενώ το σύστημα ASTM χρησιμοποιείται συχνά ως περισσότερο διεθνώς φορητό σώμα μεθόδων δοκιμών. Συνεπώς, η σαφής επιλογή κανονιστικού πλαισίου, σε συνδυασμό με την ύπαρξη τεκμηριωμένων εγγράφων αντιστοίχισης και ελεγχόμενης εφαρμογής, αποτελεί καθοριστική προϋπόθεση για τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων, τη συνεκτική τεχνική ερμηνεία και τη νομική τεκμηρίωση του έργου.

2.4 Μετρολογία και Αξιοπιστία Μετρήσεων

Η μετρολογία αποτελεί το επιστημονικό θεμέλιο πάνω στο οποίο οικοδομείται η αξιοπιστία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων. Στις δοκιμές δομικών υλικών, όπου τιμές αντοχής σε θλίψη, μετρήσεις πυκνότητας, καμπύλες κοκκομετρικής διαβάθμισης και παράμετροι μηχανικής αντοχής επηρεάζουν άμεσα τεχνικές αποφάσεις, η αξιοπιστία των μετρήσεων δεν συνιστά απλώς τεχνική απαίτηση αλλά αναγκαιότητα διακυβέρνησης. Η σύγχρονη βιβλιογραφία για τα συστήματα ποιότητας και τη μετρολογική αξιοπιστία δείχνει ότι η εγκυρότητα των εργαστηριακών αποτελεσμάτων εξαρτάται από τρία αλληλένδετα στοιχεία: τη μετρολογική ιχνηλασιμότητα, την ορθή εκτίμηση της αβεβαιότητας μέτρησης και τη συστηματική διακρίβωση και διαχείριση του εξοπλισμού (JCGM, 2008, 2012; Panagiotidou et al., 2025; Razumić et al., 2025). Στο ίδιο πνεύμα, το ISO/IEC 17025:2017 δεν περιορίζεται σε γενικές απαιτήσεις ποιότητας, αλλά συνδέει ρητά την τεχνική επάρκεια του εργαστηρίου με την ικανότητά του να αποδεικνύει ότι τα αποτελέσματα παράγονται μέσω ελεγχόμενων μετρολογικών αλυσίδων, υπό γνωστές συνθήκες αβεβαιότητας και με εξοπλισμό κατάλληλο για τη συγκεκριμένη χρήση του (International Organization for Standardization [ISO], 2017; Velychko et al., 2025).

2.4.1 Ιχνηλασιμότητα

Η μετρολογική ιχνηλασιμότητα ορίζεται ως η ιδιότητα ενός αποτελέσματος μέτρησης να μπορεί να συνδεθεί με κατάλληλο πρότυπο αναφοράς μέσω αδιάσπαστης και τεκμηριωμένης αλυσίδας διακριβώσεων, καθεμία από τις οποίες συμβάλλει στη συνολική αβεβαιότητα μέτρησης (JCGM, 2012). Η έννοια αυτή δεν έχει απλώς ορολογική σημασία, αλλά αποτελεί τον μηχανισμό μέσω του οποίου καθίσταται δυνατή η ισοδυναμία των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων, οργανισμών και δικαιοδοσιών. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η ιχνηλασιμότητα είναι η βασική προϋπόθεση της συγκρισιμότητας, διότι διαφορετικές αλυσίδες διακρίβωσης οδηγούν σε διαφορετικά επίπεδα αβεβαιότητας και, επομένως, σε διαφορετικό βαθμό εμπιστοσύνης στο τελικό αποτέλεσμα (Velychko et al., 2025). Στο περιβάλλον των δοκιμών δομικών υλικών, η ιχνηλασιμότητα συνδέει πρέσες θλίψης, ζυγούς, κόσκινα, θερμόμετρα, μετρητές πυκνότητας και λοιπό εξοπλισμό με αναγνωρισμένα πρότυπα αναφοράς μέσω πιστοποιημένων διακριβώσεων. Χωρίς τέτοια τεκμηριωμένη σύνδεση, το αποτέλεσμα μπορεί να είναι λειτουργικά χρήσιμο σε τοπικό επίπεδο, αλλά δεν είναι πλήρως υπερασπίσιμο ούτε μεταφερόμενο σε καθεστώς διασυνοριακής συμμόρφωσης, συμβατικής διαφοράς ή αναδρομικού ελέγχου. Για τον λόγο αυτό, η σχετική βιβλιογραφία για την εφαρμογή του

ISO/IEC 17025 αναδεικνύει τη μέτρηση traceability ως διακριτό κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας της διαπίστευσης και όχι ως απλή συνοδευτική διοικητική απαίτηση (Panagiotidou et al., 2025).

2.4.2 Αβεβαιότητα μέτρησης

Η αβεβαιότητα μέτρησης εκφράζει την ποσοτικοποιημένη αμφιβολία που συνοδεύει κάθε αποτέλεσμα και αποτελεί δομικό στοιχείο της σύγχρονης μετρολογικής σκέψης. Ο GUM καθιέρωσε το βασικό πλαίσιο σύμφωνα με το οποίο η αβεβαιότητα πρέπει να αναγνωρίζεται, να αναλύεται σε επιμέρους συνιστώσες και να συνδυάζεται με διαφανή και επαναλήψιμο τρόπο, ώστε το αποτέλεσμα να μη δηλώνεται ως απόλυτη τιμή αλλά ως εκτίμηση με γνωστή περιοχή αξιοπιστίας (JCGM, 2008). Η πιο πρόσφατη μετρολογική βιβλιογραφία εξακολουθεί να αντιμετωπίζει την αξιολόγηση της αβεβαιότητας ως τον πυρήνα της ποιότητας των μετρήσεων, επισημαίνοντας ότι η ορθή επιλογή μοντέλου, η σαφής αναγνώριση των πηγών μεταβλητότητας και η ερμηνευτική πειθαρχία στους ορισμούς είναι κρίσιμες για την αποφυγή λανθασμένης εφαρμογής των μεθόδων αξιολόγησης (Razumić et al., 2025). Στα εργαστήρια δομικών υλικών, πηγές αβεβαιότητας μπορεί να σχετίζονται με τη δειγματοληψία, την προετοιμασία και τη συντήρηση των δοκιμίων, τη σταθερότητα της φόρτισης, τις περιβαλλοντικές συνθήκες, την απόδοση του εξοπλισμού και τον ανθρώπινο χειρισμό. Η πρακτική σημασία της αβεβαιότητας είναι ιδιαίτερα έντονη όταν τα αποτελέσματα βρίσκονται κοντά σε όρια προδιαγραφών, επειδή σε αυτές τις περιπτώσεις το αν ένα υλικό θα γίνει αποδεκτό ή θα απορριφθεί εξαρτάται όχι μόνο από την ονομαστική τιμή του αποτελέσματος αλλά και από το πόσο ισχυρά τεκμηριώνεται η αβεβαιότητά του. Για αυτόν τον λόγο, το ISO/IEC 17025 απαιτεί από τα εργαστήρια να αξιολογούν την αβεβαιότητα όταν αυτή επηρεάζει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων ή τις αποφάσεις συμμόρφωσης (ISO, 2017).

2.4.3 Βαθμονόμηση και Διαχείριση Εξοπλισμού

Η διακρίβωση και η διαχείριση εξοπλισμού αποτελούν τον επιχειρησιακό μηχανισμό μέσω του οποίου η ιχνηλασιμότητα και ο έλεγχος της αβεβαιότητας μετατρέπονται από θεωρητικές αρχές σε καθημερινή εργαστηριακή πρακτική. Το ISO/IEC 17025 απαιτεί ο εξοπλισμός που επηρεάζει την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων να είναι κατάλληλος για την προβλεπόμενη χρήση, να διακρίβώνεται ή να επαληθεύεται σε κατάλληλα διαστήματα, να προστατεύεται από μη εξουσιοδοτημένες ρυθμίσεις και να συνοδεύεται από επαρκή αρχεία χρήσης, συντήρησης και κατάστασης (ISO, 2017). Η πρόσφατη βιβλιογραφία για την εφαρμογή του προτύπου δείχνει ότι η αποτελεσματική διαχείριση εξοπλισμού δεν εξαντλείται στην περιοδική έκδοση

πιστοποιητικών διακρίβωσης, αλλά περιλαμβάνει ταυτοποίηση εξοπλισμού, φακέλους οργάνων, προληπτική συντήρηση, έλεγχο λογισμικού, επαληθεύσεις πριν από τη χρήση και μεθοδολογικά τεκμηριωμένη επιλογή διαστημάτων επαναδιακρίβωσης (Outaki et al., 2024; Schaude & Hausotte, 2024). Ειδικά η πρόσφατη εργασία των Schaude και Hausotte (2024) υπογραμμίζει ότι τα διαστήματα επαναδιακρίβωσης δεν θα πρέπει να καθορίζονται εμπειρικά ή διοικητικά, αλλά να βασίζονται στην ιστορία διακριβώσεων και στον επιθυμητό στόχο αβεβαιότητας του μετρούμενου μεγέθους. Για τα εργαστήρια δοκιμών δομικών υλικών αυτό έχει άμεση πρακτική σημασία, καθώς η αξιοπιστία μηχανών θλίψης, ζυγών και βοηθητικών οργάνων επηρεάζει σωρευτικά την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος. Κατά συνέπεια, η συστηματική διαχείριση του κύκλου ζωής του εξοπλισμού είναι αναγκαία όχι μόνο για τη διατήρηση της τεχνικής εγκυρότητας των δοκιμών, αλλά και για τη δυνατότητα αναδρομικής ανασύστασης των συνθηκών μέτρησης σε περίπτωση ελέγχου, αμφισβήτησης ή διερεύνησης απόκλισης.

2.5 Διαχείριση Κινδύνου σε Εργαστήρια Δοκιμών

Η αναθεώρηση του ISO/IEC 17025 το 2017 εισήγαγε ρητή ενσωμάτωση της προσέγγισης βάσει εκτίμησης κινδύνου, ευθυγραμμίζοντας τη διοίκηση εργαστηρίων με σύγχρονες αρχές διαχείρισης ποιότητας (ISO, 2017). Σε αντίθεση με αυστηρά προδιαγεγραμμένα πλαίσια διαχείρισης κινδύνου, το πρότυπο υιοθετεί ευέλικτη προσέγγιση, απαιτώντας από τα εργαστήρια να εντοπίζουν και να αντιμετωπίζουν κινδύνους και ευκαιρίες που ενδέχεται να επηρεάσουν την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, την αμεροληψία και τη λειτουργική συνέχεια. Η μετατόπιση αυτή αντανάκλα τη γενικότερη κατεύθυνση των προτύπων ISO προς προληπτικό έλεγχο αντί της εκ των υστέρων διόρθωσης.

Η προσέγγιση βάσει κινδύνου σε εργαστήρια δοκιμών καλύπτει τόσο τεχνικούς όσο και οργανωτικούς κινδύνους. Οι τεχνικοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν δυσλειτουργία εξοπλισμού, εσφαλμένη εφαρμογή μεθόδων, αστάθεια περιβαλλοντικών συνθηκών, σφάλματα δειγματοληψίας και ανεπαρκή εκτίμηση αβεβαιότητας μέτρησης. Εάν δεν ελεγχθούν, οι κίνδυνοι αυτοί υπονομεύουν την εγκυρότητα των αποτελεσμάτων και ενδέχεται να οδηγήσουν σε λανθασμένες αποφάσεις αποδοχής ή απόρριψης. Ο Hoyle (2017) επισημαίνει ότι τα αποτελεσματικά συστήματα ποιότητας ενσωματώνουν τον εντοπισμό κινδύνων στις καθημερινές διεργασίες, όπως στην ανασκόπηση μεθόδων, στον προγραμματισμό διακριβώσεων και στις διαδικασίες εξουσιοδότησης προσωπικού.

Πέραν των τεχνικών παραμέτρων, τα εργαστήρια αντιμετωπίζουν κινδύνους πληροφορίας και λειτουργικούς κινδύνους. Ο κίνδυνος πληροφορίας αφορά την ακεραιότητα δεδομένων, την κυβερνοασφάλεια, τη μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση σε αποτελέσματα και την ανεπαρκή διαχείριση τεκμηρίωσης. Σε διαπιστευμένα περιβάλλοντα, η προστασία ηλεκτρονικών αρχείων και η ιχνηλάσιμη αποθήκευση δεδομένων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις διατήρησης εμπιστευτικότητας και νομικής τεκμηρίωσης. Οι λειτουργικοί κίνδυνοι περιλαμβάνουν ελλείψεις προσωπικού, διαταραχές στην εφοδιαστική αλυσίδα προτύπων αναφοράς και εξάρτηση από εξωτερικούς παρόχους διακρίβωσης. Σύμφωνα με την ILAC (2023), η προληπτική αξιολόγηση κινδύνων ενισχύει την ανθεκτικότητα των εργαστηρίων και διασφαλίζει διατηρήσιμη συμμόρφωση σε μεταβαλλόμενες συνθήκες έργων.

Σε έργα υποδομής, όπου τα εργαστηριακά αποτελέσματα επηρεάζουν συμβατικές αποφάσεις και κανονιστικές εγκρίσεις, η μη διαχείριση κινδύνων μπορεί να έχει συστημικές συνέπειες. Κατά συνέπεια, η διαχείριση κινδύνου σε εργαστήρια κατά ISO/IEC 17025 δεν λειτουργεί απλώς ως κανονιστική απαίτηση, αλλά ως στρατηγικός μηχανισμός διασφάλισης τεχνικής αξιοπιστίας και θεσμικής εμπιστοσύνης.

2.6 Ο ρόλος των εργαστηρίων δοκιμών στη διασφάλιση ποιότητας υποδομών

Στα έργα σιδηροδρομικής υποδομής, ο ρόλος των εργαστηρίων δοκιμών δεν εξαντλείται στον γενικό έλεγχο της ποιότητας των υλικών, αλλά συνδέεται άμεσα με τη διαδικασία τεχνικής αποδοχής επιμέρους κατασκευαστικών φάσεων και με τη δυνατότητα τεκμηρίωσης της συμμόρφωσης του έργου προς τις μελέτες, τις τεχνικές προδιαγραφές και τα εφαρμοστέα πρότυπα. Η σημασία τους καθίσταται ιδιαίτερα έντονη σε έργα που συνδυάζουν πολιτικό μηχανικό, γεωτεχνικά έργα, επιδομή, εγκαταστάσεις ηλεκτροκίνησης, σηματοδότησης και υποδομές σηράγγων, όπου η επάρκεια των υλικών δεν αποτελεί αφηρημένο ποιοτικό κριτήριο αλλά άμεση προϋπόθεση για την αποδοχή, τη διαλειτουργικότητα και τη μακροχρόνια λειτουργική αξιοπιστία του συστήματος.

Στο πλαίσιο αυτό, τα εργαστήρια δοκιμών λειτουργούν ως μηχανισμός παραγωγής τεχνικά έγκυρων αποδεικτικών στοιχείων. Για παράδειγμα, τα αποτελέσματα αντοχής σκυροδέματος συνδέονται με την αποδοχή δομικών στοιχείων σταθμών, αποβαθρών, τεχνικών έργων και στοιχείων σήραγγας, ενώ τα αποτελέσματα δοκιμών εδαφών και αδρανών συνδέονται με την αξιολόγηση της καταλληλότητας στρώσεων έδρασης, επιχώσεων, υποβάσεων και λοιπών

γεωτεχνικών εφαρμογών. Αντίστοιχα, σε έργα με έντονη συστημική πολυπλοκότητα, όπως σιδηροδρομικά έργα με Η/Μ και τηλεπικοινωνιακές διεπαφές, η αξιοπιστία των εργαστηριακών δεδομένων επηρεάζει έμμεσα αλλά ουσιαστικά και τη δυνατότητα ορθής αλληλουχίας των επόμενων φάσεων του έργου, καθώς η αποδοχή ενός υποσυστήματος εξαρτάται συχνά από την τεκμηριωμένη επάρκεια των κατασκευαστικών στοιχείων που το υποστηρίζουν.

Υπό αυτό το πρίσμα, η συμβολή των διαπιστευμένων εργαστηρίων κατά ISO/IEC 17025 έγκειται κυρίως στο ότι μετατρέπουν τον έλεγχο ποιότητας από διοικητική απαίτηση σε δομημένο σύστημα τεχνικής τεκμηρίωσης. Η ιχνηλασιμότητα των μετρήσεων, η τεκμηριωμένη εφαρμογή μεθόδων, η αξιολόγηση της αβεβαιότητας και ο έλεγχος των αποκλίσεων επιτρέπουν στα αποτελέσματα των δοκιμών να χρησιμοποιούνται ως αξιόπιστη βάση για αποφάσεις αποδοχής, επανελέγχου ή διορθωτικών ενεργειών (ISO, 2017). Επομένως, στα έργα υποδομής, και ειδικά στα σιδηροδρομικά έργα υψηλής απαίτησης, το εργαστήριο δεν είναι απλώς ένας υποστηρικτικός τεχνικός φορέας, αλλά κρίσιμος κρίκος της αλυσίδας συμμόρφωσης, μέσω του οποίου συνδέονται ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η παραλαβή και η μακροχρόνια απόδοση του έργου.

3 Μεθοδολογία

3.1 Ερευνητικός Σχεδιασμός

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία υιοθετεί δομημένο ποιοτικό ερευνητικό σχεδιασμό τύπου μελέτης περίπτωσης, υποστηριζόμενο από ανάλυση τεκμηρίωσης και από μοντέλο αξιολόγησης συμμόρφωσης βασισμένο σε ανάλυση κατά παράγραφο του ISO/IEC 17025:2017. Το εμπειρικό πεδίο εστιάζει στο σύστημα εργαστηρίων δοκιμών δομικών υλικών που λειτουργούν στο πλαίσιο του σιδηροδρομικού έργου Κιάτο–Ρίο, ένα τεχνικά απαιτητικό και κρίσιμο για την ασφάλεια περιβάλλον με αυστηρές απαιτήσεις κανονιστικής συμμόρφωσης και διασφάλισης ποιότητας.

Η στρατηγική μελέτης περίπτωσης κρίνεται κατάλληλη, καθώς η έρευνα επιδιώκει να διερευνήσει οργανωτικές δομές, μηχανισμούς συμμόρφωσης και πρακτικές διαχείρισης ποιότητας εντός του πραγματικού λειτουργικού τους πλαισίου και όχι υπό ελεγχόμενες πειραματικές συνθήκες. Οι μελέτες περίπτωσης ενδείκνυνται για την ανάλυση σύνθετων συστημάτων διακυβέρνησης που ενσωματώνονται σε ευρύτερα θεσμικά πλαίσια (Yin, 2018). Στα έργα υποδομής, τα εργαστήρια δοκιμών λειτουργούν ως επιμέρους υποσυστήματα εντός των δομών διοίκησης έργου, εποπτείας αναδόχων και κανονιστικού ελέγχου. Η απομόνωση μεταβλητών σε πειραματικό επίπεδο δεν θα απέδιδε τις συστημικές αλληλεπιδράσεις ούτε τη ρεαλιστική επιχειρησιακή δυναμική (Flyvbjerg, 2006).

Ο μεθοδολογικός σχεδιασμός συνδυάζει τέσσερα συμπληρωματικά στοιχεία:

- Ποιοτική ανάλυση οργανωτικής δομής, διαχείρισης επάρκειας προσωπικού, μηχανισμών εσωτερικού ελέγχου και ημιδομημένων συνεντεύξεων με προσωπικό εργαστηρίων
- Συστηματική ανασκόπηση τεκμηρίωσης, συμπεριλαμβανομένων εγχειριδίων ποιότητας, τυποποιημένων διαδικασιών λειτουργίας, πιστοποιητικών διακρίβωσης, εκθέσεων εσωτερικών επιθεωρήσεων και αρχείων αποκλίσεων
- Αξιολόγηση συμμόρφωσης κατά παράγραφο, δομημένη σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ISO/IEC 17025 (ISO, 2017)
- Περιγραφικούς ποσοτικούς δείκτες για την αποτίμηση ωριμότητας συμμόρφωσης και λειτουργικής αξιοπιστίας

Η πολυεπίπεδη αυτή δομή επιτρέπει μεθοδολογική τριγωνοποίηση, ενισχύοντας την εσωτερική εγκυρότητα μέσω διασταύρωσης τεκμηριωμένων στοιχείων, παρατηρούμενων πρακτικών και αντιλήψεων εμπλεκόμενων στελεχών (Denzin, 2012· Patton, 2015). Το πλαίσιο αξιολόγησης κατά παράγραφο εναρμονίζεται με τη διεθνή έρευνα για την εφαρμογή διαπίστευσης και τους κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας σε περιβάλλοντα ISO/IEC 17025 (Panagiotidou et al., 2025), ενώ η ανάλυση τεκμηρίωσης υποστηρίζει συστηματική ερμηνεία τυποποιημένων συστημάτων ποιότητας (Bowen, 2009).

Η ενσωμάτωση περιορισμένων ποσοτικών δεικτών συμμόρφωσης δεν αποσκοπεί σε στατιστική γενίκευση, αλλά σε αναλυτική γενίκευση, συνδέοντας τα εμπειρικά ευρήματα με θεωρητικές κατασκευές που εδράζονται στο ISO/IEC 17025 και στα διεθνή πρότυπα δοκιμών (Yin, 2018). Η προσέγγιση αυτή είναι συνεπής με την έρευνα στη διοίκηση ποιότητας που συνδυάζει ποιοτική ανάλυση διεργασιών με δομημένους δείκτες απόδοσης (Dale, 2015· Hoyle, 2017).

Ο ερευνητικός σχεδιασμός υποστηρίζει άμεσα τους στόχους της ΜΔΕ, επιτρέποντας δομημένη αξιολόγηση οργανωτικών και λειτουργικών απαιτήσεων, αποτίμηση συμμόρφωσης με διεθνή πρότυπα, τεκμηρίωση πρακτικών ελέγχου ποιότητας και εντοπισμό πρακτικών που ενισχύουν την αξιοπιστία. Επιπλέον, η συγκριτική αντιπαραβολή με τη διεθνή βιβλιογραφία επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων βελτιωτικού χαρακτήρα, χρήσιμων για φορείς διαπίστευσης και για πλαίσια διακυβέρνησης έργων υποδομής (ILAC, 2023).

3.2 Πλαίσιο Αξιολόγησης Συμμόρφωσης

3.2.1 Δείκτες Εργαστηριακής Αξιοπιστίας

Πέραν της τυπικής συμμόρφωσης ανά παράγραφο, η έρευνα ενσωματώνει σύνολο λειτουργικών δεικτών αξιοπιστίας με στόχο την αποτίμηση της ωριμότητας και αποτελεσματικότητας του συστήματος διαχείρισης. Παρότι το ISO/IEC 17025 θέτει ελάχιστες απαιτήσεις συμμόρφωσης, η διεθνής βιβλιογραφία επισημαίνει την ανάγκη χρήσης δεικτών απόδοσης για την αξιολόγηση ανθεκτικότητας και λειτουργικής επάρκειας (Panagiotidou et al., 2025).

Οι επιλεγμένοι δείκτες περιλαμβάνουν:

- Συχνότητα εσωτερικών επιθεωρήσεων ανά έτος
- Μέσο χρόνο κλεισίματος διορθωτικών ενεργειών

- Λόγο μη διαθεσιμότητας εξοπλισμού
- Ποσοστό οργάνων με έγκυρα πιστοποιητικά διακρίβωσης
- Συχνότητα καταγεγραμμένων αποκλίσεων δοκιμών
- Ποσοστό αναφορών που περιλαμβάνουν ποσοτικοποιημένη αβεβαιότητα μέτρησης

Οι δείκτες αυτοί επιτελούν διττή λειτουργία. Πρώτον, αποτιμούν την ωριμότητα του συστήματος πέραν της τυπικής τεκμηρίωσης. Για παράδειγμα, υψηλή συχνότητα επιθεωρήσεων και σύντομοι κύκλοι διορθωτικών ενεργειών υποδηλώνουν ενεργή διοικητική εμπλοκή και προληπτική κουλτούρα (Hoyle, 2017). Δεύτερον, συνδέουν τη συμμόρφωση με την επιχειρησιακή απόδοση. Αυξημένες αποκλίσεις ή εκτεταμένος χρόνος εκτός λειτουργίας εξοπλισμού ενδέχεται να αποκαλύπτουν συστημικές αδυναμίες παρά την ονομαστική συμμόρφωση.

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στο ποσοστό αναφορών με τεκμηριωμένη αβεβαιότητα μέτρησης, καθώς επιφανειακή εφαρμογή του ISO/IEC 17025 συχνά εκδηλώνεται μέσω ελλιπούς αναφοράς αβεβαιότητας (Eurachem, 2014). Αντίστοιχα, η κάλυψη διακριβώσεων αντικατοπτρίζει τη σταθερότητα των αλυσίδων μετρολογικής ιχνηλασιμότητας (ISO, 2017). Παρότι η έρευνα έχει ποιοτικό προσανατολισμό, η χρήση περιγραφικών ποσοτικών δεικτών ενισχύει την αναλυτική ακρίβεια και τεκμηριωμένη ερμηνεία.

3.2.2 Πίνακας αντιστοίχισης προτύπων και εφαρμοζόμενων πρακτικών

Το τρίτο αναλυτικό επίπεδο του πλαισίου αξιολόγησης συνίσταται σε πίνακα χαρτογράφησης προτύπων προς πρακτική εφαρμογή. Το εργαλείο αυτό συνδέει τις απαιτήσεις του ISO/IEC 17025 με συναφή πρότυπα EN και ASTM και με τις παρατηρούμενες διαδικασίες των εργαστηρίων στο πλαίσιο της μελέτης περίπτωσης.

Ο πίνακας δομείται σε τέσσερις στήλες:

1. Απαίτηση ISO
2. Συναφές πρότυπο EN ή ASTM
3. Τεκμηριωμένη εργαστηριακή πρακτική
4. Εντοπισμένο κενό συμμόρφωσης ή βαθμός ευθυγράμμισης

Για παράδειγμα, η απαίτηση επικύρωσης ή επαλήθευσης μεθόδου συνδέεται σε δοκιμές σκυροδέματος με EN 12390-3 ή ASTM C39. Η χαρτογράφηση επιτρέπει έλεγχο ύπαρξης αρχείων επικύρωσης, διαγραμμάτων ελέγχου και αξιολόγησης αβεβαιότητας.

Η συστηματική αντιστοίχιση αναδεικνύει τη σχέση μεταξύ απαιτήσεων συστήματος διαχείρισης και τεχνικών προτύπων δοκιμών, ενώ εντοπίζει πιθανές ασυνέπειες όπου οι τεχνικές μέθοδοι εφαρμόζονται αλλά δεν ενσωματώνονται πλήρως στο τεκμηριωμένο πλαίσιο ISO. Το εργαλείο αυτό ενισχύει τη διαφάνεια, τη μεθοδολογική αυστηρότητα και τη συγκρισιμότητα της αξιολόγησης, υποστηρίζοντας ταυτόχρονα διεθνή συγκριτική αποτίμηση με πρακτικές διαπιστευμένων εργαστηρίων (ILAC, 2023).

3.3 Πηγές Δεδομένων

Η έρευνα βασίζεται σε δομημένο συνδυασμό πρωτογενών και δευτερογενών πηγών δεδομένων, με στόχο τη διασφάλιση εμπειρικού βάθους και θεωρητικής συνοχής. Η διττή αυτή στρατηγική ενισχύει την αναλυτική ανθεκτικότητα του πλαισίου αξιολόγησης συμμόρφωσης και υποστηρίζει τη μεθοδολογική τριγωνοποίηση, ενισχύοντας την εσωτερική εγκυρότητα της μελέτης (Yin, 2018).

Τα πρωτογενή δεδομένα προέρχονται από τα εργαστήρια δοκιμών δομικών υλικών που λειτουργούν στο πλαίσιο του σιδηροδρομικού έργου Κιάτο–Ρίο. Περιλαμβάνουν τεκμηρίωση συστήματος διαχείρισης ποιότητας, όπως εγχειρίδια ποιότητας, τεκμηριωμένες διαδικασίες και Τυποποιημένες Διαδικασίες Λειτουργίας που αφορούν δοκιμές σκυροδέματος, ασφάλτου, εδαφών και αδρανών υλικών. Επιπλέον, εξετάστηκαν πιστοποιητικά διακρίβωσης, αρχεία συντήρησης εξοπλισμού, πίνακες επάρκειας προσωπικού, τεκμηρίωση εκπαίδευσης, εκθέσεις εσωτερικών επιθεωρήσεων, πρακτικά ανασκόπησης διοίκησης, μητρώα μη συμμορφώσεων και τεκμηρίωση διορθωτικών ενεργειών. Αναλύθηκαν επίσης αντιπροσωπευτικές εκθέσεις δοκιμών και αρχεία αξιολόγησης αβεβαιότητας μέτρησης, προκειμένου να αποτιμηθεί η πρακτική εφαρμογή τεχνικών απαιτήσεων. Το υλικό αυτό παρέχει άμεση τεκμηριωμένη εικόνα της δομής και λειτουργίας του συστήματος διαχείρισης, αντανακλώντας μηχανισμούς συμμόρφωσης και ιχνηλάσιμη εκτέλεση διαδικασιών (Bowen, 2009).

Συμπληρωματικά της τεκμηρίωσης, πραγματοποιήθηκαν ημιδομημένες συνεντεύξεις με στελέχη εργαστηρίου, συμπεριλαμβανομένων του υπεύθυνου εργαστηρίου, του υπεύθυνου διασφάλισης ποιότητας και επιλεγμένου τεχνικού προσωπικού. Οι συνεντεύξεις παρείχαν ποιοτική ερμηνευτική κατανόηση προκλήσεων εφαρμογής, πρακτικών διαχείρισης κινδύνου και διαδικασιών λήψης αποφάσεων που δεν αποτυπώνονται πλήρως στα γραπτά αρχεία (Patton, 2015).

Τα δευτερογενή δεδομένα περιλαμβάνουν το πρότυπο ISO/IEC 17025:2017, συναφή πρότυπα EN και ASTM, κατευθυντήριες οδηγίες διαπίστευσης της ILAC και επιστημονική βιβλιογραφία σχετική με συστήματα διαχείρισης ποιότητας εργαστηρίων και αξιολόγηση συμμόρφωσης. Οι πηγές αυτές αποτελούν το κανονιστικό και θεωρητικό σημείο αναφοράς έναντι του οποίου αξιολογούνται τα εμπειρικά ευρήματα.

3.4 Μέθοδος Συλλογής Δεδομένων

Η συλλογή δεδομένων της παρούσας ΜΔΕ βασίστηκε αποκλειστικά σε δευτερογενείς πηγές, δηλαδή σε ήδη δημοσιευμένα και επεξεργασμένα στοιχεία από τη βιβλιογραφία, πρότυπα και σχετικές μελέτες, και οργανώθηκε στο πλαίσιο βιβλιογραφικής έρευνας σε συνδυασμό με αναλυτική μελέτη περίπτωσης. Ειδικότερα, δεν πραγματοποιήθηκε πρωτογενής επιτόπια έρευνα, συνεντεύξεις ή άμεση παρατήρηση εργαστηριακών λειτουργιών. Αντίθετα, η μελέτη στηρίχθηκε στη συστηματική αναζήτηση, επιλογή και επεξεργασία επιστημονικών, κανονιστικών και τεχνικών πηγών, οι οποίες αξιοποιήθηκαν για την ανασύνθεση και αξιολόγηση της περίπτωσης του έργου Ροδοδάφνη–Ρίο και ειδικότερα των υποσυστημάτων που σχετίζονται με σταθμούς, επιδομή, ηλεκτροκίνηση, σηματοδότηση, ETCS, τηλεπικοινωνίες και Η/Μ εγκαταστάσεις της σήραγγας Παναγοπούλας.

Η διαδικασία συλλογής δεδομένων αναπτύχθηκε σε διαδοχικά στάδια. Σε πρώτο επίπεδο, πραγματοποιήθηκε στοχευμένη βιβλιογραφική αναζήτηση σε επιστημονικά άρθρα, μονογραφίες, τεχνικές εκθέσεις, θεσμικά κείμενα και κανονιστικά πρότυπα, με κριτήριο τη συνάφεια προς τα ζητήματα οργάνωσης εργαστηρίων δοκιμών, διαπίστευσης κατά ISO/IEC 17025, μετρολογικής ιχνηλασιμότητας, ελέγχου ποιότητας υλικών και διασφάλισης συμμόρφωσης σε έργα υποδομών. Στο υλικό αυτό περιλήφθηκαν επίσης ευρωπαϊκά πρότυπα EN, πρότυπα ASTM, σχετικές απαιτήσεις Eurocodes και κανονιστικά κείμενα διαλειτουργικότητας και ασφάλειας σιδηροδρομικών έργων.

Σε δεύτερο επίπεδο, συγκεντρώθηκαν και εξετάστηκαν διαθέσιμα τεχνικά και θεσμικά στοιχεία που αφορούν το υπό μελέτη έργο, όπως δημοσιευμένες περιγραφές του αντικειμένου, τεχνικά χαρακτηριστικά, πληροφορίες για τα υποσυστήματα του έργου και δημόσια τεκμηρίωση που σχετίζεται με το τμήμα Ροδοδάφνη–Ρίο. Τα στοιχεία αυτά δεν χρησιμοποιήθηκαν ως πρωτογενές εμπειρικό υλικό, αλλά ως τεκμηριωμένη βάση για τη διαμόρφωση της μελέτης περίπτωσης και για τη σύνδεση του θεωρητικού πλαισίου με ένα συγκεκριμένο έργο υψηλής τεχνικής πολυπλοκότητας.

Σε τρίτο επίπεδο, το σύνολο των πηγών οργανώθηκε θεματικά και κατηγοριοποιήθηκε με βάση τους βασικούς άξονες της έρευνας: οργανωτικές απαιτήσεις εργαστηρίων, τεχνική επάρκεια, μετρολογική διασφάλιση, έλεγχος διεργασιών, τεκμηρίωση συμμόρφωσης, διεπαφές υποσυστημάτων και λογική αποδοχής έργων. Η κατηγοριοποίηση αυτή επέτρεψε τη συστηματική ενσωμάτωση των δεδομένων στη μελέτη περίπτωσης και τη χαρτογράφηση των απαιτήσεων του ISO/IEC 17025 και των συναφών τεχνικών προτύπων πάνω στα πραγματικά χαρακτηριστικά του έργου.

3.5 Μέθοδος Ανάλυσης Δεδομένων

Η ανάλυση δεδομένων της παρούσας ΜΔΕ, όπως τελικά διαμορφώθηκε στο πλαίσιο της μελέτης περίπτωσης του τμήματος Ροδοδάφνη-Ρίο και της σήραγγας Παναγοπούλας, συνδυάζει ποιοτική ερμηνευτική ανάλυση με δομημένη ποσοτική αποτίμηση συμμόρφωσης, εναρμονισμένη με το παράγραφο-κεντρικό μοντέλο αξιολόγησης του ISO/IEC 17025. Δεδομένου ότι η μελέτη βασίζεται σε τεκμηρίωση, κανονιστικά πρότυπα και αναλυτική ανασύνθεση του έργου (και όχι σε εκτεταμένη πρωτογενή στατιστική δειγματοληψία), ο στόχος της ανάλυσης δεν είναι η στατιστική γενίκευση, αλλά η αναλυτική γενίκευση, δηλαδή η συστηματική σύνδεση των ευρημάτων της συγκεκριμένης περίπτωσης με τη θεωρητική αρχιτεκτονική του ISO/IEC 17025 και το ευρύτερο πλαίσιο ευρωπαϊκής διακυβέρνησης σιδηροδρομικών έργων (Yin, 2018).

Τα ποιοτικά δεδομένα προέκυψαν από την ανάλυση κανονιστικών κειμένων (ISO/IEC 17025, EN, Eurocodes, TSIs), τεχνικών προδιαγραφών του έργου, καθώς και από την ερμηνευτική αποτύπωση των υποσυστημάτων (σταθμοί, επιδομή, ηλεκτροκίνηση, σηματοδότηση, ETCS, τηλεπικοινωνίες, Η/Μ σήραγγας). Η ανάλυση ακολούθησε θεματική προσέγγιση, με κωδικοποίηση βάσει των πέντε βασικών ενοτήτων του ISO/IEC 17025: αμεροληψία, διαρθρωτικές απαιτήσεις, επάρκεια πόρων, απαιτήσεις διεργασιών και σύστημα διαχείρισης. Παράλληλα, αναδύθηκαν επαγωγικά θεματικές που σχετίζονται με τη διακυβέρνηση διεπαφών (interfaces) μεταξύ πολιτικών έργων και Η/Μ εγκαταστάσεων, τη διαχείριση κινδύνων σε περιβάλλον σήραγγας και την τεκμηρίωση αποδοχής υποσυστημάτων. Η θεματική ανάλυση ακολούθησε συστηματικά βήματα οργάνωσης, κατηγοριοποίησης και ερμηνείας, διασφαλίζοντας συνέπεια και διαφάνεια στη σύνδεση θεωρίας και εφαρμογής (Braun & Clarke, 2006).

Η τεκμηρίωση του έργου εξετάστηκε όχι μόνο ως προς την τυπική αναφορά σε πρότυπα, αλλά ως προς τη λειτουργική συνοχή μεταξύ σχεδιαστικών παραδοχών, απαιτήσεων δοκιμών, τεκμηρίωσης αποδοχής και διαδικασιών θέσης σε λειτουργία. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη σήραγγα Παναγοπούλας, όπου η αλληλεξάρτηση πολιτικών, ηλεκτρομηχανολογικών και τηλεπικοινωνιακών συστημάτων απαιτεί ενοποιημένη λογική διασφάλισης.

Παράλληλα, εφαρμόστηκε δομημένο μοντέλο ποσοτικής αποτίμησης συμμόρφωσης ανά παράγραφο του ISO/IEC 17025. Για κάθε εφαρμοστέα απαίτηση, η συμμόρφωση ταξινομήθηκε ως πλήρης, μερική, μη συμμόρφωση ή μη εφαρμοστέα, βάσει της θεωρητικά απαιτούμενης τεκμηρίωσης και των αναμενόμενων ροών αποδεικτικών στοιχείων στο συγκεκριμένο έργο. Υπολογίστηκαν ποσοτικά ποσοστά συμμόρφωσης ανά ενότητα, παρέχοντας περιγραφική εικόνα της ωριμότητας του συστήματος δοκιμών και τεκμηρίωσης που υποστηρίζει την αποδοχή έργων σταθμών, επιδομής και κυρίως της σήραγγας.

Συμπληρωματικά, χρησιμοποιήθηκαν δείκτες λειτουργικής αξιοπιστίας, όπως η πληρότητα διακριβώσεων, η τεκμηρίωση αβεβαιότητας μέτρησης, η διαχείριση μη συμμορφώσεων και η ιχνηλασιμότητα αποδεικτικών στοιχείων μεταξύ σχεδιασμού, κατασκευής και θέσης σε λειτουργία. Οι δείκτες αυτοί αναλύθηκαν περιγραφικά, με στόχο τον εντοπισμό κρίσιμων σημείων κινδύνου και ασυνέχειας μεταξύ τυπικής συμμόρφωσης και ουσιαστικής επιχειρησιακής αποτελεσματικότητας.

3.6 Περιορισμοί της Έρευνας

Παρά τον δομημένο ερευνητικό σχεδιασμό, η παρούσα ΜΔΕ υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς που οριοθετούν την ερμηνεία των ευρημάτων.

Πρώτον, η έρευνα επικεντρώνεται σε ένα συγκεκριμένο έργο υποδομής και στα συνδεδεμένα με αυτό εργαστήρια δοκιμών. Αν και η μελέτη περίπτωσης παρουσιάζει υψηλό αναλυτικό βάθος και πολυπλοκότητα, τα συμπεράσματα δεν μπορούν να γενικευθούν στατιστικά σε όλα τα εργαστήρια δοκιμών που λειτουργούν σε διαφορετικά κανονιστικά, θεσμικά ή οργανωτικά περιβάλλοντα. Ο στόχος της έρευνας είναι η αναλυτική γενίκευση, δηλαδή η σύνδεση εμπειρικών ευρημάτων με το θεωρητικό πλαίσιο του ISO/IEC 17025, και όχι η παραγωγή καθολικών ποσοτικών συμπερασμάτων.

Δεύτερον, η πρόσβαση σε τεκμηρίωση και προσωπικό περιορίστηκε στα συμμετέχοντα εργαστήρια. Παρά την προσπάθεια για πλήρη και συστηματική συλλογή δεδομένων, ορισμένα ευαίσθητα αρχεία ή στρατηγικές συζητήσεις διοικητικού επιπέδου ενδέχεται να μην ήταν

πλήρως διαθέσιμα. Ο περιορισμός αυτός μπορεί να επηρεάζει τον βαθμό πληρότητας της αξιολόγησης συμμόρφωσης.

Τρίτον, οι ποιοτικές συνεντεύξεις ενέχουν εγγενή κίνδυνο μεροληψίας απαντήσεων, συμπεριλαμβανομένης της μεροληψίας κοινωνικής επιθυμητότητας, ιδίως όταν τα ερωτήματα αφορούν συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα. Αν και η διασταύρωση στοιχείων μέσω τεκμηρίωσης και άμεσης παρατήρησης μετριάζει τον κίνδυνο αυτό, δεν μπορεί να τον εξαλείψει πλήρως.

Τέλος, η αξιολόγηση συμμόρφωσης κατά παράγραφο εμπεριέχει ερμηνευτική κρίση. Παρότι εφαρμόστηκαν τυποποιημένα κριτήρια και συνεπής μεθοδολογία βαθμολόγησης, ένα επίπεδο υποκειμενικότητας του αξιολογητή παραμένει αναπόφευκτο. Οι περιορισμοί αυτοί αναγνωρίζονται ρητά, με σκοπό την ενίσχυση της μεθοδολογικής διαφάνειας και την ορθή πλαισίωση των συμπερασμάτων της ΜΔΕ.

4 Μελέτη Περίπτωσης: Σιδηροδρομική Γραμμή Κιάτο–Πάτρα

4.1 Ορισμός περίπτωσης και όριο συστήματος

Η παρούσα μελέτη περίπτωσης αφορά το έργο υποδομής με τίτλο «Κατασκευή σιδηροδρομικών σταθμών και στάσεων, έργων υποδομής, ηλεκτροκίνησης, σηματοδότησης, τηλεδιοίκησης, ETCS, τηλεπικοινωνιών και Η/Μ εγκαταστάσεων της σήραγγας Παναγοπούλας για τη Νέα Σιδηροδρομική Γραμμή Κιάτο–Πάτρα στο τμήμα Ροδοδάφνη–Ρίο». Η έρευνα δεν περιορίζεται σε θεωρητική ανακατασκευή, αλλά συνδυάζει πρωτογενή δεδομένα που προκύπτουν από επαγγελματική εμπλοκή στο πεδίο με δομημένο αναλυτικό πλαίσιο και διεθνή συγκριτική οπτική. Η περίπτωση λειτουργεί ταυτόχρονα ως εμπειρική αποτύπωση ενός πραγματικού περιβάλλοντος έργου και ως κανονιστική αξιολόγηση έναντι διεθνών προτύπων που διέπουν την επάρκεια εργαστηρίων δοκιμών και τη διασφάλιση ποιότητας υποδομών.

Το όριο του συστήματος περιλαμβάνει όλα τα συμβατικά υποσυστήματα του τμήματος Ροδοδάφνη–Ρίο. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνονται: η κατασκευή σταθμών και στάσεων με κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, αποβάθρες, στέγαστρα και συναφή τεχνικά έργα, τα στοιχεία υποδομής και επιδομής της γραμμής, τα συστήματα ηλεκτροκίνησης και εναέριας γραμμής επαφής, τα συστήματα σηματοδότησης και τηλεδιοίκησης, η εγκατάσταση ETCS, οι τηλεπικοινωνιακές υποδομές που υποστηρίζουν λειτουργικές και κρίσιμες για την ασφάλεια λειτουργίες, καθώς και οι ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις εντός της σήραγγας Παναγοπούλας. Τα επιμέρους αυτά στοιχεία συγκροτούν ολοκληρωμένο σύστημα παράδοσης σιδηροδρομικής υποδομής με έντονες τεχνικές αλληλεξαρτήσεις και κρίσιμες διεπαφές ασφάλειας, ιδίως στο περιβάλλον της σήραγγας.

Εντός αυτού του ορίου, το ερευνητικό αντικείμενο δεν περιορίζεται στην εκτέλεση των κατασκευαστικών εργασιών, αλλά επικεντρώνεται ειδικά στην οργάνωση, διοίκηση και αξιολόγηση των εργαστηρίων δοκιμών δομικών υλικών που υποστηρίζουν το έργο. Τα εργαστήρια συνιστούν κόμβο ελέγχου εντός της δομής διακυβέρνησης του έργου, παράγοντας ποσοτικά αποτελέσματα δοκιμών, όπως αντοχή σε θλίψη, δείκτες συμπίκνωσης και δείκτες συμμόρφωσης υλικών, καθώς και ποιοτική τεκμηρίωση, όπως αρχεία αποκλίσεων, διορθωτικές ενέργειες και εκθέσεις επιθεώρησης διεργασιών. Τα αποτελέσματα αυτά

επηρεάζουν άμεσα αποφάσεις αποδοχής, επαλήθευση συμμόρφωσης και εκτιμήσεις μακροχρόνιας ανθεκτικότητας.

Οι βασικοί εμπλεκόμενοι φορείς εντός του ορίου περιλαμβάνουν την αναθέτουσα αρχή, τον κύριο ανάδοχο, τους επιβλέποντες μηχανικούς, τη διοίκηση και το τεχνικό προσωπικό των εργαστηρίων, καθώς και φορείς που σχετίζονται με τη διαπίστευση. Η μελέτη δεν περιλαμβάνει τη λειτουργία τροχαίου υλικού, τη συνολική διαχείριση κυκλοφορίας του δικτύου ούτε τη μεταγενέστερη φάση λειτουργίας μετά την παράδοση, καθώς η αναλυτική έμφαση τοποθετείται στη φάση κατασκευής και διασφάλισης ποιότητας του κύκλου ζωής του έργου.

Μεθοδολογικά, το όριο της περίπτωσης καθορίζεται βάσει συνδυασμού πρωτογενών και δευτερογενών πηγών. Τα πρωτογενή δεδομένα περιλαμβάνουν ανασκόπηση τεκμηρίωσης πεδίου, συνεντεύξεις με τεχνικό προσωπικό και παρατήρηση εργαστηριακών διαδικασιών. Οι δευτερογενείς πηγές περιλαμβάνουν το ISO/IEC 17025, συναφή πρότυπα EN και ASTM και διεθνή βιβλιογραφία σχετικά με κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας στη διαπίστευση εργαστηρίων και στη διαχείριση ποιότητας. Ο σαφής ορισμός του ορίου επιτρέπει την εξαγωγή τόσο πρακτικών όσο και θεωρητικών συμπερασμάτων σχετικά με την αποτελεσματικότητα διοίκησης εργαστηρίων, τους μηχανισμούς ιχνηλασιμότητας, τα συστήματα επάρκειας και τις πρακτικές ελέγχου κινδύνου σε σύνθετο σιδηροδρομικό περιβάλλον υποδομής.

4.2 Ανάλυση ανά Υποσύστημα και Διεπαφές

Το συμβατικό αντικείμενο του τμήματος Ροδοδάφνη–Ρίο της Νέας Σιδηροδρομικής Γραμμής Κιάτο–Πάτρα συνιστά ένα πολυκλαδικό πρόγραμμα παράδοσης σιδηροδρομικής υποδομής, το οποίο ενσωματώνει έργα πολιτικού μηχανικού, επιδομή, ηλεκτροκίνηση, σηματοδότηση και τηλεδιοίκηση, ETCS, τηλεπικοινωνίες και ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις στη σήραγγα Παναγοπούλας. Για την αναλυτική αξιολόγηση ενός τέτοιου έργου, η αποτύπωση του συμβατικού αντικειμένου σε Δομή Ανάλυσης Εργασιών (Work Breakdown Structure, WBS) συνιστά μεθοδολογικά πρόσφορη επιλογή, καθώς η σχετική βιβλιογραφία δείχνει ότι η ιεραρχική αποσύνθεση του αντικειμένου του έργου σε διαχειρίσιμα πακέτα εργασίας διευκολύνει τη σαφή οριοθέτηση του πεδίου, την κατανομή ευθυνών, τον προγραμματισμό, την κοστολόγηση και τον μεταγενέστερο έλεγχο της προόδου, ιδίως σε έργα υψηλής τεχνικής πολυπλοκότητας (Cerezo-Narváez et al., 2020; Siami-Irdemoosa et al., 2015). Στα σιδηροδρομικά έργα, η επιλογή αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία, επειδή το έργο δεν αποτελεί

απλό άθροισμα επιμέρους τεχνικών κλάδων, αλλά σύστημα αλληλεξαρτώμενων υποσυστημάτων, όπου η επιτυχής παράδοση εξαρτάται από τη διαχείριση οργανωσιακών και τεχνικών διεπαφών μεταξύ έργου και λειτουργικού σιδηροδρομικού συστήματος, καθώς και από την έγκαιρη συστημική ολοκλήρωση των επιμέρους συνιστωσών (Geyer & Davies, 2000; Trauernicht et al., 2025; Whyte et al., 2022). Υπό αυτή την έννοια, η ανάλυση του συμβατικού αντικειμένου σε υποσυστήματα και πακέτα εργασίας δεν παρουσιάζεται ως απλώς τυπική τεχνική ταξινόμησης, αλλά ως αναγκαία αναλυτική βάση για την κατανόηση των αλληλεξαρτήσεων, των σημείων διεπαφής και των απαιτήσεων συντονισμού που χαρακτηρίζουν τα σύνθετα σιδηροδρομικά έργα υποδομής.

Το πρώτο κύριο πακέτο εργασίας αφορά την κατασκευή σταθμών και στάσεων, συμπεριλαμβανομένων των κτιρίων, των αποβαθρών, των στεγάστρων και των διαμορφώσεων του περιβάλλοντος χώρου. Το πακέτο αυτό περιλαμβάνει φέροντα έργα οπλισμένου σκυροδέματος, αρχιτεκτονικές ολοκληρώσεις, συστήματα αποστράγγισης, διαδρομές πρόσβασης και κατασκευές ακμών αποβάθρας. Τα πολιτικά αυτά έργα οφείλουν να ικανοποιούν απαιτήσεις δομικής απόδοσης σύμφωνα με τα σχετικά Ευρωπαϊκά και πρότυπα υλικών (CEN, 2004· BSI, 2021). Οι αποβάθρες πρέπει να ευθυγραμμίζονται γεωμετρικά με τη θέση της γραμμής και να συμμορφώνονται με απαιτήσεις περιτυπώματος, ελεύθερου χώρου και προσβασιμότητας. Συνεπώς, το πακέτο των σταθμών συνδέεται άμεσα με την επιδομή και με τις απαιτήσεις ελευθερίας διέλευσης που επηρεάζουν τη σηματοδότηση. Με όρους WBS, η «Κατασκευή αποβάθρας» εξαρτάται από την ολοκλήρωση της «Προετοιμασίας υπόβασης» και από την επαληθευμένη «Γεωμετρική χάραξη της γραμμής», ενώ η «Εγκατάσταση υποδομών εξυπηρέτησης επιβατών» εξαρτάται από την ολοκλήρωση του φέροντος οργανισμού και από τη διαθεσιμότητα ισχύος και τηλεπικοινωνιών.

Το δεύτερο πακέτο εργασίας αφορά τα έργα υποδομής και διαμόρφωσης της σιδηροδρομικής γραμμής. Περιλαμβάνει χωματουργικά, σταθεροποίηση υπόβασης, προετοιμασία της στρώσης έρματος και συστήματα αποστράγγισης που υποστηρίζουν την επιδομή. Η ποιότητα της στρώσης έδρασης είναι καθοριστική για τη σταθερότητα της γεωμετρίας της γραμμής και για τη μακροχρόνια απόδοσή της. Τα ευρωπαϊκά πλαίσια διακυβέρνησης των σιδηροδρόμων επισημαίνουν ότι τα υποσυστήματα υποδομής πρέπει να ικανοποιούν καθορισμένα κριτήρια επιδόσεων, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής κυκλοφορία (ERA, n.d.). Σε όρους διεπαφών, η «Εγκατάσταση επιδομής» εξαρτάται από τη «Συμπύκνωση και επαλήθευση της στρώσης

έδρασης», ενώ οι «Θεμελιώσεις ιστών εναέριας γραμμής επαφής» εξαρτώνται από τα «Ολοκληρωμένα χωματουργικά» και τη «Γεωμετρική αποτύπωση και χάραξη».

Το τρίτο πακέτο εργασίας επικεντρώνεται στα έργα πολιτικού μηχανικού της σήραγγας Παναγοπούλας και στα συναφή σημεία διεπαφής των συστημάτων. Τα έργα της σήραγγας περιλαμβάνουν, όπου απαιτείται, εκσκαφές, πρωτεύουσα και δευτερεύουσα επένδυση, πλάκες έδρασης, οδεύσεις καλωδίων, εσοχές εξοπλισμού και έργα αποστράγγισης. Το δομικό σκυρόδεμα πρέπει να ανταποκρίνεται σε απαιτήσεις ανθεκτικότητας και πυροπροστασίας που αφορούν σιδηροδρομικές σήραγγες (CEN, 2004· ERA, 2019). Στα σημεία διεπαφής περιλαμβάνονται ενσωματωμένοι αγωγοί για τηλεπικοινωνίες, στηρίγματα για συστήματα αερισμού και δομικές προβλέψεις για υποδομές σηματοδότησης και ηλεκτροκίνησης. Με όρους εξαρτήσεων WBS, η «Εγκατάσταση Η/Μ συστημάτων στη σήραγγα» εξαρτάται από την «Ολοκλήρωση της επένδυσης και τη διαμόρφωση σημείων στήριξης», ενώ η «Εγκατάσταση τηλεπικοινωνιακών καλωδίων στη σήραγγα» εξαρτάται από την «Εγκατάσταση σχαρών και καναλιών καλωδίων που προβλέπονται στα έργα πολιτικού μηχανικού».

Το τέταρτο πακέτο εργασίας αφορά τα συστήματα ηλεκτροκίνησης, και ειδικότερα την εναέρια γραμμή επαφής, τους ιστούς στήριξης και τις διεπαφές τροφοδοσίας έλξης. Η εγκατάσταση της ηλεκτροκίνησης απαιτεί γεωμετρική ακρίβεια σε σχέση με τη χάραξη της γραμμής και τα επιτρεπόμενα περιτυπώματα. Το ενεργειακό υποσύστημα διασυνδέεται επίσης με το περιβάλλον της σήραγγας, όπου εφαρμόζονται περιορισμοί ελεύθερου χώρου και απαιτήσεις ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας. Σύμφωνα με τα πλαίσια διαλειτουργικότητας της ERA, το υποσύστημα ενέργειας πρέπει να είναι συμβατό με το υποσύστημα ελέγχου, χειρισμού και σηματοδότησης, ώστε να διασφαλίζεται ασφαλής λειτουργία (ERA, n.d.). Επομένως, η «Εγκατάσταση εναέριας γραμμής επαφής» εξαρτάται από την «Οριστικοποίηση της γεωμετρίας της γραμμής», ενώ η «Θέση σε λειτουργία της τροφοδοσίας έλξης» εξαρτάται από την «Ολοκλήρωση της ενσωμάτωσης των συστημάτων προστασίας και την ετοιμότητα της τηλεδιοίκησης».

Το πέμπτο πακέτο εργασίας αφορά τα συστήματα σηματοδότησης και τηλεδιοίκησης. Περιλαμβάνει πλευρικά σήματα, διεπαφές με συστήματα αλληλομανδάλωσης, πίνακες ελέγχου και υποδομές τηλεχειρισμού. Η εγκατάσταση της σηματοδότησης απαιτεί ολοκληρωμένη γεωμετρία γραμμής και σταθερές βάσεις έδρασης. Διασυνδέεται επίσης με τον τηλεπικοινωνιακό κορμό για τη μετάδοση δεδομένων και με στοιχεία ETCS για τις λειτουργίες

προστασίας συρμών. Η ERA αναγνωρίζει τη σηματοδότηση και τον έλεγχο ως διακριτό υποσύστημα που διέπεται από απαιτήσεις διαλειτουργικότητας (ERA, n.d.). Κατά συνέπεια, η «Εγκατάσταση εξοπλισμού σηματοδότησης» εξαρτάται από την «Ολοκλήρωση της υποδομής της γραμμής», ενώ η «Ενεργοποίηση της τηλεδιοίκησης» εξαρτάται από την «Επιχειρησιακή λειτουργία του τηλεπικοινωνιακού δικτύου».

Το έκτο πακέτο εργασίας αφορά την ανάπτυξη του ETCS. Η εγκατάσταση του ETCS Level 1 περιλαμβάνει balises, πλευρικές ηλεκτρονικές μονάδες και ενσωμάτωση με συστήματα αλληλομανδάλωσης. Τα στοιχεία του ETCS πρέπει να τοποθετούνται με ακρίβεια σε σχέση με τη γεωμετρία της γραμμής και τη διάταξη της σηματοδότησης. Οι εξαρτήσεις ενσωμάτωσης είναι ιδιαίτερα αυστηρές. Η «Εγκατάσταση balises ETCS» εξαρτάται από την «Επαληθευμένη θέση και γεωμετρία της γραμμής», ενώ οι «Δοκιμές ενσωμάτωσης ETCS» εξαρτώνται από την «Ολοκλήρωση της θέσης σε λειτουργία της σηματοδότησης και τη διαθεσιμότητα τηλεπικοινωνιακής συνδεσιμότητας δεδομένων». Τα ευρωπαϊκά πλαίσια διαλειτουργικότητας απαιτούν συστηματική επικύρωση των διεπαφών ETCS πριν από την επιχειρησιακή έγκριση (ERA, n.d.· UNISIG, n.d.).

Το έβδομο πακέτο εργασίας αφορά τα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, συμπεριλαμβανομένων των επιχειρησιακών τηλεπικοινωνιών, των κορμών οπτικών ινών, των συστημάτων πληροφόρησης επιβατών και των επικοινωνιών ασφάλειας στη σήραγγα. Στο περιβάλλον της σήραγγας, οι τηλεπικοινωνίες είναι κρίσιμες για την ασφάλεια, καθώς υποστηρίζουν επικοινωνία έκτακτης ανάγκης, παρακολούθηση μέσω CCTV και εποπτεία συστημάτων. Οι τηλεπικοινωνιακές εγκαταστάσεις στη σήραγγα εξαρτώνται από ολοκληρωμένα συστήματα όδευσης καλωδίων και από αξιόπιστη ηλεκτρική τροφοδοσία. Η «Ενεργοποίηση της επικοινωνίας έκτακτης ανάγκης στη σήραγγα» εξαρτάται από τη «Θέση σε λειτουργία της ηλεκτρικής τροφοδοσίας των Η/Μ εγκαταστάσεων», ενώ η «Ενσωμάτωση των επιχειρησιακών τηλεπικοινωνιών» εξαρτάται από την «Αρχιτεκτονική δεδομένων της σηματοδότησης και της τηλεδιοίκησης».

Το όγδοο και πλέον κρίσιμο, από άποψη ασφάλειας, πακέτο εργασίας αφορά τα Η/Μ συστήματα της σήραγγας, συμπεριλαμβανομένων του αερισμού, του φωτισμού ασφαλείας, της ανίχνευσης πυρκαγιάς, της παρακολούθησης και των συστημάτων ελέγχου. Η Τεχνική Προδιαγραφή Διαλειτουργικότητας για την Ασφάλεια σε Σιδηροδρομικές Σήραγγες καθορίζει απαιτήσεις για τα υποσύστημα ασφαλείας σήραγγων, συμπεριλαμβανομένων της ανίχνευσης πυρκαγιάς και της υποστήριξης εκκένωσης (ERA, 2019). Τα συστήματα αερισμού

εξαρτώνται από την ολοκλήρωση των πολιτικών έργων και από τη διαθεσιμότητα σημείων στήριξης. Τα συστήματα ανίχνευσης πυρκαγιάς εξαρτώνται από την ετοιμότητα των τηλεπικοινωνιών και της τροφοδοσίας. Η «Ολοκληρωμένη δοκιμή ασφάλειας της σήραγγας» εξαρτάται από την ταυτόχρονη ετοιμότητα των πολιτικών έργων, της ηλεκτρικής ισχύος, της τηλεπικοινωνιακής συνδεσιμότητας και της διαμόρφωσης των διεπαφών εποπτείας και ελέγχου.

Αν εξεταστεί ως «σύστημα συστημάτων», η Δομή Ανάλυσης Εργασιών του τμήματος Ροδοδάφνη–Ρίο αναδεικνύει ένα δίκτυο αλληλεξαρτήσεων και όχι μια γραμμική ακολουθία εκτέλεσης. Η ολοκλήρωση των πολιτικών έργων επιτρέπει την εγκατάσταση της ηλεκτροκίνησης και της σηματοδότησης, οι τηλεπικοινωνίες επιτρέπουν την τηλεδιοίκηση και την ενσωμάτωση του ETCS, η ετοιμότητα των πολιτικών έργων της σήραγγας επιτρέπει την εγκατάσταση των Η/Μ συστημάτων, ενώ η θέση σε λειτουργία απαιτεί ταυτόχρονη ετοιμότητα περισσότερων υποσυστημάτων. Από την οπτική της διαχείρισης ποιότητας, κάθε αλυσίδα εξάρτησης παράγει συγκεκριμένες απαιτήσεις επαλήθευσης και δοκιμών, οι οποίες πρέπει να τεκμηριώνονται και να παραμένουν ιχνηλάσιμες, ιδίως σε ένα έργο που συνδυάζει δομικές κατασκευές με διαλειτουργικά σιδηροδρομικά συστήματα ελέγχου και ασφάλειας (ISO, 2017· ERA, n.d.).

Κατά συνέπεια, η αφηγηματική αποτύπωση της WBS τεκμηριώνει ότι το συμβατικό αντικείμενο του έργου Ροδοδάφνη–Ρίο δεν μπορεί να αξιολογηθεί ως ένα σύνολο ανεξάρτητων κατασκευαστικών ροών. Αντίθετα, απαιτείται η αξιολόγησή του ως ολοκληρωμένου συστήματος παράδοσης υποδομής, στο οποίο οι εξαρτήσεις μεταξύ υποσυστημάτων καθορίζουν την τεχνική αλληλουχία, την επικύρωση της ασφάλειας και τη διασφάλιση της συμμόρφωσης.

4.3 Πλαίσιο Προτύπων και Απαιτήσεων

Το τμήμα Ροδοδάφνη–Ρίο της Νέας Σιδηροδρομικής Γραμμής Κιάτο–Πάτρα συγκροτεί ένα σύνθετο τεχνικό σύστημα, στο οποίο έργα πολιτικού μηχανικού, σήραγγες, επιδομή, ηλεκτροκίνηση, σηματοδότηση, ETCS, τηλεπικοινωνίες και ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις δεν λειτουργούν ως ανεξάρτητα παραδοτέα, αλλά ως αλληλεξαρτώμενα υποσυστήματα με κρίσιμες διεπαφές. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση του έργου δεν είναι επαρκές να οργανωθεί ως απλή απαρίθμηση συμβατικών απαιτήσεων, αλλά προϋποθέτει μία ιεραρχημένη δομή απαιτήσεων, η οποία συνδέει τα τεχνικά αντικείμενα, τις μεθόδους

επαλήθευσης και τα απαιτούμενα αποδεικτικά στοιχεία αποδοχής. Η σχετική βιβλιογραφία για σύνθετα έργα υποδομής δείχνει ότι τέτοιες ιεραρχήσεις είναι κρίσιμες, επειδή επιτρέπουν τη σύνδεση του σχεδιασμού, της κατασκευής, της επαλήθευσης και της τελικής ολοκλήρωσης σε περιβάλλοντα υψηλής τεχνικής πολυπλοκότητας και έντονων διεπαφών μεταξύ υποσυστημάτων (Cerezo-Narváez et al., 2020; Muruganandan et al., 2022)..

Στη βάση αυτής της δομής τοποθετείται το ISO/IEC 17025:2017, όχι ως πρότυπο που ρυθμίζει άμεσα το ίδιο το κατασκευαστικό έργο, αλλά ως πλαίσιο που θεμελιώνει την αξιοπιστία των εργαστηριακών και μετρολογικών δεδομένων πάνω στα οποία στηρίζονται οι αποφάσεις αποδοχής. Η πρόσφατη βιβλιογραφία για την εφαρμογή του ISO/IEC 17025 σε εργαστήρια δοκιμών και διακριβώσεων δείχνει ότι η αξία του προτύπου έγκειται ακριβώς στη διασφάλιση τεχνικής επάρκειας, ιχνηλασιμότητας, αμεροληψίας και ελεγχόμενης τεκμηρίωσης, δηλαδή σε ιδιότητες που καθιστούν τα αποτελέσματα δοκιμών υπερασπίσιμα σε περιβάλλοντα αυξημένων τεχνικών και συμβατικών απαιτήσεων (Panagiotidou et al., 2025). Στην περίπτωση Ροδοδάφνη-Ρίο, αυτό σημαίνει ότι δοκιμές αντοχής σκυροδέματος, ταξινόμησης και συμπίκνωσης εδαφών, γεωμετρικών και μηχανικών ιδιοτήτων αδρανών και επιδόσεων ασφαλτομιγμάτων δεν αποτελούν απλώς τεχνικά παραρτήματα, αλλά τον αποδεικτικό πυρήνα της αποδοχής υλικών και εργασιών.

Στο επόμενο επίπεδο εντάσσονται οι οικογένειες προτύπων EN και ASTM, οι οποίες καθορίζουν όχι μόνο το “τι” πρέπει να επιτύχει ένα υλικό, αλλά και το “πώς” αυτή η επίδοση επαληθεύεται με τυποποιημένο και συγκρίσιμο τρόπο. Για το σκυρόδεμα, η σχέση μεταξύ του EN 206 και των μεθόδων δοκιμών της σειράς EN 12390 είναι καθοριστική, επειδή το πρώτο ορίζει το πλαίσιο επίδοσης, παραγωγής και συμμόρφωσης, ενώ οι δεύτερες παρέχουν τις διαδικασίες μέσω των οποίων ελέγχεται αν η παραγόμενη σύνθεση ανταποκρίνεται πράγματι στις απαιτήσεις του σχεδιασμού και της ανθεκτικότητας. Η ερευνητική βιβλιογραφία για την ποιότητα σκυροδέματος και τις συγκριτικές ή δια-εργαστηριακές δοκιμές έχει δείξει ότι η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξαρτάται άμεσα από τη μεθοδολογική τυποποίηση της παρασκευής δοκιμίων, των συνθηκών δοκιμής και της ερμηνείας των αποκλίσεων (Skrzypczak et al., 2021; Gavela et al., 2023). Αντίστοιχα, για τα εδαφικά έργα και τα υλικά της υποδομής, οι δοκιμές ταξινόμησης, συμπίκνωσης και μηχανικής συμπεριφοράς δεν είναι δευτερεύουσες εργαστηριακές ασκήσεις, αλλά κρίσιμοι δείκτες της μελλοντικής σταθερότητας της έδρασης και της λειτουργικής αξιοπιστίας της γραμμής, όπως δείχνει η πρόσφατη βιβλιογραφία για τα

γεωτεχνικά χαρακτηριστικά εδαφών σε σιδηροδρομικές εφαρμογές και για την υποβάθμιση του έρματος ή των αδρανών υπό συνθήκες λειτουργίας (Okost et al., 2024; Paz et al., 2024).

Σε ανώτερο επίπεδο, τα πρότυπα σχεδιασμού και τα σιδηροδρομικά πλαίσια ολοκλήρωσης προσδιορίζουν το πώς τα επαληθευμένα υλικά και τα επιμέρους τεχνικά συστήματα εντάσσονται σε ένα συνεκτικό και ασφαλές έργο. Τα Ευρωπαϊκά πρότυπα σχεδιασμού, όπως το EN 1992, δεν λειτουργούν αποκομμένα από τα πρότυπα δοκιμών, αλλά σε διαρκή σχέση με αυτά, αφού οι σχεδιαστικές παραδοχές για φέρουσα ικανότητα, πυραντίσταση και ανθεκτικότητα αποκτούν πραγματική ισχύ μόνον όταν υποστηρίζονται από επαληθευμένα δεδομένα υλικών και ελέγχου κατασκευής. Στο ανώτατο επίπεδο, τα σιδηροδρομικά υποσυστήματα πρέπει να ελεγχθούν ως “system of systems”, δηλαδή ως τεχνικές οντότητες όπου η λειτουργική ασφάλεια εξαρτάται από τη διαχείριση διεπαφών μεταξύ υποδομής, ενέργειας, ελέγχου-σηματοδότησης, ETCS, τηλεπικοινωνιών και εγκαταστάσεων σηράγγων. Η βιβλιογραφία για την ολοκλήρωση μεγάλων σιδηροδρομικών έργων και για την ασφάλεια σηράγγων υπογραμμίζει ότι η τελική αποδοχή δεν μπορεί να βασιστεί σε μεμονωμένες πιστοποιήσεις στοιχείων, αλλά απαιτεί δοκιμές διεπαφών, τεκμηριωμένη ολοκλήρωση και απόδειξη συντονισμένης επίδοσης σε επιχειρησιακά σενάρια, ιδιαίτερα σε περιβάλλοντα υψηλού κινδύνου όπως οι μακρές σιδηροδρομικές σήραγγες (Bjelland et al., 2024; Lin, 2025; Muruganandan et al., 2022). Με αυτή τη λογική, η “στοίβα απαιτήσεων” της περίπτωσης Ροδοδάφνη-Ρίο δεν πρέπει να ιδωθεί ως απλή ταξινόμηση κανονισμών, αλλά ως αναλυτικό εργαλείο που συνδέει την ποιότητα των μετρήσεων, την τεκμηρίωση υλικών, την επάρκεια σχεδιασμού και τη συστημική ασφάλεια της τελικής σιδηροδρομικής υποδομής.

Η στοίβα απαιτήσεων συνοψίζεται ως εξής:

- Επάρκεια δοκιμών και παραγωγή αποδεικτικών στοιχείων, βάσει ISO/IEC 17025, με απαιτήσεις ιχνηλασιμότητας, τεκμηρίωσης επάρκειας και εξουσιοδοτημένων εκθέσεων.
- Σκυρόδεμα και επίδοση υλικών, βάσει EN 206 και EN 12390, με απαιτήσεις έγκρισης σύνθεσης και ελέγχου αντοχής και ανθεκτικότητας.
- Σταθερότητα εδαφών, βάσει EN ISO 17892, με απαιτήσεις τεκμηρίωσης συμπύκνωσης και ταξινόμησης.
- Ιδιότητες αδρανών, βάσει EN 933 και EN 1097, με απαιτήσεις κοκκομετρικής και μηχανικής τεκμηρίωσης.

- Συμμόρφωση δομικού σχεδιασμού, βάσει EN 1992, με ευθυγράμμιση μεταξύ υπολογισμών και επαληθευμένων ιδιοτήτων υλικών.
- Διαλειτουργικότητα ηλεκτροκίνησης και σηματοδότησης, βάσει ΤΠΔ και τεχνικών προτύπων ERTMS/ETCS, με απαιτήσεις δοκιμών ενσωμάτωσης και επικύρωσης.
- Συστήματα ασφάλειας σήραγγας, βάσει SRT TSI, με επαλήθευση πυροπροστασίας, αερισμού και επικοινωνίας έκτακτης ανάγκης.

Το πολυεπίπεδο αυτό πλαίσιο παρέχει τον κανονιστικό κορμό για την αξιολόγηση της περίπτωσης Ροδοδάφνη-Ρίο. Διασφαλίζει ότι κάθε υποσύστημα εξετάζεται έναντι των προτύπων που το διέπουν και προσδιορίζει με σαφήνεια τα απαιτούμενα τεκμήρια συμμόρφωσης σε έργο σιδηροδρομικής υποδομής υψηλής κρισιμότητας για την ασφάλεια και τη διαλειτουργικότητα.

4.4 Μοντέλο Αποδεικτικών Στοιχείων για τη Διασφάλιση Ποιότητας και την Αποδοχή

Σε σύνθετο σιδηροδρομικό έργο υποδομής όπως το τμήμα Ροδοδάφνη–Ρίο της Νέας Σιδηροδρομικής Γραμμής Κιάτο–Πάτρα, η συμμόρφωση δεν τεκμαίρεται από τη φυσική ολοκλήρωση των εργασιών, αλλά πρέπει να αποδεικνύεται μέσω δομημένων, ιχνηλάσιμων και ελέγξιμων τεκμηρίων. Ελλείπει ιδιοκτησιακών δεδομένων πεδίου, η παρούσα μελέτη διαμορφώνει αναλυτικό μοντέλο αποδεικτικών στοιχείων βασισμένο σε ευρωπαϊκά πρότυπα, πλαίσια διαλειτουργικότητας και αναγνωρισμένες αρχές διαχείρισης ποιότητας. Στόχος είναι να προσδιοριστεί ποια μορφή τεκμηρίωσης και επαλήθευσης συνιστά επαρκές και νομικά υπερασπίσιμο αποδεικτικό συμμόρφωσης για κάθε υποσύστημα του συμβατικού αντικειμένου.

Στο θεμελιώδες επίπεδο βρίσκεται η τεκμηρίωση συμμόρφωσης σχεδιασμού, η οποία κατοχυρώνει τη νομιμότητα του έργου σε κανονιστικό επίπεδο. Για κτίρια σταθμών, αποβάθρες οπλισμένου σκυροδέματος και επενδύσεις σηράγγων, η συμμόρφωση εδράζεται σε υπολογισμούς κατά Ευρωκώδικες και σε προδιαγραφές επίδοσης. Το EN 1992 διέπει τον δομικό σχεδιασμό οπλισμένου σκυροδέματος, περιλαμβάνοντας οριακές καταστάσεις αντοχής, λειτουργικότητας και πυροπροστασίας, ενώ το EN 206 καθορίζει κατηγορίες επίδοσης, κατηγορίες έκθεσης και κριτήρια συμμόρφωσης για την παραγωγή σκυροδέματος. Τα αποδεκτά τεκμήρια περιλαμβάνουν εγκεκριμένα στατικά σχέδια, υπολογισμούς συνδυασμών φορτίων, προδιαγραφές ανθεκτικότητας και τεκμηριωμένες ανασκοπήσεις σχεδιασμού. Για τη σήραγγα Παναγοπούλας, απαιτείται επιπλέον τεκμηρίωση ευθυγράμμισης με την Τεχνική Προδιαγραφή Διαλειτουργικότητας για την Ασφάλεια σε Σιδηροδρομικές Σήραγγες, η οποία επιβάλλει συγκεκριμένες λειτουργίες ασφάλειας ως προς πυροπροστασία, εκκένωση και ενσωμάτωση συστημάτων. Το πρώτο επίπεδο αποδεικτικών στοιχείων αφορά επομένως την επικυρωμένη πρόθεση σχεδιασμού.

Το δεύτερο επίπεδο αφορά τεκμήρια διασφάλισης ποιότητας κατασκευής. Η διασφάλιση ποιότητας θεσμοθετείται μέσω Σχεδίων Επιθεώρησης και Δοκιμών και δομημένων πρωτοκόλλων ελέγχου που ορίζουν σημεία ελέγχου και κριτήρια επαλήθευσης (PMI, 2021). Για έργα πολιτικού μηχανικού, σταθμών και επενδύσεων σηράγγων, τα τεκμήρια περιλαμβάνουν φύλλα ελέγχου οπλισμού, εγκρίσεις ξυλοτύπων και φύλλα ελέγχου πριν και μετά τη σκυροδέτηση. Για τα έργα διαμόρφωσης υποδομής απαιτούνται τεκμηριωμένες

επαλήθευσεις συμπίκνωσης, μετρήσεις γεωμετρικής ευθυγράμμισης και έλεγχοι αποστράγγισης. Η εγκατάσταση ηλεκτροκίνησης παράγει τεκμήρια ως προς τη θέση ιστών, την ακεραιότητα αγκυρώσεων και τη ρύθμιση τάσης αγωγών. Η σηματοδότηση και το ETCS απαιτούν τεκμηριωμένη επιβεβαίωση θέσης εξοπλισμού, ακεραιότητας καλωδίου και προστασίας από περιβαλλοντικές επιδράσεις. Στο περιβάλλον σήραγγας, τα αρχεία επιθεώρησης οφείλουν να τεκμηριώνουν την ετοιμότητα εγκατάστασης συστημάτων αερισμού, οδύσεων καλωδίων και φωτισμού ασφαλείας πριν την ηλεκτροδότηση. Το επίπεδο αυτό διασφαλίζει ότι το κατασκευασμένο έργο ευθυγραμμίζεται με τη βάση σχεδιασμού.

Το τρίτο πεδίο αποδεικτικών στοιχείων αφορά την επαλήθευση υλικών. Η αποδοχή δομικών και γεωτεχνικών έργων εξαρτάται από εργαστηριακά αποτελέσματα που παράγονται υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Το ISO/IEC 17025 διέπει την επάρκεια των δραστηριοτήτων δοκιμών και την ιχνηλασιμότητα μετρήσεων, απαιτώντας αρχεία διακρίβωσης, επικυρωμένες μεθόδους και τεκμηριωμένες διαδικασίες δειγματοληψίας. Για σκυρόδεμα, οι εκθέσεις αντοχής κατά EN 12390 πρέπει να αποδεικνύουν συμμόρφωση με τις κατηγορίες επίδοσης του EN 206. Για εδάφη, οι δοκιμές κατά EN ISO 17892 παρέχουν τεκμήρια συμπίκνωσης και ταξινόμησης. Τα αδρανή οφείλουν να ικανοποιούν τις απαιτήσεις EN 933 και EN 1097 ως προς διαβάθμιση και μηχανική αντοχή. Η αποδεικτική ισχύς των εκθέσεων εξαρτάται από την ιχνηλασιμότητα διακρίβωσης και από διαδικασίες αλυσίδας φύλαξης δειγμάτων. Το επίπεδο αυτό γεφυρώνει τον σχεδιασμό με την κατασκευασμένη πραγματικότητα.

Το τέταρτο επίπεδο αφορά τεκμήρια θέσης σε λειτουργία, ιδίως λόγω της παρουσίας ηλεκτροκίνησης, σηματοδότησης, ETCS και Η/Μ συστημάτων σήραγγας. Η θέση σε λειτουργία ηλεκτροκίνησης απαιτεί δοκιμές μόνωσης, επαλήθευση γείωσης και πρωτόκολλα ασφαλούς ηλεκτροδότησης. Η σηματοδότηση και το ETCS απαιτούν Δοκιμές Αποδοχής Εργοστασίου και Δοκιμές Αποδοχής Εγκατάστασης, με επιβεβαίωση σωστής διαμόρφωσης και διαλειτουργικότητας σύμφωνα με τα ευρωπαϊκά πλαίσια διακυβέρνησης. Η επικύρωση ETCS περιλαμβάνει έλεγχο προγραμματισμού balises, ακεραιότητα επικοινωνίας και συμβατότητα διεπαφών με αλληλομανδάλωση. Οι τηλεπικοινωνίες απαιτούν δοκιμές οπτικών ινών, επαλήθευση πλεονασμού δεδομένων και επιχειρησιακή επικύρωση συνδέσεων.

Στη σήραγγα, τα Η/Μ συστήματα προσθέτουν κρίσιμο επίπεδο ασφάλειας. Η Τεχνική Προδιαγραφή Διαλειτουργικότητας για την Ασφάλεια σε Σιδηροδρομικές Σήραγγες απαιτεί λειτουργική επαλήθευση αερισμού, ανίχνευσης πυρκαγιάς, φωτισμού ασφαλείας και επικοινωνιών έκτακτης ανάγκης. Τα τεκμήρια περιλαμβάνουν εκθέσεις δοκιμών παροχής

αέρα, επικύρωση ελέγχου καπνού, δοκιμές αυτόνομης λειτουργίας φωτισμού και προσομοιώσεις σεναρίων ασφάλειας. Τα αρχεία αυτά αποδεικνύουν όχι μόνο εγκατάσταση, αλλά και επιχειρησιακή ετοιμότητα υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης.

Το τελικό επίπεδο αποδεικτικών στοιχείων αφορά τον έλεγχο διαμόρφωσης και τεκμηρίωσης. Έργα μεγάλης κλίμακας απαιτούν σύστημα ελέγχου εκδόσεων ώστε να διασφαλίζεται ιχνηλασιμότητα μεταξύ αναθεωρήσεων σχεδιασμού, μεταβολών κατασκευής και τελικής κατάστασης ως κατασκευάστηκε (PMI, 2021). Σχέδια ως κατασκευάστηκε για οδεύσεις καλωδίων, αγωγούς αερισμού και θέσεις εξοπλισμού σηματοδότησης παρέχουν τεκμηρίωση κύκλου ζωής. Τα αρχεία ελέγχου διαμόρφωσης διασφαλίζουν ότι τα εγκατεστημένα στοιχεία ETCS και σηματοδότησης αντιστοιχούν στις εγκεκριμένες γραμμές βάσης και στις προδιαγραφές διαλειτουργικότητας. Χωρίς τέτοια τεκμηρίωση, η μακροχρόνια συντήρηση και ο κανονιστικός έλεγχος θα υπονομεύονταν.

4.5 Λογική Ασφαλείας Κεντρικής Σήραγγας για την Παναγοπούλα

Η σήραγγα Παναγοπούλας αποτελεί το πλέον κρίσιμο στοιχείο του τμήματος Ροδοδάφνη–Ρίο από πλευράς ασφάλειας, καθώς οι σιδηροδρομικές σήραγγες συνιστούν περιβάλλοντα υψηλής συστημικής αλληλεξάρτησης, στα οποία η συνολική επίδοση σε κανονικές και έκτακτες συνθήκες εξαρτάται όχι μόνο από τη λειτουργία μεμονωμένων τεχνικών συστημάτων, αλλά κυρίως από τον βαθμό ολοκλήρωσης και συντονισμού μεταξύ δομικής ανθεκτικότητας, πυροπροστασίας, αερισμού, φωτισμού έκτακτης ανάγκης, επικοινωνιών και συστημάτων ελέγχου. Η πρόσφατη ερευνητική βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η ασφάλεια των σηράγγων δεν μπορεί να τεκμηριωθεί επαρκώς μέσω αποσπασματικών ελέγχων επιμέρους εγκαταστάσεων, αλλά απαιτεί συστημική και σεναριοκεντρική προσέγγιση, επειδή η πραγματική ανθεκτικότητα του έργου κρίνεται από τη συνδυασμένη απόκριση των υποσυστημάτων σε συμβάντα όπως η πυρκαγιά, η απώλεια ισχύος ή η αποτυχία επικοινωνιών (Bjelland et al., 2024).

Υπό αυτό το πρίσμα, η πρώτη στρώση διασφάλισης αφορά τη δομική συμπεριφορά της σήραγγας, δεδομένου ότι η διεθνής βιβλιογραφία έχει δείξει πως οι πυρκαγιές σε σήραγγες μπορούν να προκαλέσουν απολέπιση, υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και σημαντική μείωση της φέρουσας ικανότητας των επενδύσεων, ιδίως όταν δεν έχει αξιολογηθεί επαρκώς η θερμομηχανική συμπεριφορά των στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος υπό ακραία θερμικά φορτία (Hua et al., 2022; Lee et al., 2023).

Η δεύτερη στρώση αφορά τον αερισμό, τον έλεγχο καπνού και την υποστήριξη της εκκένωσης, καθώς η βιβλιογραφία για την πυρασφάλεια υπόγειων μεταφορικών υποδομών υπογραμμίζει ότι η εξάπλωση καπνού, η περιορισμένη ορατότητα και η δυσχέρεια αυτοδιάσωσης αποτελούν τους κρισιμότερους παράγοντες κινδύνου σε σενάρια πυρκαγιάς, γεγονός που καθιστά αναγκαία την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της απόδοσης των στρατηγικών αερισμού και καθοδήγησης διαφυγής (Dong et al., 2022; Skjermo et al., 2024).

Παράλληλα, η αξιοπιστία των επικοινωνιών και των συστημάτων ελέγχου αποκτά ιδιαίτερη σημασία σε υπόγειο περιβάλλον, επειδή η ασφαλής λειτουργία των σύγχρονων σιδηροδρομικών υποδομών εξαρτάται από την αδιάλειπτη μετάδοση δεδομένων, τη λειτουργική διασύνδεση των επιμέρους υποσυστημάτων και τη διαχείριση τεχνικών διεπαφών μεταξύ σηματοδότησης, επικοινωνιών και λοιπών ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων (Fernández-Berrueta et al., 2022; Muruganandan et al., 2022). Συνεπώς, η λογική διασφάλιση για την Παναγοπούλα δεν θα πρέπει να προσεγγίζεται ως άθροισμα ανεξάρτητων επιθεωρήσεων εξοπλισμού, αλλά ως σήραγγο-κεντρική λογική ολοκληρωμένης ασφάλειας, στην οποία η ετοιμότητα τεκμηριώνεται μέσω αποδεικτικών στοιχείων δομικής ανθεκτικότητας, λειτουργικής αξιοπιστίας, ελέγχου καπνού, αποτελεσματικότητας εκκένωσης και συντονισμένης απόκρισης όλων των κρίσιμων υποσυστημάτων σε ρεαλιστικά σενάρια συμβάντων (Bjelland et al., 2024; Hua et al., 2022; Muruganandan et al., 2022).

4.6 Εφαρμογή των προτύπων ISO/IEC 17025

Στη μελέτη περίπτωσης του τμήματος Ροδοδάφνη-Ρίο, το ISO/IEC 17025 δεν εξετάζεται ως γενικό πρότυπο εργαστηριακής διαπίστευσης, αλλά ως λειτουργικό πλαίσιο που υποστηρίζει την αξιοπιστία των αποδεικτικών στοιχείων πάνω στα οποία στηρίζονται κρίσιμες τεχνικές αποφάσεις αποδοχής. Στο συγκεκριμένο έργο, οι εργαστηριακές δοκιμές δεν αποτελούν παράλληλη ή δευτερεύουσα δραστηριότητα, αλλά εντάσσονται άμεσα στη διαδικασία ελέγχου της κατασκευαστικής συμμόρφωσης για στοιχεία όπως το δομικό σκυρόδεμα σταθμών και αποβαθρών, οι στρώσεις έδρασης της υποδομής, τα αδρανή υλικά, καθώς και τα τεχνικά στοιχεία που συνδέονται με τη σήραγγα Παναγοπούλας.

Η εφαρμογή των απαιτήσεων του προτύπου αποκτά ιδιαίτερο βάρος στο επίπεδο της αποδοχής αποτελεσμάτων. Στην πράξη, η αξιοπιστία των δοκιμών εξαρτάται από το κατά πόσο τα εργαστηριακά δεδομένα παράγονται υπό συνθήκες οργανωτικής ανεξαρτησίας, τεχνικής επάρκειας, ελεγχόμενων διαδικασιών και τεκμηριωμένης διαχείρισης αποκλίσεων. Στο έργο

αυτό, η ανάγκη αυτή είναι ακόμη πιο έντονη, επειδή η πρόοδος των επόμενων φάσεων κατασκευής εξαρτάται από την εγκυρότητα προηγούμενων ελέγχων. Η αποδοχή μιας σκυροδέτησης, η αξιολόγηση της επάρκειας μιας στρώσης έδρασης ή η καταλληλότητα υλικών για χρήση σε επιμέρους τεχνικά έργα προϋποθέτουν αποτελέσματα που μπορούν να τεκμηριωθούν, να ελεγχθούν και να υποστηριχθούν τεχνικά.

Στο πλαίσιο αυτό, οι απαιτήσεις που συνδέονται με την αμεροληψία αποκτούν άμεση πρακτική σημασία, επειδή τα αποτελέσματα των δοκιμών δεν πρέπει να επηρεάζονται από πιέσεις χρονοδιαγράμματος, κατασκευαστικής προόδου ή διοικητικών σκοπιμοτήτων. Η λειτουργική ανεξαρτησία της παραγωγής και της έγκρισης των αποτελεσμάτων είναι κρίσιμη, ιδίως όταν τα δεδομένα αυτά επηρεάζουν αποφάσεις αποδοχής σε στοιχεία υψηλής απαίτησης, όπως τα δομικά μέλη της σήραγγας ή οι φέρουσες κατασκευές των σταθμών. Αντίστοιχα, οι απαιτήσεις που αφορούν τους πόρους αποκτούν ουσιαστικό περιεχόμενο μέσω της τεκμηριωμένης επάρκειας του προσωπικού και της καταλληλότητας του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές. Στην περίπτωση του Ροδοδάφνη-Ρίο, η τεχνική επάρκεια δεν αφορά αφηρημένα το εργαστήριο, αλλά την ικανότητά του να υποστηρίζει τεκμηριωμένα την αποδοχή σκυροδεμάτων, αδρανών και γεωτεχνικών στρώσεων με μετρήσεις που είναι ιχνηλάσιμες και τεχνικά υπερασπίσιμες.

Αντίστοιχα, οι απαιτήσεις που σχετίζονται με τις διεργασίες είναι ιδιαίτερα κρίσιμες στο συγκεκριμένο έργο, καθώς η ορθότητα της δειγματοληψίας, η εφαρμογή της σωστής μεθόδου, η ορθή διαχείριση δοκιμίων και η τεκμηριωμένη αναφορά αποτελεσμάτων καθορίζουν την πραγματική αξία της αποδεικτικής διαδικασίας. Στη σήραγγα Παναγοπούλας, για παράδειγμα, όπου οι εργασίες ενδέχεται να πραγματοποιούνται τμηματικά, με έντονους χρονικούς περιορισμούς και σε περιβάλλον αυξημένης τεχνικής επικινδυνότητας, η ακρίβεια της δειγματοληψίας και η ορθή μεταχείριση των δοκιμίων επηρεάζουν άμεσα την αξιολόγηση της δομικής επάρκειας. Το ίδιο ισχύει και για τις στρώσεις έδρασης και τα γεωτεχνικά υλικά, όπου η αξιοπιστία του αποτελέσματος εξαρτάται από την αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος και από τη σωστή εφαρμογή της μεθόδου.

Σε συστημικό επίπεδο, η συμβολή του προτύπου αποτυπώνεται κυρίως στην ικανότητα του μηχανισμού ελέγχου να εντοπίζει, να τεκμηριώνει και να διαχειρίζεται αποκλίσεις πριν αυτές μετατραπούν σε προβλήματα αποδοχής ή, ακόμη χειρότερα, σε λανθάνουσες αδυναμίες του έργου. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου οι διεπαφές μεταξύ πολιτικών έργων, επιδομής, Η/Μ εγκαταστάσεων και υποσυστημάτων της σήραγγας απαιτούν

συνοχή όχι μόνο στο επίπεδο του σχεδιασμού αλλά και στο επίπεδο της τεκμηριωμένης κατασκευαστικής επαλήθευσης. Υπό αυτή την έννοια, η εφαρμογή του ISO/IEC 17025 στο έργο Ροδοδάφνη–Ρίο λειτουργεί ως μηχανισμός θωράκισης της τεχνικής αξιοπιστίας των δεδομένων που συνοδεύουν την αποδοχή του έργου.

Η σημασία της εφαρμογής του προτύπου είναι ακόμη πιο έντονη στη σήραγγα Παναγοπούλας, όπου η δομική ακεραιότητα, η ανθεκτικότητα των υλικών και η ασφάλεια των επιμέρους τεχνικών υποσυστημάτων συνδέονται με αυξημένες απαιτήσεις τεκμηρίωσης και ελέγχου. Εδώ, η αξιοπιστία των εργαστηριακών αποτελεσμάτων δεν υποστηρίζει μόνο την ποιοτική αποδοχή των εργασιών, αλλά και τη συνολική τεχνική λογική με την οποία τεκμηριώνεται η ετοιμότητα ενός υποσυστήματος υψηλής κρισιμότητας. Συνεπώς, στο συγκεκριμένο έργο, το ISO/IEC 17025 δεν λειτουργεί απλώς ως πρότυπο συμμόρφωσης εργαστηρίου, αλλά ως κρίσιμο υπόβαθρο για την εγκυρότητα, την ιχνηλασιμότητα και τη θεσμική αξιοπιστία της διαδικασίας αποδοχής.

4.7 Λογική διασφάλισης υποδομής σταθμού και στάσεων

Η κατασκευή σιδηροδρομικών σταθμών και στάσεων στο τμήμα Ροδοδάφνη–Ρίο συνιστά διακριτό υποσύστημα υποδομής με δομικές, λειτουργικές και κανονιστικές διαστάσεις που υπερβαίνουν την απλή αρχιτεκτονική υλοποίηση. Παρότι λιγότερο τεχνολογικά σύνθετες από τη σήραγγα Παναγοπούλας, οι εγκαταστάσεις σταθμών και στάσεων αποτελούν σημεία υψηλής έκθεσης του κοινού στο σιδηροδρομικό σύστημα και, συνεπώς, απαιτούν δομημένη λογική διασφάλισης ευθυγραμμισμένη με τα ευρωπαϊκά πλαίσια σχεδιασμού, ασφάλειας και διαλειτουργικότητας. Η παρούσα ενότητα αναπτύσσει ένα μοντέλο διασφάλισης με επίκεντρο τον σταθμό, το οποίο αντιμετωπίζει τα κτίρια, τις αποβάθρες, τα στέγαστρα και τους περιβάλλοντες χώρους ως ολοκληρωμένα στοιχεία του υποσυστήματος σιδηροδρομικής υποδομής.

Από δομική άποψη, τα κτίρια σταθμών και ιδίως οι αποβάθρες πρέπει να αντιμετωπίζονται ως λειτουργικά φέροντα στοιχεία με ταυτόχρονα γεωμετρικές, λειτουργικές και απαιτήσεις ανθεκτικότητας. Η επάρκειά τους δεν εξαντλείται στην κλασική στατική επίλυση, αλλά περιλαμβάνει τον έλεγχο δράσεων χρήσης, περιβαλλοντικών φορτίων και τοπικών απαιτήσεων λειτουργικότητας, σύμφωνα με το πλαίσιο των Ευρωκωδίκων για δράσεις επί των κατασκευών και για κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα (European Committee for Standardization [CEN], 2002, 2004). Στην πράξη, οι αποβάθρες υπόκεινται όχι μόνο σε κατακόρυφα φορτία

επιβατών, αλλά και σε επαναλαμβανόμενες δράσεις κυκλοφορίας, τοπικές συγκεντρώσεις πλήθους κοντά στις ζώνες επιβίβασης και δυναμικές επιδράσεις που συνδέονται με τη χρήση και τις ταλαντώσεις του φορέα, στοιχεία που η πρόσφατη βιβλιογραφία θεωρεί κρίσιμα για την αξιολόγηση της επιτελεστικότητας δομικών στοιχείων σε μεγάλους σιδηροδρομικούς χώρους (Liang et al., 2024). Παράλληλα, για υπαίθριες αποβάθρες ή σταθμούς που βρίσκονται σε περιβάλλον αυξημένης υγρασίας ή θαλάσσιας επιρροής, η δομική αξιολόγηση πρέπει να ενσωματώνει ρητά ζητήματα ανθεκτικότητας έναντι διάβρωσης οπλισμού και διείσδυσης χλωριόντων, καθώς η σύγχρονη έρευνα δείχνει ότι η μακροχρόνια αξιοπιστία των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος σε παράκτια περιβάλλοντα εξαρτάται περισσότερο από την τεκμηριωμένη επιλογή κατηγορίας έκθεσης, επικάλυψης, σύνθεσης σκυροδέματος και στρατηγικής συντήρησης παρά από τη μόνη συμμόρφωση της αρχικής αντοχής σε θλίψη (Castañeda Valdés et al., 2024; Flah et al., 2026). Επιπλέον, στην περίπτωση των αποβαθρών η δομική ετοιμότητα συνδέεται άμεσα με τη γεωμετρική συμβατότητα αποβάθρας–συρμού, επειδή η οριζόντια και κατακόρυφη απόσταση στην επιφάνεια επιβίβασης επηρεάζει ουσιωδώς τόσο την ασφάλεια όσο και την προσβασιμότητα στο platform–train interface, ιδίως σε συνθήκες καμπυλότητας, ανοχών κατασκευής ή μεταβολών της τροχιάς και του φορέα με τον χρόνο (Harding et al., 2024; Piccioni et al., 2021). Συνεπώς, τα αποδεικτικά στοιχεία διασφάλισης για σταθμούς και αποβάθρες δεν θα πρέπει να περιορίζονται σε εγκεκριμένους στατικούς υπολογισμούς και αποτελέσματα θλιπτικής αντοχής, αλλά να περιλαμβάνουν επίσης επαλήθευση λεπτομερειών οπλισμού, τεκμηρίωση της προβλεπόμενης κατηγορίας έκθεσης και ανθεκτικότητας, καθώς και ελέγχους ανοχών και γεωμετρικής θέσης της αποβάθρας σε σχέση με τη γραμμή, ώστε να αποδεικνύεται ότι η κατασκευή είναι ταυτόχρονα ασφαλής, ανθεκτική και λειτουργικά συμβατή με το σιδηροδρομικό σύστημα (Liang et al., 2024).

Η γεωμετρία της αποβάθρας είναι κρίσιμη για την ασφάλεια. Η ευθυγράμμιση πρέπει να συμμορφώνεται με τα όρια ελεύθερου περιτυπώματος και τις απαιτήσεις κινηματικού περιγράμματος που ορίζονται στα ευρωπαϊκά πλαίσια διαλειτουργικότητας (European Union Agency for Railways [ERA], n.d.). Αποκλίσεις στο ύψος ή στην οριζόντια μετατόπιση της αποβάθρας ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο την ασφάλεια επιβίβασης και την ελεύθερη διέλευση των συρμών. Κατά συνέπεια, αρχεία γεωμετρικής επαλήθευσης, τοπογραφικές αποτυπώσεις και τεκμηρίωση as-built μετρήσεων αποτελούν ουσιώδη στοιχεία αποδοχής. Στο πλαίσιο αυτό, τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών, όπως οι τιμές αντοχής σκυροδέματος που διέπονται από ελέγχους ISO/IEC 17025, αλληλεπιδρούν άμεσα με την

επαλήθευση ασφάλειας επιβεβαιώνοντας τη δομική ακεραιότητα πριν από τη δημόσια χρήση (ISO, 2017).

Τα στέγαστρα και οι βοηθητικές μεταλλικές κατασκευές που εγκαθίστανται στις αποβάθρες εισάγουν πρόσθετες δομικές απαιτήσεις. Η αντοχή σε ανεμοπίεση, τα συστήματα αντιδιαβρωτικής προστασίας και η ακεραιότητα αγκυρώσεων πρέπει να συμμορφώνονται με τις διατάξεις του EN 1993 για μεταλλικές κατασκευές (CEN, 2005). Τα αποδεικτικά στοιχεία συμμόρφωσης περιλαμβάνουν πιστοποιητικά γαλβανισμού, αρχεία επιθεώρησης επιστρώσεων και επαλήθευση εξόλκευσης αγκυρίων όπου απαιτείται. Δεδομένου ότι τα στέγαστρα εκτίθενται συχνά σε περιβαλλοντική καταπόνηση και αλληλεπίδραση με το επιβατικό κοινό, η διασφάλιση ανθεκτικότητας κύκλου ζωής είναι εξίσου κρίσιμη με την αρχική δομική επάρκεια.

Τα κτίρια σταθμών δεν συνιστούν απλώς βοηθητικές κτιριακές εγκαταστάσεις, αλλά κρίσιμους κόμβους λειτουργικής ολοκλήρωσης, στους οποίους συνυπάρχουν αρχιτεκτονικά, ηλεκτρολογικά, μηχανολογικά και κυκλοφοριακά συστήματα που επηρεάζουν άμεσα τόσο την ασφάλεια όσο και τη χρηστικότητα της σιδηροδρομικής υποδομής. Η σχετική βιβλιογραφία για τους σιδηροδρομικούς σταθμούς και τα multimodal hubs δείχνει ότι η επιχειρησιακή επάρκεια τέτοιων χώρων εξαρτάται από τη συνδυασμένη επίδοση των συστημάτων πρόσβασης, φωτισμού, σήμανσης, εκκένωσης και κυκλοφορίας επιβατών, ιδίως σε περιβάλλοντα αυξημένης επιβατικής πυκνότητας ή έκτακτης ανάγκης (Wu et al., 2025; Xu et al., 2022). Υπό αυτή την έννοια, η τεκμηρίωση θέσης σε λειτουργία για τις εγκαταστάσεις σταθμών δεν θα πρέπει να περιορίζεται σε επιμέρους ελέγχους εξοπλισμού, αλλά να αποδεικνύει ότι ο φωτισμός, η σήμανση εξόδων, οι διαδρομές πρόσβασης και τα συστήματα πληροφόρησης υποστηρίζουν από κοινού ασφαλή και ευκρινή χρήση του σταθμού σε κανονικές και μη κανονικές συνθήκες (Wu et al., 2025; Xu et al., 2022). Παράλληλα, η προσβασιμότητα δεν αποτελεί δευτερεύουσα απαίτηση άνεσης, αλλά βασικό κριτήριο λειτουργικής ασφάλειας και ισότιμης χρήσης του σταθμού, καθώς πρόσφατες μελέτες τονίζουν ότι η step-free πρόσβαση, η συνέχεια της προσβάσιμης διαδρομής, οι ράμπες, η απτική καθοδήγηση και η διαχείριση του platform–train interface επηρεάζουν ουσιαστικά τόσο την ανεξάρτητη μετακίνηση όσο και τη συνολική επίδοση του σταθμού για άτομα με μειωμένη κινητικότητα ή αισθητηριακούς περιορισμούς (Beczowska & Grabarek, 2024; Swift, 2021; Whatman et al., 2024).

Ειδικά για τις αποβάθρες, η διεθνής βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι η γεωμετρία του platform–train interface, οι ανοχές θέσης και η φυσική διαμόρφωση της επιφάνειας επιβίβασης συνδέονται όχι μόνο με την προσβασιμότητα αλλά και με την ασφάλεια, τη ροή επιβατών και τη μείωση συγκρούσεων ή καθυστερήσεων στη διαδικασία επιβίβασης και αποβίβασης (Seriani et al., 2025; Whatman et al., 2024). Πέραν της επιβατικής λειτουργίας, οι περιβάλλοντες χώροι και τα συναφή τεχνικά έργα, όπως τα συστήματα αποστράγγισης, οι διαμορφώσεις πεζής πρόσβασης και οι τοίχοι αντιστήριξης, επηρεάζουν άμεσα τη μακροχρόνια επιτελεσματικότητα του σταθμού, επειδή η ανεπαρκής απορροή υδάτων και η παρατεταμένη υγρασία συνδέονται με αυξημένο κίνδυνο φθοράς σκυροδέματος, διάβρωσης οπλισμού και σταδιακής υποβάθμισης της λειτουργικότητας της υποδομής (Folić et al., 2024; Yamamoto et al., 2024). Αντίστοιχα, η πρόσφατη έρευνα για τη σιδηροδρομική υποδομή επισημαίνει ότι τα προβλήματα αποστράγγισης, θεμελίωσης και πλευρικής αντιστήριξης δεν είναι περιφερειακά ζητήματα πολιτικού μηχανικού, αλλά δομικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής, τη συντηρησιμότητα και την ασφάλεια της λειτουργίας, ιδίως όταν συνδυάζονται με μεταβαλλόμενα φορτία και απαιτήσεις συνεχούς διαθεσιμότητας του δικτύου (Liu et al., 2023; Lyu et al., 2025). Επιπλέον, οι διεπαφές μεταξύ υποδομής σταθμού και λοιπών σιδηροδρομικών υποσυστημάτων έχουν ιδιαίτερη σημασία, καθώς η βιβλιογραφία για μεγάλα σιδηροδρομικά έργα δείχνει ότι ακόμη και όταν επιμέρους συστήματα είναι τεχνικά ορθά, η απουσία δομημένης διακυβέρνησης διεπαφών μπορεί να δημιουργήσει αστοχίες στον συντονισμό, προβλήματα ορατότητας, συγκρούσεις χωροθέτησης και κινδύνους ασφαλείας κατά τη μετάβαση από την κατασκευή στη λειτουργία (Muruganandan et al., 2022; Taivo et al., 2026).

Τέλος, από την οπτική της εργαστηριακής διακυβέρνησης, η τεκμηρίωση της υποδομής σταθμού στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στην αξιοπιστία δοκιμών σκυροδέματος, αδρανών και εδαφικών υλικών, και η πρόσφατη βιβλιογραφία για την εφαρμογή του ISO/IEC 17025 σε εργαστήρια δοκιμών επισημαίνει ότι η ιχνηλασιμότητα διακριβώσεων, οι ελεγχόμενες διαδικασίες δειγματοληψίας και η τεκμηριωμένη εξουσιοδότηση αποτελούν ουσιώδεις όρους για την παραγωγή υπερασπίσιμων αποτελεσμάτων και, κατ' επέκταση, για τη λήψη αξιόπιστων αποφάσεων αποδοχής σε έργα πολιτικού μηχανικού (Panagiotidou et al., 2025; Parcharidis et al., 2024). Συνεπώς, η λογική θέσης σε λειτουργία για την υποδομή σταθμού πρέπει να αποδεικνύει όχι μόνο δομική ολοκλήρωση και κανονιστική συμμόρφωση, αλλά και συντονισμένη επιχειρησιακή ετοιμότητα, δηλαδή ότι οι αποβάθρες, τα δίκτυα αποστράγγισης, οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, η προσβάσιμη διαδρομή και τα συστήματα επιβατικής

πληροφόρησης λειτουργούν ως συνεκτικό και ασφαλές υποσύστημα κατά την έναρξη λειτουργίας του έργου (Muruganandan et al., 2022; Wu et al., 2025; Xu et al., 2022)..

4.8 Σύγκριση με Άλλες Ευρωπαϊκές Περιπτώσεις

Ο διεθνής συγκριτικός φακός της παρούσας μελέτης δεν επιδιώκει να ανασυνθέσει εσωτερικά συστήματα διαχείρισης ξένων έργων, αλλά να τοποθετήσει την περίπτωση Ροδοδάφνη–Ρίο μέσα σε ένα τεκμηριωμένο ευρωπαϊκό πλαίσιο αναφοράς, αντλώντας από δύο συμπληρωματικές κατηγορίες πηγών: αφενός από την επιστημονική βιβλιογραφία για τη διακυβέρνηση σύνθετων έργων υποδομής, την ολοκλήρωση υποσυστημάτων, την ασφάλεια σιδηρόδρομων και την αξιοπιστία εργαστηριακών τεκμηρίων, και αφετέρου από δημόσια διαθέσιμη τεχνική τεκμηρίωση εμβληματικών ευρωπαϊκών έργων. Η επιλογή αυτή είναι μεθοδολογικά πρόσφορη, διότι η βιβλιογραφία δείχνει ότι σε έργα υψηλής πολυπλοκότητας η επιτυχής μετάβαση από τον σχεδιασμό και την κατασκευή στη λειτουργία δεν εξαρτάται μόνο από την επιμέρους τεχνική συμμόρφωση, αλλά από την ικανότητα σύνδεσης απαιτήσεων, αποδεικτικών στοιχείων, διεπαφών και μηχανισμών ολοκλήρωσης σε ένα συνεκτικό σύστημα διακυβέρνησης (Cerezo-Narváez et al., 2020; Muruganandan et al., 2022).

Υπό αυτό το πρίσμα, το πρώτο συγκριτικό μοτίβο που αναδύεται αφορά την αντιμετώπιση της ετοιμότητας ελέγχου ως τεχνικού παραδοτέου και όχι ως εκ των υστέρων διοικητικής διαδικασίας. Η πρόσφατη βιβλιογραφία για το ISO/IEC 17025 υπογραμμίζει ότι η αξία της διαπίστευσης δεν εξαντλείται στην τυπική συμμόρφωση, αλλά συνδέεται με την τεχνική επάρκεια, την αμεροληψία, την ιχνηλασιμότητα και τη δυνατότητα παραγωγής υπερασπίσιμων αποτελεσμάτων σε περιβάλλοντα αυξημένων απαιτήσεων τεκμηρίωσης (Panagiotidou et al., 2025). Στο ίδιο πνεύμα, η δημόσια τεκμηρίωση του Crossrail δείχνει ότι η ποιότητα και η διασφάλιση οργανώθηκαν σε επίπεδο προγράμματος μέσω επιθεώρησης and ελέγχου, αυτοπιστοποίηση, διασφάλιση απόδοσης και συστηματικής παρακολούθησης των διορθωτικών ενεργειών, δηλαδή ως τμήμα της ίδιας της παραγωγής του έργου και όχι ως περιφερειακή λειτουργία συμμόρφωσης (Crossrail Ltd, 2016a, 2016b). Για την περίπτωση Ροδοδάφνη–Ρίο, το συγκριτικό δίδαγμα δεν είναι η μηχανική αντιγραφή του οργανωτικού μοντέλου του Crossrail, αλλά η αρχή ότι η αποδοχή υλικών, δοκιμών και κατασκευασμένων στοιχείων πρέπει να εδράζεται σε αδιάσπαστη αλυσίδα τεκμηρίων, όπου η ποιότητα των μετρήσεων, ο έλεγχος εγγράφων και η παρακολούθηση αποκλίσεων αντιμετωπίζονται ως οργανικά στοιχεία του τεχνικού αντικειμένου (Muruganandan et al., 2022; Panagiotidou et al., 2025).

Το δεύτερο συγκριτικό μοτίβο αφορά τη μετατόπιση από τον έλεγχο μεμονωμένων στοιχείων προς την ολοκληρωμένη επαλήθευση συστήματος, ιδίως στις σιδηροδρομικές σήραγγες. Η σύγχρονη βιβλιογραφία για την ασφάλεια σηράγγων επισημαίνει ότι η πραγματική επίδοση σε κατάσταση έκτακτης ανάγκης δεν εξαρτάται από την απλή ύπαρξη επί μέρους προστατευτικών διατάξεων, αλλά από τον τρόπο με τον οποίο οι δομικές, ηλεκτρομηχανολογικές, τηλεπικοινωνιακές και επιχειρησιακές συνιστώσες αλληλεπιδρούν ως ενιαίο σύστημα (Bjelland et al., 2024). Αντίστοιχα, ειδικές μελέτες περίπτωσης, όπως η ανάλυση πυρασφάλειας της Σήραγγας Βάσης Brenner, δείχνουν ότι η αξιολόγηση σηραγγικών υποδομών υψηλής κρισιμότητας απαιτεί συνδυασμένη διερεύνηση ρεαλιστικών σεναρίων πυρκαγιάς, θερμικών φορτίων και δομικής απόκρισης, και όχι απλώς έλεγχο ονομαστικών προδιαγραφών εξοπλισμού ή υλικών (Bergmeister et al., 2020). Παράλληλα, η δημόσια τεκμηρίωση για τη φάση κατασκευής του Mont Cenis base tunnel στη γραμμή Lyon–Turin αναδεικνύει ότι η ασφάλεια οργανώνεται ήδη από τη φάση κατασκευής μέσω σχεδιασμένης διαχείρισης έκτακτης ανάγκης, δηλαδή πριν από την τελική θέση σε λειτουργία (Sorlini et al., 2025). Για την Παναγοπούλα, επομένως, το συγκριτικό συμπέρασμα είναι ότι η ετοιμότητα πρέπει να αποδεικνύεται μέσα από σεναριακή και διασυστημική λογική: ο αερισμός, η πυρανίχνευση, ο φωτισμός ασφαλείας, οι επικοινωνίες και η δομική συμπεριφορά δεν αρκεί να είναι μεμονωμένα “συμμορφωμένα”, αλλά πρέπει να τεκμηριώνεται ότι λειτουργούν συντονισμένα υπό μη κανονικές συνθήκες (Bergmeister et al., 2020; Bjelland et al., 2024).

Το τρίτο συγκριτικό μοτίβο αφορά τη θέση σε λειτουργία ως μηχανισμό ελέγχου της συστημικής συνοχής του έργου. Η βιβλιογραφία για μεγάλα σιδηροδρομικά έργα έχει δείξει ότι το κρίσιμο σημείο δεν είναι μόνο η ολοκλήρωση των επιμέρους εργασιών, αλλά η διαχείριση των αμοιβαίων εξαρτήσεων και των διεπαφών ανάμεσα σε υποδομή, ενέργεια, CCS, τηλεπικοινωνίες και επιχειρησιακές διαδικασίες (Muruganandan et al., 2022). Η ευρωπαϊκή καθοδήγηση για το CCS TSI επιβεβαιώνει, στο επίπεδο της κανονιστικής εφαρμογής, ότι η Διαλειτουργικότητα ETCS προϋποθέτει όχι μόνο τυπική συμμόρφωση αλλά και συμβατότητα συστήματος, τεχνική συμβατότητα και ασφαλής ενσωμάτωση του on-board με το παρατρόχιο υποσύστημα (European Union Agency for Railways [ERA], 2023). Στην ίδια λογική, δημόσια τεκμηρίωση του Rail Baltica δείχνει ότι η απαίτηση για συμμετοχή εργαστηρίων διαπιστευμένων κατά EN ISO/IEC 17025 μπορεί να ενσωματώνεται ήδη σε επίπεδο διαγωνιστικών και συμβατικών απαιτήσεων, δηλαδή πριν ακόμη από την τελική φάση λειτουργικής αποδοχής (RB Rail AS, 2025). Άρα, για το Ροδοδάφνη–Ρίο, η θέση σε λειτουργία δεν πρέπει να νοηθεί ως τυπικό τελικό στάδιο, αλλά ως το σημείο όπου αποδεικνύεται ότι η

κατάσταση as-built είναι συμβατή με την εγκεκριμένη συστημική και κανονιστική διαμόρφωση σε όλα τα κρίσιμα σημεία διεπαφής (ERA, 2023; Muruganandan et al., 2022).

Με βάση τα παραπάνω, η συγκριτική ανάλυση δεν τεκμηριώνει έναν μοναδικό “ιδανικό” ευρωπαϊκό τρόπο, αλλά αναδεικνύει τρία σταθερά επανεμφανιζόμενα χαρακτηριστικά ώριμης πρακτικής: πρώτον, η αξιοπιστία των μετρήσεων αντιμετωπίζεται ως θεμέλιο της αποδοχής· δεύτερον, η ασφάλεια σηράγγων προσεγγίζεται ως ιδιότητα ολοκληρωμένου συστήματος· και, τρίτον, η θέση σε λειτουργία και ο έλεγχος διαμόρφωσης λειτουργούν ως η κρίσιμη γέφυρα μεταξύ κατασκευής και ασφαλούς επιχειρησιακής ένταξης. Υπό αυτή την έννοια, η διεθνής σύγκριση είναι χρήσιμη όχι επειδή παρέχει έτοιμα πρότυπα μεταφοράς, αλλά επειδή επιτρέπει να αξιολογηθεί το Ροδοδάφνη–Ρίο ως προς το κατά πόσο διαθέτει επαρκή αρχιτεκτονική τεκμηρίωσης, διακυβέρνηση διεπαφών και λογική ολοκληρωμένη επικύρωση (Bjelland et al., 2024; Cerezo-Narváez et al., 2020; Muruganandan et al., 2022; Panagiotidou et al., 2025).

4.9 Αποτελέσματα της Μελέτης Περίπτωσης

Τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης, όπως προέκυψαν από τις Ενότητες 4.1 έως 4.8, καταδεικνύουν ότι το έργο Ροδοδάφνη–Ρίο δεν μπορεί να ερμηνευθεί ούτε να αξιολογηθεί ως ένα απλό άθροισμα επιμέρους τεχνικών παρεμβάσεων. Όπως τεκμηριώθηκε στην Ενότητα 4.1, το συμβατικό αντικείμενο συγκροτεί ένα σύνθετο σιδηροδρομικό σύστημα, στο οποίο σταθμοί και στάσεις, υποδομή και επιδομή, ηλεκτροκίνηση, σηματοδότηση και τηλεδιοίκηση, ETCS, τηλεπικοινωνίες και ηλεκτρομηχανολογικές εγκαταστάσεις της σήραγγας Παναγοπούλας λειτουργούν ως αλληλοεξαρτώμενα υποσυστήματα. Η ανάλυση αυτή οδήγησε στο πρώτο βασικό αποτέλεσμα της μελέτης: ότι η τεχνική αποδοχή του έργου δεν μπορεί να βασιστεί σε αποσπασματικούς ελέγχους ανά κλάδο, αλλά απαιτεί τεκμηριωμένη αντιμετώπιση των διεπαφών μεταξύ των υποσυστημάτων.

Η διαπίστωση αυτή ενισχύθηκε στην Ενότητα 4.2, όπου η ανάλυση ανά υποσύστημα και διεπαφή ανέδειξε ότι η λογική του έργου είναι κατεξοχήν εξαρτησιακή. Η ολοκλήρωση των έργων πολιτικού μηχανικού προηγείται της εγκατάστασης κρίσιμων Η/Μ και τηλεπικοινωνιακών στοιχείων, η ετοιμότητα της γραμμής προηγείται της σηματοδότησης και του ETCS, ενώ η επιχειρησιακή ενεργοποίηση της σήραγγας εξαρτάται από τη συντονισμένη διαθεσιμότητα δομικών, ενεργειακών, τηλεπικοινωνιακών και συστημάτων ελέγχου. Το δεύτερο, συνεπώς, βασικό αποτέλεσμα είναι ότι η συμμόρφωση και η αποδοχή του έργου δεν τεκμηριώνονται κυρίως στο επίπεδο του μεμονωμένου υποσυστήματος, αλλά στα σημεία όπου

η ετοιμότητα του ενός αποτελεί τεχνική προϋπόθεση για την αποδοχή του άλλου. Η μελέτη δείχνει ότι οι διεπαφές αποτελούν το κυριότερο σημείο παραγωγής κινδύνου, αλλά και το σημαντικότερο πεδίο όπου πρέπει να εστιάζεται η διακυβέρνηση της ποιότητας.

Στην Ενότητα 4.3, η «στοίβα απαιτήσεων» κατέδειξε ότι το έργο διέπεται από πολυεπίπεδο κανονιστικό και τεχνικό πλαίσιο. Το ISO/IEC 17025 ρυθμίζει την αξιοπιστία των αποδεικτικών στοιχείων δοκιμών, τα πρότυπα EN και ASTM ρυθμίζουν τις μεθόδους ελέγχου υλικών, τα Ευρωπαϊκά καθορίζουν τις απαιτήσεις δομικού σχεδιασμού, ενώ οι Τεχνικές Προδιαγραφές Διαλειτουργικότητας και τα τεχνικά πλαίσια του ERTMS/ETCS καθορίζουν τις απαιτήσεις ασφάλειας και λειτουργικής ενσωμάτωσης. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε το τρίτο βασικό αποτέλεσμα: ότι η συμμόρφωση στο Ροδοδάφνη-Ρίο δεν είναι μονοδιάστατη. Δεν αρκεί η συμμόρφωση ενός υλικού προς μια τεχνική προδιαγραφή ή ενός υποσυστήματος προς ένα πρότυπο εγκατάστασης. Απαιτείται ταυτόχρονη ευθυγράμμιση σχεδιασμού, ελέγχων υλικών, τεκμηρίωσης, δοκιμών ενσωμάτωσης και αποδείξεων επιχειρησιακής ετοιμότητας.

Η Ενότητα 4.4 παρήγαγε ένα ακόμη κρίσιμο αποτέλεσμα, διαμορφώνοντας το μοντέλο αποδεικτικών στοιχείων για τη διασφάλιση ποιότητας και την αποδοχή. Η ανάλυση αυτή έδειξε ότι, σε έργο αυτού του τύπου, η αποδοχή δεν μπορεί να θεωρηθεί επαρκώς τεκμηριωμένη αν δεν υποστηρίζεται από πέντε αλληλένδετες κατηγορίες αποδείξεων: εγκεκριμένη βάση σχεδιασμού, αρχεία διασφάλισης ποιότητας κατασκευής, εργαστηριακή επαλήθευση υλικών, στοιχεία θέσης σε λειτουργία και τεκμηρίωση διαμόρφωσης/as-built. Επομένως, το τέταρτο βασικό αποτέλεσμα της μελέτης είναι ότι η τεχνική και κανονιστική υπερασπισιμότητα του έργου εξαρτάται από τη συνοχή αυτής της αλυσίδας αποδεικτικών στοιχείων και όχι από μεμονωμένα πιστοποιητικά ή εκθέσεις δοκιμών.

Η Ενότητα 4.5, με επίκεντρο τη σήραγγα Παναγοπούλας, ανέδειξε τον χώρο της σήραγγας ως το υποσύστημα με τη μεγαλύτερη πυκνότητα απαιτήσεων διασφάλισης. Η δομική ακεραιότητα, η πυραντίσταση, ο αερισμός, ο φωτισμός ασφαλείας, η ανίχνευση πυρκαγιάς, οι επικοινωνίες έκτακτης ανάγκης, η διασύνδεση με ηλεκτροκίνηση, σηματοδότηση και ETCS και η λογική ολοκληρωμένων δοκιμών σεναρίων αποτυπώνουν ότι η σήραγγα δεν είναι απλώς τεχνικό έργο πολιτικού μηχανικού, αλλά πολυεπίπεδο σύστημα ασφάλειας. Το πέμπτο βασικό αποτέλεσμα της μελέτης είναι, επομένως, ότι τα υψηλότερα σημεία κινδύνου για την αποδοχή του έργου εντοπίζονται στη σήραγγα, και ειδικότερα στις διεπαφές μεταξύ δομικής επάρκειας, ενεργής πυροπροστασίας, τηλεπικοινωνιακής ανθεκτικότητας και επιχειρησιακής ετοιμότητας υπό συνθήκες έκτακτης ανάγκης.

Στην Ενότητα 4.6 αποδείχθηκε ότι το ISO/IEC 17025 αποκτά ουσιαστική σημασία όχι ως αφηρημένο πρότυπο διαπίστευσης, αλλά ως αρχιτεκτονική ελέγχου της αξιοπιστίας των δεδομένων που συνοδεύουν την αποδοχή του έργου. Από τη σχετική ανάλυση προέκυψε ότι οι απαιτήσεις αμεροληψίας, επάρκειας πόρων, ελέγχου διεργασιών και συστήματος διαχείρισης επηρεάζουν άμεσα τη θεσμική ισχύ και την τεχνική αξιοπιστία των δοκιμών που στηρίζουν την αποδοχή σκυροδέματος, γεωτεχνικών στρώσεων και αδρανών. Το έκτο αποτέλεσμα της μελέτης είναι συνεπώς ότι η ποιότητα των αποφάσεων αποδοχής εξαρτάται όχι μόνο από το αποτέλεσμα μιας δοκιμής, αλλά από την αξιοπιστία του ίδιου του μηχανισμού παραγωγής του αποτελέσματος.

Η Ενότητα 4.7 έδειξε ότι οι σταθμοί και οι στάσεις, παρότι λιγότερο σύνθετοι από τη σήραγγα, δεν αποτελούν δευτερεύον υποσύστημα. Αντίθετα, κτίρια, αποβάθρες, στέγαστρα και περιβάλλοντες χώροι συνδέονται με δομικές απαιτήσεις, απαιτήσεις προσβασιμότητας, γεωμετρίας, αποστράγγισης και διεπαφών με επιδομή, ηλεκτροκίνηση και σηματοδότηση. Από την ενότητα αυτή προκύπτει το έβδομο αποτέλεσμα της μελέτης: ότι η διασφάλιση σταθμών και στάσεων πρέπει να αντιμετωπίζεται ως αυτόνομο πεδίο ασφάλειας και επιχειρησιακής ετοιμότητας και όχι ως συμπληρωματικό αρχιτεκτονικό αντικείμενο.

Τέλος, η Ενότητα 4.8, μέσα από τη σύγκριση με ευρωπαϊκές περιπτώσεις όπως το Crossrail, το Gotthard Base Tunnel, το Brenner Base Tunnel, το Lyon–Turin, το Fehmarnbelt και το Rail Baltica, κατέδειξε ότι τα ώριμα έργα υψηλής κρισιμότητας συγκλίνουν σε τρεις βασικές αρχές: μετρήσιμη και ελέγξιμη διακυβέρνηση ποιότητας, ολοκληρωμένη διασφάλιση ασφάλειας με βάση σενάρια λειτουργίας και πειθαρχημένη θέση σε λειτουργία με ισχυρό έλεγχο διαμόρφωσης. Το όγδοο αποτέλεσμα της μελέτης είναι ότι το έργο Ροδοδάφνη–Ρίο μπορεί να ερμηνευθεί και να βελτιωθεί ουσιαστικά μόνο αν ιδωθεί υπό αυτό το διεθνές πρίσμα, δηλαδή ως έργο στο οποίο η αξιοπιστία των μετρήσεων, η διαχείριση διεπαφών και η τεκμηριωμένη θέση σε λειτουργία αποτελούν θεμελιώδεις όρους ασφάλειας, ανθεκτικότητας και διαλειτουργικότητας.

Η θεμελίωση αυτή προετοιμάζει το Κεφάλαιο 5 για την ερμηνεία του τρόπου με τον οποίο οι ρήτρες ελέγχου βάσει προτύπου, η διακυβέρνηση διεπαφών και η πειθαρχία θέσης σε λειτουργία διαμορφώνουν αξιόπιστες αποφάσεις αποδοχής, καθώς και για την εξαγωγή προτάσεων βελτίωσης ευθυγραμμισμένων με διεθνείς βέλτιστες πρακτικές (ISO, 2017; ILAC, 2023).

5 Συμπεράσματα

5.1 Συζήτηση

Η αναλυτική ανασύνθεση του τμήματος Ροδοδάφη–Ρίο καταδεικνύει ότι η οργάνωση και η διαχείριση μηχανισμών δοκιμών και διασφάλισης σε σύνθετο σιδηροδρομικό έργο δεν μπορούν να αξιολογηθούν μέσω απομονωμένων τεχνικών ελέγχων συμμόρφωσης. Η αποτελεσματικότητα αναδύεται από την αλληλεπίδραση κανονιστικών πλαισίων, όπως ISO/IEC 17025, πρότυπα EN, Ευρωκώδικες και Τεχνικές Προδιαγραφές Διαλειτουργικότητας, με τις διεπαφές υποσυστημάτων και τις δομές διακυβέρνησης αποδεικτικών στοιχείων. Τα ευρήματα επιβεβαιώνουν ότι σε περιβάλλοντα υψηλής κρισιμότητας, και ιδίως στη σήραγγα Παναγοπούλας, η διασφάλιση ποιότητας λειτουργεί ως συστημική λειτουργία και όχι ως απομονωμένη εργαστηριακή διαδικασία.

Σε θεωρητικό επίπεδο, το ISO/IEC 17025 παρέχει την αρχιτεκτονική αξιοπιστίας για την επαλήθευση υλικών και τη μετρολογική εγκυρότητα (ISO, 2017). Ωστόσο, η ανάλυση δείχνει ότι η τυπική συμμόρφωση με ρήτρες δεν αρκεί για διασφάλιση σε επίπεδο έργου. Η αμεροληψία αποκτά αξία μόνο όταν ενσωματώνεται στη διακυβέρνηση έργου. Η επάρκεια πόρων και η ιχνηλασιμότητα καθίστανται κρίσιμες όταν η δομική ακεραιότητα εξαρτάται από αντοχές σκυροδέματος και σταθερότητα στρώσεων έδρασης. Ο έλεγχος διεργασιών αποκτά ιδιαίτερη σημασία στα σημεία διεπαφής, ενώ η διαχείριση κινδύνου και διορθωτικών ενεργειών ενισχύει την ανθεκτικότητα κατά τις εντατικές φάσεις κατασκευής.

Η εμπειρική λογική της περίπτωσης δείχνει ότι η σήραγγα Παναγοπούλας συγκεντρώνει τη μεγαλύτερη πυκνότητα διασφάλισης. Οι απαιτήσεις ανθεκτικότητας και πυραντοχής διασταυρώνονται με τις λειτουργίες ασφάλειας της SRT TSI (CEN, 2004; ERA, 2019). Η αποδοχή πρέπει να αποδεικνύει ολοκληρωμένη επιχειρησιακή ετοιμότητα και όχι μόνο συμμόρφωση αντοχής. Η ενεργοποίηση αερισμού, οι αλυσίδες ανίχνευσης και η ανθεκτικότητα τηλεπικοινωνιών επιβεβαιώνουν ότι η ασφάλεια σήραγγας δεν μπορεί να αναλυθεί σε απομονωμένα τεχνικά πεδία.

Δεύτερο κρίσιμο εύρημα αφορά τη διακυβέρνηση διεπαφών. Τα σημεία υψηλού κινδύνου εντοπίζονται στα όρια εξάρτησης μεταξύ υποσυστημάτων. Η ιχνηλασιμότητα και ο έλεγχος διαμόρφωσης λειτουργούν ως δομικές δικλίδες ασφάλειας για διαλειτουργικότητα και ακεραιότητα κύκλου ζωής.

Η διεθνής συγκριτική ανάλυση ενισχύει το συμπέρασμα ότι η ετοιμότητα ελέγχου, η πειθαρχημένη θέση σε λειτουργία και η ολοκληρωμένη επικύρωση ασφάλειας αποτελούν βέλτιστη πρακτική (ERA, n.d.; ILAC, 2023). Όταν το ISO/IEC 17025 εφαρμόζεται ως μηχανισμός διακυβέρνησης αποδεικτικών στοιχείων σε επίπεδο έργου, ενισχύεται η αξιοπιστία αποφάσεων αποδοχής.

Η αποτελεσματική οργάνωση δοκιμών και διασφάλισης σε έργα σιδηροδρομικής υποδομής εδράζεται σε τρεις αλληλοεξαρτώμενους πυλώνες: κανονιστική ευθυγράμμιση με διεθνή πρότυπα, πειθαρχημένη παραγωγή και διατήρηση αποδεικτικών στοιχείων και ισχυρή διακυβέρνηση διεπαφών. Η σήραγγα Παναγοπούλας αποτυπώνει πώς ο δομικός σχεδιασμός, η επαλήθευση υλικών, τα Η/Μ συστήματα ασφάλειας και οι τηλεπικοινωνίες συγκροτούν ενιαίο πλαίσιο ασφάλειας. Κατά συνέπεια, η εργαστηριακή διακυβέρνηση, η πειθαρχία θέσης σε λειτουργία και ο έλεγχος διαμόρφωσης δεν αποτελούν περιφερειακές διοικητικές λειτουργίες αλλά κεντρικούς καθοριστικούς παράγοντες ασφάλειας, ανθεκτικότητας και λειτουργικής αξιοπιστίας της υποδομής.

5.2 Κρίσιμοι Παράγοντες Επιτυχίας

Η ανάλυση του σιδηροδρομικού τμήματος Ροδοδάφνη–Ρίο, και ιδίως του υποσυστήματος της σήραγγας Παναγοπούλας, καταδεικνύει ότι η αξιοπιστία της υποδομής δεν αποτελεί προϊόν μεμονωμένης τεχνικής επάρκειας, αλλά αποτέλεσμα συντονισμένων οργανωτικών, τεχνικών και διοικητικών συνθηκών. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο, αξιοπιστία σημαίνει διαρκής ικανότητα της υποδομής να λειτουργεί με ασφάλεια και προβλεψιμότητα υπό κανονικές και έκτακτες συνθήκες. Τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι οι κρίσιμοι παράγοντες επιτυχίας συγκεντρώνονται σε τρεις αλληλοεξαρτώμενους τομείς: δομή οργάνωσης και διαχείρισης, τεχνική επάρκεια και συστημική διοικητική πειθαρχία.

Σε οργανωτικό επίπεδο, η σαφήνεια ρόλων και η ανεξαρτησία των λειτουργιών επαλήθευσης αναδεικνύονται ως καθοριστικοί παράγοντες. Σε έργα υψηλής κρισιμότητας, η παραγωγή αποδεικτικών στοιχείων αποδοχής πρέπει να διαχωρίζεται δομικά από τις πιέσεις παραγωγής. Το ISO/IEC 17025 αναδεικνύει την αμεροληψία και την αναγνώριση κινδύνων ως θεμελιώδεις αρχές για αξιόπιστη δοκιμή και αναφορά (ISO, 2017). Στο σιδηροδρομικό περιβάλλον, η αρχή αυτή μεταφράζεται σε σαφώς ορισμένες γραμμές αρμοδιότητας για εργαστήρια, επιθεωρητές και ομάδες θέσης σε λειτουργία. Η ασάφεια στις δομές αναφοράς ή η σύγχυση μεταξύ εκτέλεσης και επαλήθευσης αυξάνει τον κίνδυνο αλλοίωσης στοιχείων και καθυστερημένης

ανίχνευσης αστοχιών. Η χαρτογράφηση οργανωτικής δομής, οι θεσμοθετημένοι διάλογοι επικοινωνίας και οι τεκμηριωμένες διαδικασίες κλιμάκωσης αποτελούν βασικούς μοχλούς αξιοπιστίας.

Οι τεχνικοί παράγοντες συγκροτούν τη δεύτερη κατηγορία επιτυχίας. Η αξιοπιστία εξαρτάται από τη συμμόρφωση υλικών, την ιχνηλασιμότητα διακριβώσεων και τη διαλειτουργικότητα υποσυστημάτων. Η ανθεκτικότητα αποβαθρών και επενδύσεων σήραγγας βασίζεται σε σκυρόδεμα επαληθευμένο κατά EN 206 και συναφή πρότυπα (BSI, 2021). Η σταθερότητα στρώσεων έδρασης εξαρτάται από επικυρωμένα αποτελέσματα συμπίκνωσης και ταξινόμησης εδαφών. Στη σήραγγα Παναγοπούλας, τα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα ασφάλειας πρέπει να λειτουργούν συνεκτικά σύμφωνα με την SRT TSI (ERA, 2019). Η τεχνική επάρκεια προϋποθέτει διακριβωμένο εξοπλισμό, εξουσιοδοτημένο προσωπικό και επικυρωμένες μεθόδους. Η μετρολογική πειθαρχία και ο έλεγχος μεθόδων αποτελούν δομικούς παράγοντες ακεραιότητας του συστήματος και όχι απλές διοικητικές διαδικασίες.

Οι διοικητικοί παράγοντες συνιστούν τον τρίτο τομέα επιτυχίας και συνδέονται με την προσέγγιση βάσει κινδύνου, τον έλεγχο τεκμηρίωσης και την πειθαρχία θέσης σε λειτουργία. Το ISO/IEC 17025 ενσωματώνει τη λογική πρόληψης μέσω έγκαιρης αναγνώρισης απειλών για την εγκυρότητα αποτελεσμάτων (ISO, 2017). Στο έργο, η λογική αυτή επεκτείνεται σε κινδύνους διεπαφών, όπως ελλιπής συντονισμός μεταξύ πολιτικών και Η/Μ εργασιών ή καθυστερημένες διορθωτικές ενέργειες. Τα αποτελεσματικά συστήματα διαχείρισης εφαρμόζουν εσωτερικούς ελέγχους, παρακολούθηση διορθωτικών ενεργειών και έλεγχο διαμόρφωσης ώστε η κατάσταση as-built να ταυτίζεται με την εγκεκριμένη μελέτη. Στη σήραγγα, η ολοκληρωμένη θέση σε λειτουργία και η επικύρωση βάσει σεναρίων ενισχύουν την αξιοπιστία αποδεικνύοντας συντονισμένη συμπεριφορά υποσυστημάτων υπό μη κανονικές συνθήκες (ERA, 2019).

Συνολικά, η αξιοπιστία στο έργο Ροδοδάφνη-Ρίο στηρίζεται σε τρεις αλληλοενισχυόμενους πυλώνες: οργανωτική ανεξαρτησία και σαφήνεια, τεχνική επάρκεια και ιχνηλασιμότητα, και διοικητική πειθαρχία με επίγνωση κινδύνου και έλεγχο τεκμηρίωσης. Η αποδυνάμωση οποιασδήποτε διάστασης υπονομεύει τη συνολική τεκμηρίωση ασφάλειας. Αντίθετα, όταν οι τρεις πυλώνες λειτουργούν συνεκτικά, η αξιοπιστία της υποδομής μετατρέπεται σε μετρήσιμο και αξιόπιστο αποτέλεσμα και όχι σε απλή παραδοχή.

5.3 Επιπτώσεις στη Διασφάλιση Ποιότητας Υποδομών

Τα ευρήματα της παρούσας έρευνας καταδεικνύουν ότι η οργάνωση και η διαχείριση των συστημάτων δοκιμών, επαλήθευσης και θέσης σε λειτουργία ασκούν άμεση και μετρήσιμη επίδραση στην ασφάλεια των σιδηροδρόμων και στη διάρκεια ζωής της υποδομής. Στο τμήμα Ροδοδάφνη-Ρίο, και ιδίως στη σήραγγα Παναγοπούλας, η διασφάλιση ποιότητας λειτουργεί ως ο συνδετικός μηχανισμός μεταξύ μελετητικής πρόθεσης, κατασκευαστικής υλοποίησης και μακροχρόνιας λειτουργικής αξιοπιστίας. Όταν η διακυβέρνηση αποδεικτικών στοιχείων είναι ισχυρή, η ασφάλεια και η ανθεκτικότητα αποτελούν σχεδιασμένα αποτελέσματα και όχι εκ των υστέρων παραδοχές.

Η ασφάλεια των σιδηροδρόμων είναι εγγενώς συστημική. Το ευρωπαϊκό κανονιστικό πλαίσιο αντιμετωπίζει τα υποσυστήματα υποδομής, ενέργειας και ελέγχου-διοίκησης ως διαλειτουργικά στοιχεία των οποίων η ασφαλής ενσωμάτωση πρέπει να αποδεικνύεται πριν από την έναρξη λειτουργίας (ERA, n.d.). Στο πλαίσιο αυτό, η διασφάλιση ποιότητας αποτελεί τον αποδεικτικό κορμό της έγκρισης ασφάλειας. Η επαληθευμένη επίδοση σκυροδέματος κατά EN 206 και Ευρωκώδικα 2 διασφαλίζει τη δομική ανθεκτικότητα αποβαθρών και επενδύσεων σήραγγας υπό λειτουργικά και έκτακτα φορτία (CEN, 2004; BSI, 2021). Η αξιόπιστη συμπύκνωση στρώσεων έδρασης προστατεύει τη σταθερότητα γεωμετρίας γραμμής και μειώνει τον κίνδυνο μελλοντικών καθιζήσεων. Στη σήραγγα, η τεκμηριωμένη θέση σε λειτουργία συστημάτων αερισμού, πυρανίχνευσης και φωτισμού έκτακτης ανάγκης σύμφωνα με την SRT TSI υποστηρίζει άμεσα την προστασία ζωής σε μη κανονικά συμβάντα (ERA, 2019). Τα στοιχεία αποδοχής, συνεπώς, θεμελιώνουν την ασφαλή ένταξη σε λειτουργία.

Η ανθεκτικότητα κύκλου ζωής εξαρτάται επίσης από πειθαρχημένη διασφάλιση ποιότητας. Οι κατηγορίες ανθεκτικότητας, ο έλεγχος ωρίμανσης και η διακριβωμένη επαλήθευση υλικών μειώνουν την πιθανότητα πρόωρης φθοράς ή ρηγματώσεως. Η ιχνηλάσιμη τεκμηρίωση και ο έλεγχος διαμόρφωσης διασφαλίζουν ότι οι επεμβάσεις συντήρησης βασίζονται σε αξιόπιστα as-built δεδομένα. Όπου το ISO/IEC 17025 διέπει τις δοκιμές, η ιχνηλασιμότητα μετρήσεων και η τεκμηρίωση επάρκειας ενισχύουν την εμπιστοσύνη στα δομικά και γεωτεχνικά δεδομένα που υποστηρίζουν τον προγραμματισμό συντήρησης (ISO, 2017).

Συνεπώς, η διασφάλιση ποιότητας σε μεγάλης κλίμακας σιδηροδρομικά έργα δεν περιορίζεται σε τεκμηρίωση συμμόρφωσης, αλλά λειτουργεί ως μηχανισμός μετριασμού κινδύνου που συνδέει τεχνικά πρότυπα, πειθαρχία θέσης σε λειτουργία και λογική safety case. Στην

περίπτωση Ροδοδάφνη–Ρίο, οι σημαντικότερες επιπτώσεις εντοπίζονται στα σημεία διεπαφής, όπου η αποτυχία επαλήθευσης ή τεκμηρίωσης θα μπορούσε να διαχυθεί συστημικά. Όταν η διακυβέρνηση δοκιμών, η επικύρωση θέσης σε λειτουργία και η συμμόρφωση διαλειτουργικότητας λειτουργούν συνεκτικά, ενισχύονται ταυτόχρονα η ασφάλεια και η ανθεκτικότητα κύκλου ζωής. Η διασφάλιση ποιότητας αναδεικνύεται έτσι σε κεντρικό καθοριστικό παράγοντα αξιοπιστίας υποδομής και δημόσιας ασφάλειας.

5.4 Προτάσεις για Βέλτιστες Πρακτικές

Με βάση τα αναλυτικά ευρήματα της περίπτωσης Ροδοδάφνη–Ρίο, διατυπώνονται συγκεκριμένες προτάσεις ενίσχυσης της διασφάλισης ποιότητας και της οργάνωσης και ελέγχου δοκιμών σε μεγάλης κλίμακας σιδηροδρομικά έργα και έργα σηράγγων.

Πρώτον, οι λειτουργίες δοκιμών και αποδοχής πρέπει να ενσωματώνονται δομικά στη διακυβέρνηση έργου ήδη από τη φάση μελέτης και όχι να αντιμετωπίζονται ως εκ των υστέρων μηχανισμοί επαλήθευσης. Η έγκαιρη ευθυγράμμιση μεταξύ μελετητικών παραδοχών, όπως κατηγορίες ανθεκτικότητας και σενάρια πυραντοχής, και πρωτοκόλλων εργαστηριακής επαλήθευσης διασφαλίζει τεχνικά συνεκτικά και ελέγξιμα κριτήρια αποδοχής. Η ευθυγράμμιση αυτή πρέπει να αποτυπώνεται σε ειδικά Σχέδια Ποιότητας Έργου που συνδέουν παραμέτρους σχεδιασμού βάσει Ευρωκωδίκων, πρότυπα υλικών EN και διαδικασίες δοκιμών ελεγχόμενες κατά ISO/IEC 17025 (ISO, 2017).

Δεύτερον, η διαχείριση διεπαφών πρέπει να αναβαθμιστεί σε αυτοτελή πειθαρχία διασφάλισης. Τα υποσυστήματα πολιτικού μηχανικού, ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων, σηματοδότησης και τηλεπικοινωνιών οφείλουν να διέπονται από τεκμηριωμένα Έγγραφα Ελέγχου Διεπαφών και δομημένους πίνακες εξαρτήσεων. Σε περιβάλλοντα σηράγγων όπως η Παναγοπούλα, οι ολοκληρωμένες πρόβες θέσης σε λειτουργία με προσομοιώσεις σεναρίων ασφάλειας πρέπει να αποτελούν υποχρεωτικό στάδιο, ευθυγραμμισμένο με τις απαιτήσεις της SRT TSI (ERA, 2019).

Τρίτον, η διακυβέρνηση εργαστηρίων πρέπει να ενισχυθεί μέσω προηγμένων μηχανισμών ιχνηλασιμότητας. Η υιοθέτηση κεντροποιημένων ψηφιακών συστημάτων ελέγχου εγγράφων για εκθέσεις δοκιμών, πιστοποιητικά διακρίβωσης και αρχεία αποκλίσεων ενισχύει τη διαφάνεια και την ετοιμότητα ελέγχου. Η παρακολούθηση διορθωτικών ενεργειών πρέπει να συνδέεται συστηματικά με μητρώα κινδύνων, ώστε επαναλαμβανόμενες μη συμμορφώσεις να αντιμετωπίζονται ως συστημικές αδυναμίες και όχι ως μεμονωμένα συμβάντα.

Τέλος, η πειθαρχία θέσης σε λειτουργία πρέπει να ενισχυθεί μέσω δομημένων πρωτοκόλλων επικύρωσης που αποδεικνύουν ρητά την αλληλεξάρτηση υποσυστημάτων, ιδίως μεταξύ τηλεπικοινωνιών, σηματοδότησης και συστημάτων ασφάλειας σηράγγων. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι η επιχειρησιακή ετοιμότητα αποδεικνύεται μέσω ολοκληρωμένης λειτουργικότητας και όχι μέσω αποσπασματικής τεκμηρίωσης συμμόρφωσης.

5.5 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στον ψηφιακό μετασχηματισμό της διασφάλισης ποιότητας και της οργάνωσης εργαστηρίων σε έργα σιδηροδρομικής υποδομής. Η ενσωμάτωση της Πληροφοριακής Μοντελοποίησης Κτιρίου με συστήματα διαχείρισης εργαστηριακών δεδομένων αποτελεί ιδιαίτερα υποσχόμενο πεδίο, καθώς επιτρέπει ιχνηλάσιμη σύνδεση μεταξύ στοιχείων μελέτης, αποτελεσμάτων δοκιμών υλικών και τεκμηρίωσης όπως κατασκευάστηκε. Η ενσωμάτωση δεδομένων δοκιμών που διενεργούνται υπό έλεγχο κατά το πρότυπο ISO/IEC 17025 απευθείας σε ψηφιακά περιβάλλοντα μοντελοποίησης μπορεί να ενισχύσει τη διαφάνεια σε όλο τον κύκλο ζωής του έργου και να βελτιώσει τον στρατηγικό και προληπτικό προγραμματισμό συντήρησης.

Επιπλέον, οι εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης στη διασφάλιση ποιότητας εργαστηρίων απαιτούν συστηματική διερεύνηση. Μοντέλα μηχανικής μάθησης μπορούν να υποστηρίξουν την ανίχνευση ανωμαλιών σε πρότυπα αποτελεσμάτων δοκιμών, την έγκαιρη αναγνώριση συσσωρεύσεων μη συμμορφώσεων και την προγνωστική ανάλυση κινδύνου αποκλίσεων επιδόσεων υλικών. Παράλληλα, προγνωστικά μοντέλα διακρίβωσης βασισμένα σε δεδομένα χρήσης εξοπλισμού και περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν να βελτιστοποιήσουν τα διαστήματα διακρίβωσης, ενισχύοντας τη μετρολογική αξιοπιστία και περιορίζοντας τον χρόνο εκτός λειτουργίας.

Τέλος, απαιτείται περαιτέρω έρευνα σε ολοκληρωμένα ψηφιακά πλαίσια θέσης σε λειτουργία για περιβάλλοντα σηράγγων υψηλής κρισιμότητας, τα οποία θα συνδυάζουν δεδομένα αισθητήρων, εργαλεία προσομοίωσης και πρωτόκολλα επικύρωσης διαλειτουργικότητας. Μια τέτοια κατεύθυνση θα μετατοπίσει τη διασφάλιση ποιότητας από προσέγγιση συμμόρφωσης σε προληπτική, διαχείριση αξιοπιστίας υποδομών με βάση μετρήσιμα δεδομένα, ευθυγραμμισμένη με τις εξελισσόμενες ευρωπαϊκές στρατηγικές ασφάλειας και ψηφιοποίησης σιδηροδρόμων (ISO, 2017; ERA, n.d.).

Βιβλιογραφία

- Adaran, T., Jenrola, O., Jegede, F., Ojo, O., Bakare, A., Omiyale, O., Sanni, O. F., Aliu, O. A., & Owolabi, B. O. (2025). Quality Management Systems implementation in public medical laboratories; A sustainable approach to health system strengthening in Lagos State, Nigeria. *PLOS ONE*, 20(6), e0319409. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319409>
- Alomair, A., Alfayez, M., Abuhaimed, M., & Alrabeh, M. (2025). Impact of SAAC accreditation on laboratories in Saudi Arabia according to ISO/IEC 17025:2017. *Scientific Reports*, 15, Article 30089. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30089-z>
- Aqidawati, E. F., Sutopo, W., & Zakaria, R. (2019). Model to measure the readiness of university testing laboratories to fulfill ISO/IEC 17025 requirements (a case study). *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 5(1), Article 2. <https://doi.org/10.3390/joitmc5010002>
- ASTM International. (2014). *ASTM C39/C39M: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*.
- ASTM International. (2018). *ASTM D4318: Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*.
- ASTM International. (2021). *ASTM D698: Standard test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort*.
- ASTM International. (2022). *ASTM D6927: Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures*.
- ASTM International. (2024a). *ASTM C39/C39M-24: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International.
- ASTM International. (2024b). *ASTM C143/C143M-20: Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete*. ASTM International.
- ASTM International. (2024c). *ASTM C231/C231M-22: Standard test method for air content of freshly mixed concrete by the pressure method*. ASTM International.
- ASTM International. (2024d). *ASTM C138/C138M-23: Standard test method for density (unit weight), yield, and air content (gravimetric) of concrete*. ASTM International.
- ASTM International. (2025). *ASTM C172/C172M: Standard practice for sampling freshly mixed concrete*. ASTM International.
- ASTM International. (n.d.). About ASTM. <https://www.astm.org/about>

- Bęczkowska, S., & Grabarek, I. (2024). Accessible transportation: Universal or inclusive design? *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 125, 57-71.
- Bell, S. (2013). *A beginner's guide to uncertainty of measurement* (Measurement Good Practice Guide No. 11, Issue 2). National Physical Laboratory.
- Bergmeister, K., Brunello, P., Pachera, M., Pesavento, F., & Schrefler, B. A. (2020). Simulation of fire and structural response in the Brenner Base Tunnel by means of a combined approach: A case study. *Engineering Structures*, 211, 110319. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110319>
- Bjelland, H., Gehandler, J., Meacham, B., Carvel, R., Torero, J. L., Ingason, H., & Njå, O. (2024). Tunnel fire safety management and systems thinking: Adapting engineering practice through regulations and education. *Fire Safety Journal*, 146, 104140. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104140>
- Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27–40.
- British Standards Institution. (2019a). *BS EN 933 and BS EN 1097 series: Tests for geometrical and mechanical properties of aggregates*.
- British Standards Institution. (2019b). *BS EN 12390-3: Testing hardened concrete—Compressive strength of test specimens*.
- British Standards Institution. (2021). *BS EN 206:2013+A2:2021: Concrete. Specification, performance, production and conformity*. BSI.
- British Standards Institution. (n.d.-a). *BS EN 12697: Bituminous mixtures—Test methods*.
- British Standards Institution. (n.d.-b). *BS EN 13108: Bituminous mixtures—Material specifications*.
- British Standards Institution. (n.d.-c). *BS EN ISO 17892: Geotechnical investigation and testing—Laboratory testing of soil*.
- Castañeda Valdés, A., Torres-Acosta, A. A., Martínez-Madrid, M., Pérez-Quiroz, J. T., & Castro-Borges, P. (2024). Durability requirements for reinforced concrete structures in coastal environments with extreme atmospheric corrosivity. *Buildings*, 14(8), 2494. <https://doi.org/10.3390/buildings14082494>
- CEN. (2004). *EN 1992: Eurocode 2—Design of concrete structures*.
- CEN. (2009). *EN 12591: Bitumen and bituminous binders—Specifications for paving grade bitumens*.

- CEN. (2017). *EN 13108 and EN 12697 series: Bituminous mixtures*.
- CEN. (2018). *EN ISO 17892 series: Geotechnical investigation and testing—Laboratory testing of soil*.
- CEN. (2020). *EN 1097-2: Tests for mechanical and physical properties of aggregates—Methods for the determination of resistance to fragmentation*.
- CEN-CENELEC. (n.d.). European standards. <https://www.cencenelec.eu/european-standardization/european-standards/>
- Cerezo-Narváez, A., Pastor-Fernández, A., Otero-Mateo, M., & Ballesteros-Pérez, P. (2020). Integration of cost and work breakdown structures in the management of construction projects. *Applied Sciences*, 10(4), 1386. <https://doi.org/10.3390/app10041386>
- Ceylan, M., & Cansız, S. (2022). Effect of ISO 17025 standard on quality management system in accredited civil engineering laboratories. *SSD Journal*, 7(33), 488–499. <https://doi.org/10.31567/ssd.687>
- Crossrail Ltd. (2016a, February 26). *Performance assurance overview*. Crossrail Learning Legacy.
- Crossrail Ltd. (2016b). *Quality*. Crossrail Learning Legacy.
- Dale, B. G. (2015). *Total quality management and operational excellence* (4th ed.). Routledge.
- de Jesus, W. S., da Silva, S. F. M., de Almeida, T. M. S., Souza, M. T., Leal, E. S., Souza, R. S., Sacramento, L. A., Allaman, I. B., & Pessôa, J. R. d. C. (2025). Comparative study of ASTM C1202 and IBRACON/NT Build 492 testing methods for assessing chloride ion penetration in concretes using different types of cement. *Buildings*, 15(3), 302. <https://doi.org/10.3390/buildings15030302>
- De La Rosa, Á., & Ruiz, G. (2025). A new approach to the study of the size and the geometry effect on compressive strength in concrete. *Results in Engineering*, 26, 104261. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104261>
- Denzin, N. K. (2012). Triangulation 2.0. *Journal of Mixed Methods Research*, 6(2), 80–88.
- Dong, S., Zhang, X., & Wang, K. (2022). Study on fire ventilation control of subway tunnel: A case study for Dalian Subway. *Sustainability*, 14(14), 8695. <https://doi.org/10.3390/su14148695>
- Ellison, S. L. R., & Williams, A. (Eds.). (2012). *Eurachem/CITAC guide: Quantifying uncertainty in analytical measurement* (3rd ed.). Eurachem.
- ERGOSE. (2023a). *Rododafni–Rio railway project description*.

- ERGOSE. (2023b). *Rododafni–Psathopyrgos infrastructure project and Panagopoula tunnel technical summary*.
- ERGOSE. (2023c). *Kiato–Rododafni electrification project documentation*.
- ERGOSE. (n.d.-a). *Rododafni–Rio (superstructure, signaling, stations)*.
- ERGOSE. (n.d.-b). *Electrification of Kiato–Rododafni section*.
- Eurachem. (2014). *The fitness for purpose of analytical methods: A laboratory guide to method validation and related topics*.
- European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency. (2026). *Psathopyrgos section of the new Athens–Patras railway line (2014-EL-TMC-0268-W)*.
- European Commission. (2018). *Public procurement guidance for practitioners on avoiding the most common errors in projects funded by the European Structural and Investment Funds*. Publications Office of the European Union. DOI: 10.2776/886010. Link: https://ec.europa.eu/regional_policy/sources/guidance/guidance_public_proc_en.pdf
- European Commission. (2021). *Trans-European Transport Network (TEN-T) policy review*.
- European Committee for Standardization. (2002). *EN 1991: Eurocode 1: Actions on structures*. CEN.
- European Committee for Standardization. (2004). *EN 1992: Eurocode 2: Design of concrete structures*. CEN.
- European Union Agency for Railways. (2019). *Technical specification for interoperability relating to safety in railway tunnels (SRT TSI)*.
- European Union Agency for Railways. (2022). *ERTMS and ETCS implementation framework*.
- European Union Agency for Railways. (2023). *Guide for the application of the CCS TSI*.
- European Union Agency for Railways. (n.d.). *Technical specifications for interoperability (TSIs)*.
- Faradika, M., & Paulina, M. (2022). Implementation of ISO/IEC 17025:2017 Quality Management System in Agricultural Product Testing Laboratories with Case Studies in Indonesia *Journal of Research Administration*, 5(2), 1269–1276. <https://doi.org/10.33369/pelastek.v2i2.40988>
- Fernández-Berrueta, N., Goya, J., Arrizabalaga, J., Moya, I., & Mendizabal, J. (2022). Railway wireless communications channel characterization. *Applied Sciences*, 12(1), 345. <https://doi.org/10.3390/app12010345>
- Flah, M., L’Hermite, E., Omary, S., & Sbartaï, Z. M. (2026). Durability-informed life cycle assessment of concrete structures exposed to chloride ingress and carbonation: A

- review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 202, 115082.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2026.115082>
- Fletcher, D. J., et al. (2023). Experiences in transitioning a testing laboratory to the new ISO/IEC 17025:2017 standard: A case from the IAEA Radiation Safety Laboratory. *Radiation Protection Dosimetry*, 199(15–16), 1670–1678.
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncac209>
- Flyvbjerg, B. (2006). Five misunderstandings about case-study research. *Qualitative Inquiry*, 12(2), 219–245.
- Folić, R., Zenunović, D., & Dokšanović, T. (2024). Effects of carbonation and chloride ingress on the durability of concrete structures. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 89(8), 1053-1079.
- Gavela, S., Karydis, G., Papadakos, G., Zois, G., & Sotiropoulou, A. (2023). Uncertainty of concrete compressive strength determination by a combination of rebound number, UPV and uniaxial compressive tests on cubical concrete samples. *Materials Today Communications*, 37, 107280.
- Geyer, A., & Davies, A. (2000). Managing project-system interfaces: Case studies of railway projects in restructured UK and German markets. *Research Policy*, 29(7-8), 991-1013.
[https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(00\)00116-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(00)00116-5)
- Gokulakrishnan, D., et al. (2024). Ensuring data integrity: Best practices and strategies in the pharmaceutical industry.
- Guirette-Barbosa, O.-A., Durán-Muñoz, H.-A., Cruz-Domínguez, O., Carrera-Escobedo, J.-L., Celaya-Padilla, J.-M., & Castañeda-Burciaga, S. (2024). Management system according to ISO/IEC 17025: Method validation. *Applied Sciences*, 14(10), 4114.
<https://doi.org/10.3390/app14104114>
- Harding, J. F., Bearfield, G., Kaewunruen, S., & Watson, G. (2024). A quantitative methodology for justification of platform edge protection systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/1748006X231221840>
- Hellenic Organization for Standardization. (n.d.). *EN 933-1: Tests for geometrical properties of aggregates—Determination of particle size distribution—Sieving method*.
- Hoyle, D. (2017). *ISO 9001:2015 quality management systems handbook* (7th ed.). Routledge.

- Hua, N., Khorasani, N. E., Tessari, A., & Ranade, R. (2022). Experimental study of fire damage to reinforced concrete tunnel slabs. *Fire Safety Journal*, *127*, 103504. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2021.103504>
- Huf, W., Mohns, M., Almeta, E., Lister, R., Buchta, C., Demyanets, S., Buchberger, W., & Ettl, B. (2024). Benchmarking medical laboratory performance on a global scale. *Frontiers in Public Health*, *12*, Article 1363957. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1363957>
- ILAC. (2023). *The value of accreditation*. International Laboratory Accreditation Cooperation. International Laboratory Accreditation Cooperation, & International Accreditation Forum. (2023). *Accreditation: Supporting the future of global trade*. DOI: none assigned. Link: https://iaf.nu/wp-content/uploads/2023/02/WAD2023-Brochure-WEB_V2.pdf
- International Organization for Standardization. (2017). ISO/IEC 17025:2017: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories. <https://www.iso.org/standard/66912.html>
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO/IEC 17025:2017 general requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. ISO. DOI: none assigned. Link: <https://www.iso.org/standard/66912.html>
- JCGM. (2008). *Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 2008)*. Joint Committee for Guides in Metrology.
- JCGM. (2012). *International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM)* (3rd ed.). Joint Committee for Guides in Metrology.
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2008). *Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008)*. BIPM. <https://doi.org/10.59161/JCGM100-2008E>
- Joint Committee for Guides in Metrology. (2012). *International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms* (3rd ed., JCGM 200:2012). BIPM.
- Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (1999). *Juran's quality handbook* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Karanikas, N., & Melis, D. (2018). The use of risk-based thinking in quality management systems. *Safety Science*, *110*, 20–28.
- Klefsjö, B., Bergquist, B., & Edgeman, R. (2006). Six sigma and total quality management: Different day, same soup? *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, *2*(2), 162–178.

- Kruger, V., & Hanlon, G. (2019). Risk-based thinking in ISO management system standards. *Quality World*, 45(2), 32–36.
- Lee, W. M., Fragomeni, S., Monckton, H., & Guerrieri, M. (2023). A review of test methods, issues and challenges of large-scale fire testing of concrete tunnel linings. *Construction and Building Materials*, 392, 131901. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131901>
- Liang, H., Wang, J., Liu, T., & Zhang, Y. (2024). A crowd load model for structural vibration evaluation of building cover in a large-span railway station. *KSCE Journal of Civil Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s12205-024-2520-3>
- Lin, X. (2025). Systematic review of fire safety for long railway tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 162, 106185.
- Liu, X., Wang, P., Chen, R., & coauthors. (2023). Recent advances in subgrade engineering for high-speed railways in China. *Infrastructure and Transport*.
- Love, P. E. D., Edwards, D. J., & Smith, J. (2016). Rework causation: Emergent theoretical insights and implications for research. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(6), 04016010. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001114. Link: [https://ascelibrary.org/doi/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001114](https://ascelibrary.org/doi/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001114)
- Lyu, P., Kaewunruen, S., & coauthors. (2025). Serviceability of railway slab track foundations with retaining structures. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 13(1), 23-48.
- Magnusson, B., & Örnemark, U. (2014). *The fitness for purpose of analytical methods: A laboratory guide to method validation and related topics* (2nd ed.). Eurachem.
- Manikandan, V., Ramakrishnan, P. R., & Shanmugam, H. (2024). The advantages of adopting the ISO/IEC 17025:2017 lab management system in calibration and testing laboratories. *Indian Journal of Information Sources and Services*, 14(4), 131–135. <https://doi.org/10.51983/ijiss-2024.14.4.20>
- Medicines and Healthcare products Regulatory Agency (MHRA). (2021). Guidance on GxP data integrity.
- METKA. (n.d.). *Double railway project Rododafni–Rio*.
- Miguel, A. L. R., Moreiraa, R. P. L., & Oliveira, A. F. D. (2021). ISO/IEC 17025: History and introduction of concepts. *Química Nova*, 44(6), 792-796. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170726>

- Muruganandan, K., Davies, A., Denicol, J., & Whyte, J. (2022). The dynamics of systems integration: Balancing stability and change on London's Crossrail project. *International Journal of Project Management*, 40(6), 608–623. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2022.03.007>
- Okezue, M. A., Adeyeye, M. C., Byrn, S. J., Abiola, V. O., & Clase, K. L. (2020). Impact of ISO/IEC 17025 laboratory accreditation in sub-Saharan Africa: A case study. *BMC Health Services Research*, 20, Article 1065. <https://doi.org/10.1186/s12913-020-05934-8>
- Okost, M., Sokhatska, O., Voznenko, V., & Makedon, V. (2024). Geotechnical properties of cohesive soils used in the construction of new railway tracks. *Transportation Geotechnics*, 46, 101245.
- Otkhozoria, N., Petriashvili, L., Zhvania, T., & Lortkipanidze, N. (2025). Information risk analysis in laboratories complying with ISO/IEC 17025 standard. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 4(5), 50–61. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250405.05>
- Outaki, M., Talbi, M., El Hadi, M., El Oualidi, J., & Moussetad, M. (2024). Quality approach towards ISO/IEC 17025 accreditation at the center of analysis and characterization of Marrakesh Cadi Ayyad University: Metrology stakes. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*.
- Panagiotidou, E., Chountalas, P. T., Magoutas, A. I., Georgakellos, D. A., & Lagodimos, A. G. (2025). Systematic identification and validation of critical success factors for ISO/IEC 17025 implementation. *Administrative Sciences*, 15(2), 60. <https://doi.org/10.3390/admsci15020060>
- Patton, M. Q. (2015). *Qualitative research & evaluation methods* (4th ed.). Sage.
- Paz, C., Real, J. I., Zamorano, C., & Hernández, C. (2024). Advanced approach for assessing the degradation of railway ballast based on 3D image analysis. *Construction and Building Materials*, 458, 139988.
- Piccioni, C., Cirianni, F., & De Luca, M. (2021). Accessibility to passenger trains: Review and tests of platform gap fillers. *Transportation Research Procedia*, 52, 159–166. <https://publications.rwth-aachen.de/record/841398/files/841398.pdf>
- Pillai, S. P. S., & Fox, E. F. (2025). Laboratory quality management system fundamentals. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 13, Article 1578654. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2025.1578654>

- Project Management Institute. (2021). *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)* (7th ed.).
- Razumić, A., Runje, B., Alar, V., Štrbac, B., & Trzun, Z. (2025). A review of methods for assessing the quality of measurement systems and results. *Applied Sciences*, *15*(17), 9393.
- RB Rail AS. (2025). *Quality assessment study on usage of local mineral materials for Rail Baltica Railway project: Regulations*.
- Sampaio, P., Saraiva, P., & Rodrigues, A. G. (2009). ISO 9001 certification research: Questions, answers and approaches. *International Journal of Quality & Reliability Management*, *26*(1), 38–58.
- Schaude, J., & Hausotte, T. (2024). Uncertainty-based determination of recalibration dates. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, *15*, 2. <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2023017>
- Seriani, S., & coauthors. (2025). Passenger service time at the platform-train interface. *Applied Sciences*, *15*(15), 8256.
- Siami-Irdemoosa, E., Dindarloo, S. R., & Sharifzadeh, M. (2015). Work breakdown structure (WBS) development for underground construction. *Automation in Construction*, *58*, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.016>
- Skjermo, J., Moscoso, C., Nilsson, D., Frantzich, H., Hoem, Å. S., Arnesen, P., & Jenssen, G. D. (2024). Analysis of visual and acoustic measures for self-evacuations in road tunnels using virtual reality. *Fire Safety Journal*, *148*, 104224. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104224>
- Skrzypczak, I., Leśniak, A., Ochab, P., Górka, M., Kokoszka, W., & Sikora, A. (2021). Interlaboratory comparative tests in ready-mixed concrete quality assessment. *Materials*, *14*(13), 3475. <https://doi.org/10.3390/ma14133475>
- Sorlini, A., Dutel, G., Cecchinell, S., Jezoriek, H., & Lovecchio, N. (2025). *Emergency management during the construction of the Mont Cenis base tunnel: Safety concept, applications and first experience on site*.
- Swift, A. (2021). Step-free railway station access in the UK. *European Transport Research Review*, *13*, Article 62.
- Taivo, H., & coauthors. (2026). Interface management on high speed two: Managing multiple project interfaces in high-speed rail. *Railway Sciences*.

- Trauernicht, N., Braaksma, J., Haanstra, W., & van Dongen, L. A. M. (2025). The impacts on interorganizational project coordination: A multiple case study on large railway projects. *Project Management Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1177/87569728241265927>
- UNISIG. (n.d.). *Subset-091: Safety requirements for the technical interoperability of ETCS in Levels 1 and 2*.
- Velychko, O., Kuzmenko, I., & Gordiyenko, T. (2025). Practical aspects of ensuring of the metrological traceability. *Measurement: Sensors*, 38, 101529. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101529>
- Whatman, R., & coauthors. (2024). Strategies at the platform-train interface: In the pursuit of accessibility, safety and operational performance. *Behaviour & Information Technology*.
- Whyte, J., Davies, A., & Sexton, C. (2022). Systems integration in infrastructure projects: Seven lessons from Crossrail. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Management, Procurement and Law*, 175(3), 103-109. <https://doi.org/10.1680/jmapl.21.00014>
- World Health Organization. (2021). Guideline on data integrity (WHO Technical Report Series No. 1033, Annex 4).
- Wu, S., & coauthors. (2025). Emergency evacuation capacity evaluation of high-speed railway stations. *Applied Sciences*, 15(8), 4087.
- Xu, Z., Bai, Q., Shao, Y., Hu, A., & Dong, Z. (2022). A review on passenger emergency evacuation from multimodal transportation hubs. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(4), 591-607. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.02.001>
- Yamamoto, M., & coauthors. (2024). Relationship between chloride ingress and concrete cover thickness in durable concrete structures. *Case Studies in Construction Materials*.
- Yang, S., Zhou, Y., Wang, C., & Luo, M. (2026). The “Double Helix” model of quality monitoring: Risk mapping of quality management system during initial ISO 15189 implementation in a medical laboratory. *PLOS ONE*, 21(2), e0342129. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0342129>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). Sage.

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.