



Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας (ΣΘΕΤ)

Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Διπλωματική Εργασία

«Ολοκληρωμένη Διαχείριση Κατασκευής Αιολικών Πάρκων:
Εφαρμογή Lean Construction και Project Controls»

Γεώργιος Ξανθάκος

Επιβλέπων καθηγητής: Γεώργιος Αρετούλης

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2026

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

Ολοκληρωμένη Διαχείριση Κατασκευής Αιολικών Πάρκων: Εφαρμογή Lean Construction και Project Controls

Γεώργιος Ξανθάκος

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων καθηγητής:

Γεώργιος Αρετούλης

Καθηγητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

Μέλος ΣΕΠ ΕΑΠ

Συν-Επιβλέπων καθηγητής:

Κωνσταντίνος Λιώλιος

Διδάκτωρ Μηχανικός Περιβάλλοντος

Μέλος ΣΕΠ ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2026

Περίληψη

Η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της κοινωνίας, οδηγεί στην ταχεία ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην ανάγκη μετάβασης σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο, με σημαντική αύξηση των επενδύσεων στον τομέα της αιολικής ενέργειας. Τα έργα κατασκευής αιολικών πάρκων αποτελούν σύνθετα τεχνικά εγχειρήματα που χαρακτηρίζονται από υψηλές απαιτήσεις σε κεφάλαιο, αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς, πολυάριθμους εμπλεκόμενους φορείς και σημαντικούς τεχνικούς, περιβαλλοντικούς και οργανωτικούς κινδύνους. Η αποτελεσματική διαχείριση των έργων αυτών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχή ολοκλήρωσή τους εντός του προκαθορισμένου χρονοδιαγράμματος, προϋπολογισμού και επιπέδου ποιότητας.

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τη δυνατότητα εφαρμογής ενός ολοκληρωμένου πλαισίου διαχείρισης για την κατασκευή αιολικών πάρκων, βασισμένου στον συνδυασμό των αρχών της Λιτής Κατασκευής (Lean Construction) και των σύγχρονων Συστημάτων Ελέγχου Έργου (Project Controls). Η έρευνα εστιάζει στην αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο η ενοποίηση των δύο αυτών προσεγγίσεων μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της παραγωγικότητας, στη μείωση των απωλειών πόρων, στην ενίσχυση της προβλεψιμότητας του έργου και στη βελτιστοποίηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων.

Αρχικά πραγματοποιείται εκτενής ανασκόπηση σχετικά με τα χαρακτηριστικά των έργων αιολικής ενέργειας, τις κυριότερες προκλήσεις που εμφανίζονται κατά τη φάση κατασκευής, καθώς και τις σύγχρονες τάσεις στη διοίκηση τεχνικών έργων. Παρουσιάζονται οι βασικές αρχές της φιλοσοφίας της λιτής κατασκευής, με ιδιαίτερη έμφαση στη δημιουργία αξίας, στη μείωση των δραστηριοτήτων που δεν προσθέτουν αξία, στη διαχείριση της μεταβλητότητας και στη συνεχή βελτίωση των διαδικασιών. Παράλληλα αναλύονται τα βασικά εργαλεία των συστημάτων ελέγχου, όπως ο προγραμματισμός έργου, ο έλεγχος κόστους, η διαχείριση κινδύνων, η παρακολούθηση προόδου και η εφαρμογή της μεθόδου Διαχείρισης Δεδουλευμένης Αξίας (Earned Value Management – EVM).

Στη συνέχεια αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο μοντέλο διαχείρισης το οποίο συνδυάζει τεχνικές λιτής κατασκευής, όπως το σύστημα Last Planner, το Pull Planning και η χαρτογράφηση ροής αξίας (Value Stream Mapping), με εργαλεία συστημάτων ελέγχου για την παρακολούθηση του κόστους, του χρονοδιαγράμματος και των κινδύνων. Το προτεινόμενο πλαίσιο αποσκοπεί στη δημιουργία ενός περιβάλλοντος αυξημένης συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών, στη βελτίωση της αξιοπιστίας του προγραμματισμού και στη διασφάλιση αποτελεσματικότερου ελέγχου της απόδοσης του έργου.

Για την αξιολόγηση της προτεινόμενης προσέγγισης πραγματοποιείται μελέτη περίπτωσης που αφορά την εγκατάσταση αιολικού πάρκου συνολικής εγκατεστημένης ισχύος άνω των 60 MW, αναπτυσσόμενου σε δύο διακριτές φάσεις και σε δύο διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες. Μέσω της ανάλυσης των επιμέρους φάσεων υλοποίησης του έργου, διερευνώνται οι επιπτώσεις της εφαρμογής πρακτικών λιτής κατασκευής και συστημάτων ελέγχου έργων σε κρίσιμους δείκτες απόδοσης, όπως η τήρηση του χρονοδιαγράμματος, η διαχείριση του κόστους, η παραγωγικότητα των συνεργείων και η αποτελεσματικότητα της διαχείρισης κινδύνων.

Τα συμπεράσματα της εργασίας αναδεικνύουν τη σημασία της υιοθέτησης ολοκληρωμένων συστημάτων διαχείρισης στα έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και επιβεβαιώνουν ότι ο συνδυασμός Lean Construction και Project Controls μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την επιτυχή υλοποίηση σύνθετων ενεργειακών έργων.

Λέξεις Κλειδιά:

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Αιολικά Πάρκα, Διαχείριση Κατασκευαστικών Έργων, Συστήματα Ελέγχου Έργων, Λιτή Κατασκευή, Σύστημα Last Planner, Διαχείριση Δεδουλευμένης Αξίας, Διαχείριση Κινδύνων.

Abstract

The continuously increasing demand for electrical energy to meet society's needs is driving the rapid development of renewable energy sources and the transition towards a sustainable energy model, accompanied by a significant increase in investment in the wind energy sector. Wind farm construction projects are complex technical undertakings characterized by high capital requirements, strict time constraints, numerous stakeholders, and significant technical, environmental, and organizational risks. The effective management of such projects is a critical factor in ensuring their successful completion within the predefined schedule, budget, and required quality standards.

This Master's thesis investigates the potential application of an integrated management framework for wind farm construction, based on the combination of Lean Construction principles and modern Project Controls systems. The research focuses on assessing how the integration of these two approaches can contribute to improving productivity, reducing resource waste, enhancing project predictability, and optimizing the decision-making process.

Initially, an extensive review is conducted on the characteristics of wind energy projects, the main challenges encountered during the construction phase, and current trends in construction project management. The fundamental principles of the Lean Construction philosophy are presented, with particular emphasis on value creation, the reduction of non-value-adding activities, variability management, and continuous process improvement. In parallel, the main Project Controls tools are analyzed, including project scheduling, cost control, risk management, progress monitoring, and the application of Earned Value Management (EVM).

Subsequently, an integrated management model is developed, combining Lean Construction techniques, such as the Last Planner System (LPS), Pull Planning, and Value Stream Mapping (VSM), with Project Controls tools for monitoring cost, schedule, and risks. The proposed framework aims to create an environment of enhanced collaboration among project stakeholders, improve planning reliability, and ensure more effective control of project performance.

To evaluate the proposed approach, a case study is conducted concerning the installation of a wind farm with a total installed capacity exceeding 60 MW, developed in two distinct phases and across two different geographical locations. Through the analysis of the individual project implementation phases, the effects of applying Lean Construction practices and Project Controls systems on critical performance indicators are investigated, including schedule adherence, cost management, crew productivity, and the effectiveness of risk management.

The findings of the thesis highlight the importance of adopting integrated management systems in renewable energy projects and confirm that the combination of Lean Construction and Project Controls can provide a valuable framework for the successful delivery of complex energy projects.

Keywords:

Renewable Energy Sources, Wind Farms, Construction Project Management, Project Controls, Lean Construction, Last Planner System, Earned Value Management, Risk Management.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα	1
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή.....	7
1.1 Γενικό πλαίσιο και σημασία του θέματος.....	7
1.2 Η συμβολή της αιολικής ενέργειας στην ενεργειακή μετάβαση	7
1.3 Προβλήματα και προκλήσεις στη διαχείριση έργων αιολικών πάρκων.....	7
1.4 Lean Construction και Project Controls ως σύγχρονες προσεγγίσεις διαχείρισης	8
1.5 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας	8
1.6 Μεθοδολογία Έρευνας	8
1.7 Δομή Εργασίας	9
Κεφάλαιο 2: Αιολικά Πάρκα και Κύκλος Ζωής του Έργου	10
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 Η Αιολική Ενέργεια στο σύγχρονο Ενεργειακό Περιβάλλον	10
2.3 Βασικά Χαρακτηριστικά των Αιολικών Πάρκων	10
2.4 Κατηγορίες Αιολικών Πάρκων	11
2.4.1 Χερσαία Αιολικά Πάρκα (Onshore).....	11
2.4.2 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα (Offshore).....	12
2.5 Ο Κύκλος Ζωής ενός Έργου Αιολικού Πάρκου	13
2.6 Αδειοδοτική Διαδικασία και Ανάπτυξη Έργου	14
2.7 Φάση Μελέτης, Προμηθειών και Κατασκευής (Engineering - Procurement - Construction, EPC)	14
2.8 Εμπλεκόμενοι Φορείς (Stakeholders).....	15
2.9 Τεχνικοί και Επιχειρησιακοί Κίνδυνοι.....	16
2.10 Κρίσιμοι Παράγοντες Επιτυχίας και Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	16
Κεφάλαιο 3: Διαχείριση Έργων (Project Management) και Συστήματα Ελέγχου Έργων (Project Controls) στα Κατασκευαστικά Έργα	18
3.1 Εισαγωγή.....	18
3.2 Έννοια και Αρχές της Διαχείρισης Έργων (Project Management)	18
3.2.1 Θεμελιώδεις Αρχές του Project Management	19
3.2.2 Ο Τριγωνικός Περιορισμός (Triple Constraint).....	19
3.2.3 Ο Ρόλος του Project Manager	20
3.3 Γνωστικά Αντικείμενα του Project Management.....	20
3.3.1 Εισαγωγή	20
3.3.2 Διαχείριση Φυσικού Αντικειμένου (Scope Management)	20
3.3.3 Διαχείριση Χρονοδιαγράμματος (Schedule Management).....	21
3.3.4 Διαχείριση Κόστους (Cost Management).....	21

3.3.5 Διαχείριση Ποιότητας (Quality Management)	21
3.3.6 Διαχείριση Πόρων (Resource Management)	21
3.3.7 Διαχείριση Επικοινωνιών (Communications Management)	22
3.3.8 Διαχείριση Κινδύνων (Risk Management)	22
3.3.9 Διαχείριση Προμηθειών (Procurement Management)	22
3.3.10 Διαχείριση Ενδιαφερομένων Μερών (Stakeholder Management)	22
3.4 Συστήματα Ελέγχου Έργων (Project Controls)	22
3.4.1 Ορισμός των Συστημάτων Ελέγχου	22
3.4.2 Στόχοι των Συστημάτων Ελέγχου	23
3.4.3 Εξέλιξη των Συστημάτων Ελέγχου	23
3.4.4 Διαφορά μεταξύ Διαχείρισης Έργων (Project Management) και Συστημάτων Ελέγχου Έργων (Project Controls)	24
3.4.5 Συμπεράσματα	24
3.5 Βασικά Συστήματα Προγραμματισμού και Ελέγχου Έργου	24
3.5.1 Δομή Ανάλυσης Εργασιών - Work Breakdown Structure (WBS)	25
3.5.2 Οργανωτική Δομή Ανάλυσης - Organizational Breakdown Structure (OBS)	26
3.5.3 Δομή Ανάλυσης Κόστους - Cost Breakdown Structure (CBS)	26
3.5.4 Πίνακας Ανάθεσης Αρμοδιοτήτων - Responsibility Assignment Matrix (RAM)	27
3.5.5 Λογαριασμοί Ελέγχου - Control Accounts (CA)	28
3.5.6 Διαχείριση Γραμμών Αναφοράς - Baseline Management	28
3.5.7 Εφαρμογή στα έργα εγκατάστασης αιολικών πάρκων	28
3.6 Προγραμματισμός Έργου	29
3.6.1 Βασικές Αρχές και Ανάπτυξη Χρονοδιαγράμματος	29
3.6.2 Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής – Critical Path Method (CPM)	29
3.6.3 Τεχνική Αξιολόγησης και Αναθεώρησης Προγράμματος - Program Evaluation and Review Technique (PERT)	30
3.6.4 Μέθοδος Κρίσιμης Αλυσίδας - Critical Chain Method (CCM)	30
3.6.5 Ορόσημα (Milestones) και Βασικά Σημεία Ελέγχου	31
3.6.6 Παρακολούθηση και Έλεγχος Χρονοδιαγράμματος	31
3.6.7 Παρακολούθηση αποκλίσεων και πρόβλεψη ολοκλήρωσης	31
3.7 Έλεγχος Χρονοδιαγράμματος και Κόστους (Schedule and Cost Control)	32
3.7.1 Διαχείριση Δεδουλευμένης Αξίας - Earned Value Management (EVM)	32
3.7.2 Δείκτης Απόδοσης Χρονοδιαγράμματος - Schedule Performance Index (SPI)	33
3.7.3 Δείκτης Απόδοσης Κόστους - Cost Performance Index (CPI)	33
3.7.4 Απόκλιση Χρονοδιαγράμματος - Schedule Variance (SV) και Απόκλιση Κόστους - Cost Variance (CV)	34
3.7.5 Εκτίμηση Κόστους κατά την Ολοκλήρωση - Estimate at Completion (EAC)	34
3.7.6 Εκτίμηση Κόστους για την Ολοκλήρωση - Estimate to Complete (ETC)	35
3.7.7 Εφαρμογή του ελέγχου χρόνου και κόστους στα έργα αιολικών πάρκων	36
3.8 Διαχείριση Κινδύνων - Project Risk Management	36
3.8.1 Αναγνώριση Κινδύνων - Risk Identification	37
3.8.2 Ποιοτική Ανάλυση Κινδύνων - Qualitative Risk Analysis	38
3.8.3 Ποσοτική Ανάλυση Κινδύνων - Quantitative Risk Analysis	38

3.8.4 Μητρώο Κινδύνων - Risk Register	38
3.8.5 Στρατηγικές Αντιμετώπισης	38
3.9 Ψηφιακά Εργαλεία Συστημάτων Ελέγχου Έργων	39
3.9.1 Primavera P6	39
3.9.2 Microsoft Project.....	39
3.9.3 Power BI	40
3.9.4 Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κατασκευής - Building Information Modeling (BIM 4D και 5D)	40
3.9.5 Πίνακες Ελέγχου (Dashboards) και Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs).....	40
Κεφάλαιο 4: Λιτή Κατασκευή (Lean Construction) στα Κατασκευαστικά Έργα	42
4.1 Λιτή Κατασκευή (Lean Construction): Έννοια, Εξέλιξη και Βασικές Αρχές	42
4.2 Αξία, Σπατάλη και Ροή στην Κατασκευή	42
4.2.1 Αξία (Value)	43
4.2.2 Σπατάλη (Waste)	43
4.2.3 Ροή (Flow)	44
4.2.4 Η αλληλεξάρτηση Αξίας - Σπατάλης - Ροής	45
4.3 Last Planner System (LPS).....	46
4.3.1 Κύριος Προγραμματισμός (Master Planning) και Προγραμματισμός Φάσεων (Phase Planning).....	47
4.3.2 Βραχυπρόθεσμος Προγραμματισμός (Look Ahead Planning)	47
4.3.3 Εβδομαδιαίος Προγραμματισμός Εργασιών (Weekly Work Planning)	48
4.3.4 Ποσοστό Ολοκλήρωσης Προγραμματισμένων Εργασιών (Percent Plan Complete - PPC) και Αιτίες Μη Ολοκλήρωσης (Reasons for Non-Completion – RNC)	48
4.4 Αντίστροφος Προγραμματισμός βάσει Οροσήμων (Pull Planning) και Διαχείριση Περιορισμών (Constraint Management)....	49
4.4.1 Αντίστροφος Προγραμματισμός βάσει Οροσήμων (Pull Planning)	49
4.4.2 Διαχείριση Περιορισμών (Constraint Management)	50
4.4.3 Σύνδεση Αντίστροφου Προγραμματισμού και Διαχείρισης Περιορισμών	51
4.5 Just-in-Time και Διαχείριση Ροής Υλικών	52
4.6 Οπτική Διαχείριση (Visual Management) και Συνεχής Βελτίωση (Continuous Improvement).....	52
4.6.1 Οπτική Διαχείριση (Visual Management)	53
4.6.2 Συνεχής Βελτίωση (Continuous Improvement)	53
Κεφάλαιο 5: Συνδυαστική Εφαρμογή Lean Construction και Project Controls	55
5.1 Εισαγωγή και Σκοπός της Ενοποίησης.....	55
5.2 Ενοποιημένο Πλαίσιο Προγραμματισμού και Ελέγχου.....	55
5.2.1 Σύνδεση Κύριου Χρονοδιαγράμματος Έργου (Master Schedule) και Προγραμματισμού Φάσεων (Phase Planning).....	55
5.2.2 Βραχυπρόθεσμος Προγραμματισμός (Look Ahead Planning) και Προγραμματισμός Προετοιμασίας Εργασιών (Make-Ready Planning).....	56
5.2.3 Εβδομαδιαίος Προγραμματισμός Εργασιών (Weekly Work Planning) και Ανατροφοδότηση του Κύριου Χρονοδιαγράμματος (Master Schedule)	57
5.3 Ενοποίηση Παρακολούθησης Απόδοσης και Παραγωγικής Αξιοπιστίας	58
5.3.1 Μέτρηση Προόδου (Progress Measurement) και Διαχείριση Δεδουλευμένης Αξίας (EVM)	58
5.3.2 Συνδυαστική Χρήση SPI, CPI και PPC.....	58
5.3.3 Από τη Διαπίστωση της Απόκλισης στην Ανάλυση της Αιτίας.....	59

5.4 Ενοποίηση Διαχείρισης Κινδύνων (Risk) και Περιορισμών (Constraint Management).....	59
5.4.1 Σύνδεση Μητρώου Κινδύνων (Risk Register) και Μητρώου Περιορισμών (Constraint Log).....	59
5.5 Αναφορές Απόδοσης (Reporting), Οπτική Διαχείριση (Visual Management) και Συνεχής Βελτίωση (Continuous Improvement).....	60
5.5.1 Ενοποιημένη Πληροφόρηση και Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs).....	60
5.5.2 Σύνδεση Αναφορών Απόδοσης και Συνεχούς Βελτίωσης	61
5.6 Συμπεράσματα Κεφαλαίου.....	61
Κεφάλαιο 6: Μεθοδολογία Έρευνας	63
6.1 Ερευνητικός Σκοπός και Ερευνητικά Ερωτήματα.....	63
6.2 Ερευνητικός Σχεδιασμός και Μελέτη Περίπτωσης	63
6.2.1 Επιλογή της Μελέτης Περίπτωσης.....	64
6.2.2 Μονάδα και Όρια Ανάλυσης	64
6.3 Μέθοδος Επεξεργασίας και Ανάλυσης Δεδομένων	64
Κεφάλαιο 7: Μελέτη Περίπτωσης – Κατασκευή Αιολικού Πάρκου 67 MW	66
7.1 Παρουσίαση Έργου	66
7.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά.....	68
7.3 Δομή Ανάλυσης Εργασιών (Work Breakdown Structure - WBS) της Μελέτης Περίπτωσης	69
7.4 Ανάλυση Χρονοδιαγράμματος.....	70
7.4.1 Βασικά Ορόσημα (Milestones) και Κατασκευαστική Ακολουθία.....	70
7.4.2 Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (Critical Path Method - CPM) και Χρονικές Αποκλίσεις.....	71
7.4.3 Χρονοδιάγραμμα Αναφοράς (Baseline) έναντι Πραγματικής Προόδου (Actual Progress)	72
7.5 Ανάλυση Κόστους	73
7.5.1 Κατανομή Προϋπολογισμού	73
7.5.2 Ανάλυση Αιτιών Κόστους	74
7.5.3 Πρόβλεψη Τελικού Κόστους του Έργου	74
7.6 Μητρώο Κινδύνων (Risk Register)	75
7.6.1 Αναγνώριση και Αξιολόγηση Κινδύνων.....	76
7.6.3 Σύνδεση Κινδύνων και Περιορισμών στην Εκτέλεση του Έργου.....	77
7.7 Εφαρμογή Λιτής Κατασκευής (Lean Construction)	77
7.7.1 Pull Planning.....	77
7.7.2 Last Planner System.....	78
7.7.3 PPC Analysis.....	79
7.8 Εφαρμογή Συστημάτων Ελέγχου Έργων (Project Controls).....	79
7.8.1 Ανάλυση Δεδουλευμένης Αξίας (Earned Value Analysis - EVA).....	80
7.8.2 Ανάλυση απόδοσης κόστους (Cost Performance Analysis).....	80
7.8.3 Schedule Performance Analysis.....	81
7.9 Πίνακας παρακολούθησης και ελέγχου του έργου (Project Dashboard)	82
7.10 Αποτελέσματα Εφαρμογής	84
7.11 Συμπεράσματα Κεφαλαίου	84
Κεφάλαιο 8: Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	86

8.1 Αξιολόγηση των βασικών ευρημάτων.....	86
8.2 Αξιολόγηση της συνδυαστικής εφαρμογής Lean Construction και Project Controls	87
8.3 Αξιολόγηση της εφαρμογής σε έργα αιολικών πάρκων.....	88
Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα και Προοπτικές Εφαρμογής.....	89
9.1 Συνολικά συμπεράσματα της έρευνας.....	89
9.2 Περιορισμοί της έρευνας.....	89
9.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και εφαρμογή	90
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	91

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1 Γενικό πλαίσιο και σημασία του θέματος

Η κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια, η κλιματική αλλαγή και η αυξανόμενη ανάγκη περιορισμού των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έχουν αναδείξει την ενεργειακή μετάβαση ως μία από τις σημαντικότερες προκλήσεις του 21ου αιώνα. Σε διεθνές επίπεδο, η επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης έχουν οδηγήσει σε σημαντική ενίσχυση των επενδύσεων σε έργα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Μεταξύ των διαθέσιμων τεχνολογιών, η αιολική ενέργεια κατέχει πρωταγωνιστικό ρόλο στις μέρες μας, καθώς αποτελεί μία τεχνολογία με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, σημαντική ενεργειακή απόδοση και μικρό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή ολοένα μειούμενο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη αιολικών πάρκων παρουσιάζει ιδιαίτερη δυναμική τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Η συνεχής αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος αποδεικνύει ότι η αιολική ενέργεια αποτελεί βασικό πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης. Παράλληλα, η ανάγκη ενεργειακής ασφάλειας, η μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και η επίτευξη των στόχων μηδενικών καθαρών εκπομπών ενισχύουν περαιτέρω τη σημασία της αιολικής ενέργειας.

Ωστόσο, η κατασκευή αιολικών πάρκων αποτελεί μια ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, η οποία απαιτεί τον συντονισμό πολλών διαφορετικών δραστηριοτήτων και εμπλεκόμενων φορέων. Τα έργα αυτά χαρακτηρίζονται από αυξημένη τεχνική πολυπλοκότητα, σημαντικές απαιτήσεις σε εξειδικευμένο εξοπλισμό, πολύπλοκες διαδικασίες αδειοδότησης και αυστηρούς περιορισμούς ως προς το χρονοδιάγραμμα και τον προϋπολογισμό. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματική διαχείριση των έργων αιολικής ενέργειας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιτυχή ολοκλήρωσή τους.

1.2 Η συμβολή της αιολικής ενέργειας στην ενεργειακή μετάβαση

Η αιολική ενέργεια αποτελεί μία από τις πλέον ανταγωνιστικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, συμβάλλοντας ουσιαστικά στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του ενεργειακού τομέα. Η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού προσφέρει πολλαπλά οφέλη, όπως η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, η ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και η διαφοροποίηση του ενεργειακού μίγματος.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η αιολική ενέργεια αποτελεί βασικό εργαλείο για την επίτευξη των στόχων της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, ενώ στην Ελλάδα η ανάπτυξη νέων αιολικών εγκαταστάσεων εντάσσεται στο πλαίσιο της εθνικής στρατηγικής για την αύξηση της συμμετοχής των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας.

1.3 Προβλήματα και προκλήσεις στη διαχείριση έργων αιολικών πάρκων

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα της αιολικής ενέργειας, η υλοποίηση των σχετικών έργων συνοδεύεται από πολυάριθμες προκλήσεις. Η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου περιλαμβάνει ένα μεγάλο εύρος δραστηριοτήτων που εκτείνονται από τη χωροθέτηση και την αδειοδότηση, έως την κατασκευή των υποδομών και τη θέση σε λειτουργία των ανεμογεννητριών.

Οι κυριότερες προκλήσεις σχετίζονται με:

- Την πολυπλοκότητα των διαδικασιών αδειοδότησης.
- Τις δυσκολίες πρόσβασης σε απομακρυσμένες ή ορεινές περιοχές.
- Τη μεταφορά και εγκατάσταση υπερμεγεθών εξαρτημάτων.

- Τη διαχείριση πολλαπλών εργολάβων και προμηθευτών.
- Τις καιρικές συνθήκες που επηρεάζουν την παραγωγικότητα των εργασιών.
- Τους γεωτεχνικούς και περιβαλλοντικούς περιορισμούς.
- Τους κινδύνους υπέρβασης κόστους και καθυστέρησης του χρονοδιαγράμματος.

Οι παραπάνω παράγοντες αυξάνουν την αβεβαιότητα και καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή προηγμένων μεθοδολογιών διαχείρισης που επιτρέπουν την αποτελεσματική παρακολούθηση και τον έλεγχο της εξέλιξης του έργου.

1.4 Lean Construction και Project Controls ως σύγχρονες προσεγγίσεις διαχείρισης

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αυξανόμενο ενδιαφέρον για την εφαρμογή καινοτόμων προσεγγίσεων διαχείρισης στα κατασκευαστικά έργα. Δύο από τις σημαντικότερες προσεγγίσεις που έχουν αναδειχθεί είναι το Lean Construction και τα Project Controls.

Η φιλοσοφία του Lean Construction βασίζεται στις αρχές της λιτής παραγωγής και επιδιώκει τη μεγιστοποίηση της αξίας για τον πελάτη μέσω της εξάλειψης δραστηριοτήτων που δεν προσθέτουν αξία. Η προσέγγιση αυτή δίνει ιδιαίτερη έμφαση στη βελτίωση της ροής εργασιών, στη μείωση της μεταβλητότητας και στην ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών.

Από την άλλη πλευρά, τα Project Controls αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαδικασιών και εργαλείων που υποστηρίζουν τον προγραμματισμό, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της απόδοσης ενός έργου. Μέσω της χρήσης τεχνικών όπως η διαχείριση χρονοδιαγράμματος, ο έλεγχος κόστους, η διαχείριση κινδύνων και η ανάλυση Διαχείριση Δεδουλευμένης Αξίας (Earned Value Management), παρέχεται η δυνατότητα έγκαιρης αναγνώρισης αποκλίσεων και λήψης διορθωτικών μέτρων.

Η συνδυαστική εφαρμογή των δύο προσεγγίσεων δημιουργεί τις προϋποθέσεις για αποτελεσματικότερη διαχείριση σύνθετων έργων υποδομών, όπως τα αιολικά πάρκα.

1.5 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της δυνατότητας ολοκληρωμένης διαχείρισης της κατασκευής αιολικών πάρκων μέσω της ενοποίησης των αρχών Lean Construction και των συστημάτων Project Controls.

Ειδικότερα, η εργασία αποσκοπεί στην αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους μέσω μελέτης περίπτωσης, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων και πρακτικών προτάσεων για τη βελτίωση της διαχείρισης αντίστοιχων έργων.

1.6 Μεθοδολογία Έρευνας

Η ερευνητική προσέγγιση που ακολουθείται βασίζεται στον συνδυασμό βιβλιογραφικής ανασκόπησης και μελέτης περίπτωσης. Αρχικά πραγματοποιείται συστηματική διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας και άλλων πηγών, σχετικά με τα έργα αιολικής ενέργειας, τις αρχές Lean Construction και τα συστήματα Project Controls. Στη συνέχεια αναπτύσσεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο διαχείρισης και εξετάζεται η εφαρμογή του σε έργο αιολικού πάρκου συνολικής εγκατεστημένης ισχύος άνω των 60 MW, το οποίο υλοποιήθηκε σε δύο διακριτές φάσεις και σε δύο διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες.

Η ανάλυση επικεντρώνεται σε δείκτες που σχετίζονται με την απόδοση χρονοδιαγράμματος, τον έλεγχο κόστους, την παραγωγικότητα και τη διαχείριση κινδύνων, προκειμένου να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης.

1.7 Δομή Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία διαρθρώνεται σε εννέα κεφάλαια, τα οποία αναπτύσσονται σταδιακά από τη θεωρητική προσέγγιση του αντικειμένου έως την εφαρμογή, την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται το αντικείμενο της εργασίας, η σκοπιμότητα και οι βασικοί στόχοι της έρευνας. Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται το πλαίσιο ανάπτυξης και κατασκευής των αιολικών πάρκων, με αναφορά στα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά και στις κύριες φάσεις υλοποίησής τους. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο της Διαχείρισης Έργων (Project Management) και των Συστημάτων Ελέγχου Έργων (Project Controls), με έμφαση στον προγραμματισμό, την παρακολούθηση χρόνου και κόστους, τη διαχείριση κινδύνων και τα βασικά συστήματα ελέγχου της απόδοσης.

Στο Κεφάλαιο 4 αναπτύσσονται οι αρχές του Lean Construction, καθώς και εργαλεία όπως το Last Planner System, το Pull Planning, το Constraint Management και το Just-in-Time. Στο Κεφάλαιο 5 εξετάζεται η συνδυαστική εφαρμογή του Lean Construction και των Project Controls και διαμορφώνεται ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο προγραμματισμού, ελέγχου και συνεχούς βελτίωσης για έργα αιολικών πάρκων.

Στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η ερευνητική μεθοδολογία και ο σχεδιασμός της μελέτης περίπτωσης. Στο Κεφάλαιο 7 εφαρμόζεται το θεωρητικό πλαίσιο σε έργο κατασκευής αιολικού πάρκου 67 MW, μέσω της Δομής Ανάλυσης Εργασιών (Work Breakdown Structure – WBS), του χρονοδιαγράμματος, του κόστους, των κινδύνων και της εφαρμογής εργαλείων Lean Construction και Project Controls. Στο Κεφάλαιο 8 αναλύονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της εφαρμογής και εξετάζεται η προστιθέμενη αξία της συνδυαστικής προσέγγισης.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 9 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της έρευνας, απαντώνται τα ερευνητικά ερωτήματα, παρουσιάζονται πρακτικές προτάσεις για τη διαχείριση έργων αιολικών πάρκων και καταγράφονται οι περιορισμοί και οι δυνατότητες περαιτέρω έρευνας. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία ακολουθεί μία συνεκτική πορεία από τη θεωρητική θεμελίωση και τη μεθοδολογία προς την πρακτική εφαρμογή, την αξιολόγηση και την εξαγωγή τελικών συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 2: Αιολικά Πάρκα και Κύκλος Ζωής του Έργου

2.1 Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια αποτελεί έναν από τους ταχύτερα αναπτυσσόμενους κλάδους της παγκόσμιας αγοράς ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη των στόχων για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την ενεργειακή μετάβαση. Η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη των ανεμογεννητριών, η αύξηση της απόδοσής τους και η σταδιακή μείωση του κόστους εγκατάστασης έχουν καταστήσει την αιολική ενέργεια μία από τις πλέον ανταγωνιστικές μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου αποτελεί ένα σύνθετο τεχνικό έργο υποδομής, το οποίο απαιτεί τη συνεργασία πολλών επιστημονικών ειδικοτήτων και την αποτελεσματική διαχείριση μεγάλου αριθμού τεχνικών, οικονομικών, περιβαλλοντικών και οργανωτικών πόρων. Σε αντίθεση με άλλα κατασκευαστικά έργα, τα αιολικά πάρκα υλοποιούνται συνήθως σε δυσπρόσιτες περιοχές με έντονο ανάγλυφο, περιορισμένες υφιστάμενες υποδομές και ιδιαίτερες περιβαλλοντικές απαιτήσεις. Οι συνθήκες αυτές αυξάνουν την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού και της κατασκευής, καθιστώντας απαραίτητη την εφαρμογή σύγχρονων πρακτικών διαχείρισης έργων.

Η επιτυχία ενός έργου αιολικής ενέργειας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας ή του εξοπλισμού, αλλά και από την αποτελεσματική διαχείριση ολόκληρου του κύκλου ζωής του έργου, από τη φάση της αρχικής σύλληψης έως τη θέση σε εμπορική λειτουργία και τη μακροχρόνια λειτουργία και συντήρησή του.

2.2 Η Αιολική Ενέργεια στο σύγχρονο Ενεργειακό Περιβάλλον

Η παγκόσμια ενεργειακή πολιτική τα τελευταία χρόνια χαρακτηρίζεται από τη σταδιακή απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και την ενίσχυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η αιολική ενέργεια αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της ενεργειακής μετάβασης, καθώς συνδυάζει υψηλό τεχνολογικό επίπεδο και χαμηλό λειτουργικό κόστος. Η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού συμβάλλει επίσης στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μίγματος και τη μείωση της ενεργειακής εξάρτησης.

Η Ελλάδα διαθέτει ιδιαίτερα υψηλό αιολικό δυναμικό, κυρίως στις νησιωτικές και ορεινές περιοχές, γεγονός που την καθιστά μία από τις πλέον ευνοϊκές χώρες της Ευρώπης για την ανάπτυξη χερσαίων αιολικών πάρκων. Παράλληλα, η σταδιακή ανάπτυξη υπεράκτιων αιολικών εγκαταστάσεων διεθνώς, δημιουργεί νέες προοπτικές για την περαιτέρω αξιοποίηση τους και στον ελληνικό θαλάσσιο χώρο.

2.3 Βασικά Χαρακτηριστικά των Αιολικών Πάρκων

Ένα αιολικό πάρκο αποτελεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο αποτελείται από ένα σύνολο ανεμογεννητριών που λειτουργούν συντονισμένα και συνδέονται μέσω εσωτερικού ηλεκτρικού δικτύου με έναν υποσταθμό ανύψωσης τάσης και στη συνέχεια, με το εθνικό σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η επιλογή της θέσης εγκατάστασης αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες επιτυχίας του έργου. Η περιοχή πρέπει να διαθέτει επαρκές αιολικό δυναμικό, κατάλληλη γεωμορφολογία, δυνατότητα πρόσβασης για τη μεταφορά βαρέος εξοπλισμού και δυνατότητα ηλεκτρικής διασύνδεσης με το δίκτυο.

Οι βασικές υποδομές ενός χερσαίου αιολικού πάρκου περιλαμβάνουν:

- Το εσωτερικό οδικό δίκτυο πρόσβασης

- Τις «πλατείες» ανέγερσης των ανεμογεννητριών
- Τις θεμελιώσεις
- Το υπόγειο δίκτυο μέσης τάσης
- Τον υποσταθμό ανύψωσης τάσης
- Τις εγκαταστάσεις τηλεπικοινωνιών και αυτοματισμού
- Τα συστήματα ελέγχου και απομακρυσμένης παρακολούθησης (SCADA)

Η κατασκευή όλων των παραπάνω υποδομών απαιτεί τον συντονισμό διαφορετικών ειδικοτήτων, όπως πολιτικών μηχανικών, ηλεκτρολόγων μηχανικών, μηχανολόγων, τοπογράφων, γεωλόγων και ειδικών σε θέματα υγείας, ασφάλειας και περιβάλλοντος.

2.4 Κατηγορίες Αιολικών Πάρκων

Τα αιολικά πάρκα διακρίνονται σε δύο κύριες κατηγορίες, σε χερσαία (Onshore) και υπεράκτια (Offshore), καθεμία από τις οποίες παρουσιάζει διαφορετικά τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά.

2.4.1 Χερσαία Αιολικά Πάρκα (Onshore)

Τα χερσαία αιολικά πάρκα αποτελούν τη συνηθέστερη μορφή εγκατάστασης ανεμογεννητριών. Στην Ελλάδα αναπτύσσονται κυρίως σε ορεινές περιοχές, λόφους, παράκτιες ζώνες και νησιά, όπου επικρατούν υψηλές μέσες ταχύτητες ανέμου.



Εικόνα 1: Χερσαίο Αιολικό Πάρκο

Τα βασικά πλεονεκτήματα των χερσαίων έργων περιλαμβάνουν το χαμηλότερο κόστος κατασκευής, την ευκολότερη πρόσβαση για εργασίες συντήρησης και τη μεγαλύτερη εμπειρία που διαθέτει η κατασκευαστική βιομηχανία στην υλοποίησή τους.

Ωστόσο, η ανάπτυξη χερσαίων αιολικών πάρκων συνοδεύεται από προκλήσεις όπως οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί, οι δυσκολίες πρόσβασης σε ορεινές περιοχές, η κοινωνική αποδοχή των έργων και οι περιορισμοί του ηλεκτρικού δικτύου.

2.4.2 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα (Offshore)

Τα υπεράκτια αιολικά πάρκα εγκαθίστανται στη θάλασσα, σε περιοχές όπου οι άνεμοι παρουσιάζουν μεγαλύτερη ένταση και σταθερότητα. Η Ελλάδα δεν κατέχει ακόμη θέση στον χάρτη της ανάπτυξης υπεράκτιων αιολικών πάρκων, καθώς μέχρι σήμερα δεν διαθέτει εγκατεστημένα έργα, παρά το ιδιαίτερα αξιόλογο αιολικό δυναμικό που παρουσιάζουν οι θαλάσσιες περιοχές της.

Μία ιδιαίτερη περίπτωση αποτελεί το Αιολικό Πάρκο Αγίου Γεωργίου, το οποίο βρίσκεται στην ακατοίκητη νησίδα του Αγίου Γεωργίου, νότια του Σουνίου. Αν και οι ανεμογεννήτριες είναι εγκατεστημένες επί της νησίδας και συνεπώς το έργο χαρακτηρίζεται ως χερσαίο (onshore), παρουσιάζει σημαντικά χαρακτηριστικά υπεράκτιου (offshore) αιολικού πάρκου. Με συνολική εγκατεστημένη ισχύ περίπου 73 MW, το αιολικό πάρκο συνδέεται με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό δίκτυο μέσω υποθαλάσσιου καλωδίου.



Εικόνα 2: Υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο

Η τεχνολογία αυτή προσφέρει σημαντικά υψηλότερους συντελεστές αξιοποίησης της εγκατεστημένης ισχύος, επιτρέποντας την παραγωγή μεγαλύτερων ποσοτήτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, τα υπεράκτια έργα απαιτούν εξειδικευμένο εξοπλισμό, ιδιαίτερα σύνθετες λιμενικές και θαλάσσιες εργασίες, καθώς και αυξημένες επενδύσεις, γεγονός που τα καθιστά σημαντικά πιο απαιτητικά ως προς τη διαχείριση του κόστους και των κινδύνων.

2.5 Ο Κύκλος Ζωής ενός Έργου Αιολικού Πάρκου

Η ανάπτυξη ενός αιολικού πάρκου ακολουθεί έναν διακριτό κύκλο ζωής, ο οποίος περιλαμβάνει μια αλληλουχία φάσεων με διαφορετικούς στόχους, εμπλεκόμενους φορείς και απαιτήσεις διαχείρισης. Η επιτυχής ολοκλήρωση κάθε φάσης αποτελεί προϋπόθεση για τη μετάβαση στην επόμενη και επηρεάζει άμεσα την τελική απόδοση του έργου.

Οι βασικές φάσεις του κύκλου ζωής περιλαμβάνουν:

- Εντοπισμός και αξιολόγηση της περιοχής εγκατάστασης
- Διεξαγωγή ανεμολογικών και περιβαλλοντικών μελετών
- Αδειοδότηση
- Τεχνικός σχεδιασμός
- Προμήθειες και συμβάσεις
- Κατασκευή
- Δοκιμές και θέση σε λειτουργία
- Εμπορική λειτουργία
- Λειτουργία και συντήρηση (O&M)



Σχήμα 1: Κύκλος Ζωής Έργου

Η κατανόηση του κύκλου ζωής αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή των αρχών Lean Construction και των συστημάτων Project Controls, τα οποία θα αναλυθούν στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας.

2.6 Αδειοδοτική Διαδικασία και Ανάπτυξη Έργου

Η αδειοδοτική διαδικασία αποτελεί ένα από τα πλέον κρίσιμα και χρονοβόρα στάδια στον κύκλο ζωής ενός αιολικού πάρκου. Η επιτυχής ολοκλήρωσή της προϋποθέτει τον συντονισμό πολλών εμπλεκόμενων φορέων, τη συμμόρφωση με το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο και την εκπόνηση εξειδικευμένων τεχνικών και περιβαλλοντικών μελετών. Παράλληλα, η διαδικασία αυτή επηρεάζει καθοριστικά το συνολικό χρονοδιάγραμμα, το επενδυτικό κόστος και τη βιωσιμότητα του έργου.

Η φάση ανάπτυξης ξεκινά με τον εντοπισμό περιοχών που διαθέτουν ικανοποιητικό αιολικό δυναμικό και κατάλληλα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά. Ακολουθεί η εγκατάσταση ανεμολογικών ιστών ή η αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών απομακρυσμένης μέτρησης (LiDAR), προκειμένου να συλλεχθούν αξιόπιστα δεδομένα για την ένταση και τη διεύθυνση του ανέμου (Site Assessment Report). Τα δεδομένα αυτά αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό της αναμενόμενης ενεργειακής παραγωγής και της οικονομικής βιωσιμότητας του έργου.

Παράλληλα, εκπονούνται τοπογραφικές, γεωλογικές, γεωτεχνικές, υδρολογικές και περιβαλλοντικές μελέτες, οι οποίες αξιολογούν την καταλληλότητα της περιοχής και εντοπίζουν πιθανούς περιορισμούς. Ιδιαίτερη σημασία έχει η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, καθώς τα έργα αιολικής ενέργειας οφείλουν να διασφαλίζουν την προστασία της βιοποικιλότητας, των προστατευόμενων οικοσυστημάτων και των τοπικών χρήσεων γης.

Η ολοκλήρωση της αδειοδοτικής διαδικασίας αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη λήψη της τελικής επενδυτικής απόφασης και τη μετάβαση στη φάση υλοποίησης του έργου.

2.7 Φάση Μελέτης, Προμηθειών και Κατασκευής (Engineering - Procurement - Construction, EPC)

Μετά την ολοκλήρωση της ανάπτυξης και της αδειοδότησης ακολουθεί η φάση μελέτης, προμηθειών και κατασκευής, η οποία αποτελεί τον πυρήνα της υλοποίησης του έργου.

Η φάση της μελέτης (engineering) περιλαμβάνει την οριστική μελέτη εφαρμογής όλων των επιμέρους τεχνικών αντικειμένων. Στο στάδιο αυτό ολοκληρώνονται ο σχεδιασμός των θεμελιώσεων, του εσωτερικού οδικού δικτύου, των πλατειών ανέγερσης, του υπόγειου ηλεκτρικού δικτύου, του υποσταθμού, των συστημάτων γείωσης, καθώς και οι μελέτες ανύψωσης και εγκατάστασης των ανεμογεννητριών.

Η φάση των προμηθειών (procurement) αφορά τη διαχείριση των προμηθειών και των συμβάσεων. Περιλαμβάνει την επιλογή των προμηθευτών, τη διαπραγμάτευση των συμβάσεων, τον προγραμματισμό των παραδόσεων και τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η μεταφορά των κύριων εξαρτημάτων, όπως πύργοι, πτερύγια, άτρακτοι, μετασχηματιστές και άλλα, αποτελεί ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, καθώς πρόκειται για υπερμεγέθη φορτία που απαιτούν ειδικές άδειες μεταφοράς και εξειδικευμένο εξοπλισμό.

Η φάση της κατασκευής (construction) περιλαμβάνει όλες τις κατασκευαστικές δραστηριότητες του έργου. Οι βασικές εργασίες περιλαμβάνουν τη διάνοιξη και βελτίωση των οδών πρόσβασης, τη διαμόρφωση των πλατειών ανέγερσης, την κατασκευή των θεμελιώσεων, την εγκατάσταση του υπόγειου ηλεκτρικού δικτύου, την κατασκευή του

υποσταθμού, την ανύψωση και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών, καθώς και τις δοκιμές ολοκλήρωσης και διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Η επιτυχής διαχείριση της φάσης EPC απαιτεί αυστηρό συντονισμό μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών, αποτελεσματική παρακολούθηση της προόδου και έγκαιρη αντιμετώπιση αποκλίσεων από τον προγραμματισμό.

2.8 Εμπλεκόμενοι Φορείς (Stakeholders)

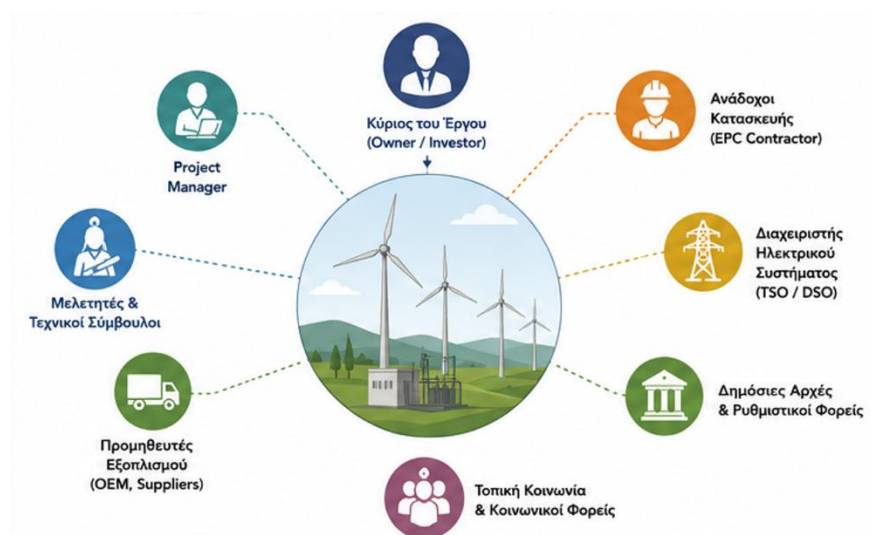
Η κατασκευή ενός αιολικού πάρκου προϋποθέτει τη συνεργασία μεγάλου αριθμού ενδιαφερόμενων μερών, τα οποία επηρεάζουν ή επηρεάζονται από την εξέλιξη του έργου.

Βασικός φορέας αποτελεί ο κύριος του έργου ή ο επενδυτής, ο οποίος καθορίζει τη στρατηγική, εξασφαλίζει τη χρηματοδότηση και λαμβάνει τις βασικές αποφάσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του έργου.

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν επίσης οι μελετητές και οι τεχνικοί σύμβουλοι, οι οποίοι αναλαμβάνουν τον σχεδιασμό των επιμέρους τεχνικών αντικειμένων, την εκπόνηση των απαιτούμενων μελετών και την τεχνική υποστήριξη του έργου.

Οι ανάδοχοι κατασκευής είναι υπεύθυνοι για την υλοποίηση των έργων πολιτικού μηχανικού, των ηλεκτρομηχανολογικών εγκαταστάσεων και της εγκατάστασης των ανεμογεννητριών. Παράλληλα, οι προμηθευτές διασφαλίζουν την έγκαιρη παράδοση του απαραίτητου εξοπλισμού.

Καθοριστικό ρόλο έχουν επίσης οι αρμόδιες δημόσιες αρχές, οι διαχειριστές του ηλεκτρικού συστήματος (ΑΔΜΗΕ), οι τοπικές κοινωνίες, καθώς και οι περιβαλλοντικοί φορείς.



Σχήμα 2: Βασικοί Εμπλεκόμενοι Φορείς (Stakeholders)

2.9 Τεχνικοί και Επιχειρησιακοί Κίνδυνοι

Παρότι τα αιολικά πάρκα ξεχωρίζουν για την αποδοτικότητα τους στην παραγωγή ενέργειας, κατά τη διαδικασία της κατασκευής χαρακτηρίζονται από υψηλό επίπεδο αβεβαιότητας και εκτίθενται σε πληθώρα τεχνικών, οικονομικών και οργανωτικών κινδύνων.

Σημαντική κατηγορία αποτελούν οι γεωτεχνικοί κίνδυνοι, οι οποίοι σχετίζονται με την ποιότητα του υπεδάφους και ενδέχεται να οδηγήσουν σε ανασχεδιασμό των θεμελιώσεων ή σε αυξημένο κόστος κατασκευής. Παράλληλα, οι δυσμενείς καιρικές συνθήκες, ιδιαίτερα οι ισχυροί άνεμοι, οι έντονες βροχοπτώσεις, οι χαμηλές, ακόμη και οι υψηλές θερμοκρασίες, μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την πρόοδο των εργασιών.

Ιδιαίτερη βαρύτητα παρουσιάζουν επίσης οι κίνδυνοι της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως καθυστερήσεις στην παραγωγή ή μεταφορά κρίσιμου εξοπλισμού, καθώς και οι διακυμάνσεις στις τιμές των πρώτων υλών και των υπηρεσιών μεταφοράς.

Επιπλέον, σημαντικοί οργανωτικοί κίνδυνοι προκύπτουν από ανεπαρκή συντονισμό μεταξύ εργολάβων, ελλιπή επικοινωνία, αλλαγές στο αντικείμενο του έργου και ανεπαρκή προγραμματισμό των διαθέσιμων πόρων.

Πίνακας 1: Ενδεικτικοί Τεχνικοί και Επιχειρησιακοί Κίνδυνοι

Κατηγορία Κινδύνου	Ενδεικτικός Κίνδυνος	Πιθανότητα	Επίπτωση	Επίπεδο Κινδύνου	Μέτρα Αντιμετώπισης
 Αδειοδοτικοί	Καθυστερήση αδειοδοτήσεων	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλό	Έγκαιρη προετοιμασία φακέλων και συνεχής επικοινωνία με τις αρχές
 Κλιματικοί	Ακραία καιρικά φαινόμενα	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλό	Δυναμικός επαναπρογραμματισμός εργασιών και πρόβλεψη εφεδρειών
 Εφοδιαστικής Αλυσίδας	Καθυστερήση παράδοσης ανεμογεννητριών	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλό	Συμβατικές ρήτρες, εναλλακτικό πλάνο προμηθειών
 Τεχνικοί	Γεωτεχνικά προβλήματα	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλό	Εκτεταμένες γεωτεχνικές έρευνες πριν την κατασκευή
 Υγείας & Ασφάλειας	Ατυχήματα προσωπικού	Χαμηλή	Πολύ Υψηλή	Υψηλό	Σχέδιο ΥΑΕ, εκπαίδευση και επιθεωρήσεις
 Οικονομικοί	Υπέρβαση κόστους	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλό	Cost Control, Earned Value Management και έλεγχος αλλαγών
 Οργανωτικοί	Καθυστερήσεις εργολάβων	Μέτρια	Υψηλή	Υψηλό	Weekly Planning, Last Planner System και KPI παρακολούθησης

● Χαμηλή
 ● Μέτρια
 ● Υψηλή
 ● Πολύ Υψηλή

2.10 Κρίσιμοι Παράγοντες Επιτυχίας και Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η διεθνής εμπειρία έχει αναδείξει ότι η επιτυχία των έργων αιολικών πάρκων εξαρτάται από έναν συνδυασμό τεχνικών, οργανωτικών και διοικητικών παραγόντων. Μεταξύ των σημαντικότερων συγκαταλέγονται ο ολοκληρωμένος

σχεδιασμός, η έγκαιρη ολοκλήρωση της αδειοδοτικής διαδικασίας, η αποτελεσματική διαχείριση των προμηθειών, η σωστή κατανομή των διαθέσιμων πόρων και η έγκαιρη αντιμετώπιση των κινδύνων.

Παράλληλα, η αξιοποίηση σύγχρονων ψηφιακών εργαλείων, όπως τα πληροφοριακά συστήματα διαχείρισης έργων και οι πλατφόρμες παρακολούθησης προόδου σε πραγματικό χρόνο, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του σχεδιασμού και της λήψης αποφάσεων.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε προκύπτει ότι η διαχείριση της κατασκευής αιολικών πάρκων αποτελεί μία ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία, στην οποία η επιτυχία δεν εξαρτάται αποκλειστικά από την τεχνική επάρκεια του σχεδιασμού, αλλά και από την αποτελεσματική οργάνωση, τον συντονισμό και τον έλεγχο όλων των φάσεων του έργου. Η πολυπλοκότητα των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, η εμπλοκή πολλών ενδιαφερόμενων μερών και η ανάγκη τήρησης αυστηρών περιορισμών κόστους, χρόνου και ποιότητας καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή προηγμένων συστημάτων διοίκησης έργων.

Στο πλαίσιο αυτό, οι αρχές του Lean Construction και τα εργαλεία των Project Controls μπορούν να υποστηρίξουν την αποτελεσματικότερη διαχείριση σύνθετων έργων αιολικής ενέργειας. Η θεωρητική ανάλυση των δύο αυτών προσεγγίσεων παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, με στόχο την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου εφαρμογής και την αξιολόγησή του μέσω της μελέτης περίπτωσης.

Κεφάλαιο 3: Διαχείριση Έργων (Project Management) και Συστήματα Ελέγχου Έργων (Project Controls) στα Κατασκευαστικά Έργα

3.1 Εισαγωγή

Η επιτυχής υλοποίηση σύγχρονων τεχνικών έργων προϋποθέτει την εφαρμογή ολοκληρωμένων πρακτικών διοίκησης, οι οποίες διασφαλίζουν τον αποτελεσματικό συντονισμό των διαθέσιμων πόρων, την ορθή διαχείριση του χρόνου και του κόστους, καθώς και την επίτευξη των προκαθορισμένων στόχων ποιότητας. Η συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα των έργων κατασκευής αιολικών πάρκων, η εμπλοκή πολλών ενδιαφερόμενων μερών (stakeholders), η ανάγκη συμμόρφωσης με αυστηρά κανονιστικά πλαίσια και η αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει το κατασκευαστικό περιβάλλον καθιστούν τη συστηματική εφαρμογή των αρχών της διαχείρισης έργων απαραίτητη προϋπόθεση για την επιτυχή ολοκλήρωση ενός έργου.

Η διαχείριση έργων αποτελεί ένα ολοκληρωμένο γνωστικό αντικείμενο που περιλαμβάνει τις διαδικασίες, τις τεχνικές και τις μεθοδολογίες που απαιτούνται για τον προγραμματισμό, την οργάνωση, την εκτέλεση, την παρακολούθηση και την ολοκλήρωση ενός έργου. Η συστηματική εφαρμογή, επιτρέπει τη σαφή οριοθέτηση του αντικειμένου του έργου, τον αποτελεσματικό συντονισμό των εμπλεκόμενων φορέων, την ορθολογική κατανομή των διαθέσιμων πόρων και τη συνεχή αξιολόγηση της προόδου σε σχέση με τους προκαθορισμένους στόχους. Παράλληλα, συμβάλλει στην έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων και στη λήψη διορθωτικών ενεργειών, ενισχύοντας την πιθανότητα επιτυχούς ολοκλήρωσης του έργου.

Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, η εξέλιξη των μεθοδολογιών διοίκησης έργων έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη εξειδικευμένων συστημάτων ελέγχου έργων, τα οποία επικεντρώνονται στον λεπτομερή προγραμματισμό, την παρακολούθηση και τον έλεγχο της απόδοσης ενός έργου μέσω ποσοτικών δεικτών και συστηματικών διαδικασιών μέτρησης. Τα συστήματα αυτά δεν περιορίζονται μόνο στην παρακολούθηση του χρονοδιαγράμματος και του κόστους, αλλά επεκτείνονται στη διαχείριση κινδύνων, στον έλεγχο αλλαγών, στη διαχείριση συμβάσεων, στην ανάλυση αποκλίσεων και στην παροχή έγκαιρης και αξιόπιστης πληροφόρησης προς τη διοίκηση του έργου. Με τον τρόπο αυτό αποτελούν βασικό μηχανισμό υποστήριξης της λήψης αποφάσεων και της επίτευξης των στρατηγικών στόχων του έργου.

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η παρουσίαση των βασικών αρχών της διαχείρισης και των συστημάτων ελέγχου έργων, καθώς και των σημαντικότερων εργαλείων που εφαρμόζονται στη διοίκηση κατασκευαστικών έργων. Η θεωρητική προσέγγιση που ακολουθεί αποτελεί το απαραίτητο υπόβαθρο για την κατανόηση της εφαρμογής των αρχών της λιτής κατασκευής (Lean Construction), οι οποίες αναλύονται στο επόμενο κεφάλαιο.

3.2 Έννοια και Αρχές της Διαχείρισης Έργων (Project Management)

Η διαχείριση έργων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους κλάδους της σύγχρονης διοίκησης επιχειρήσεων και οργανισμών, καθώς παρέχει το απαραίτητο θεωρητικό και πρακτικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό, την οργάνωση, την εκτέλεση και τον έλεγχο σύνθετων έργων. Η συνεχώς αυξανόμενη πολυπλοκότητα των τεχνικών έργων, η ανάγκη αποτελεσματικής αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων και η απαίτηση για έγκαιρη ολοκλήρωση των επενδύσεων την έχουν καταστήσει σε βασικό εργαλείο για την επιτυχή υλοποίηση έργων σε τομείς όπως οι κατασκευές, η ενέργεια, οι μεταφορές και η βιομηχανία.

Σύμφωνα με το Project Management Institute (PMI, 2021), έργο (project) ορίζεται ως μία προσωρινή προσπάθεια που αναλαμβάνεται με σκοπό τη δημιουργία ενός μοναδικού προϊόντος, υπηρεσίας ή αποτελέσματος. Η έννοια της προσωρινότητας υποδηλώνει ότι κάθε έργο διαθέτει συγκεκριμένη ημερομηνία έναρξης και ολοκλήρωσης, ενώ η μοναδικότητα αφορά το γεγονός ότι κάθε έργο παράγει ένα αποτέλεσμα το οποίο διαφέρει από προηγούμενα ή μελλοντικά έργα, ακόμη και όταν παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά.

Η διαχείριση έργου ορίζεται ως η εφαρμογή γνώσεων, δεξιοτήτων, εργαλείων και τεχνικών στις δραστηριότητες ενός έργου, με στόχο την επίτευξη των προκαθορισμένων απαιτήσεων και την ικανοποίηση των ενδιαφερόμενων μερών. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τον προγραμματισμό, την οργάνωση, την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τον συντονισμό όλων των διαθέσιμων πόρων, ώστε το έργο να ολοκληρωθεί εντός του συμφωνημένου χρονοδιαγράμματος, του προϋπολογισμού και των απαιτήσεων ποιότητας.

3.2.1 Θεμελιώδεις Αρχές του Project Management

Η αποτελεσματική διαχείριση έργων βασίζεται σε ένα σύνολο θεμελιωδών αρχών και πρακτικών που διασφαλίζουν την ομαλή εξέλιξη και επιτυχή ολοκλήρωση του έργου (Project Management Institute [PMI], 2021). Οι σημαντικότερες από αυτές είναι οι ακόλουθες:

- **Καθορισμός σαφών στόχων.** Κάθε έργο πρέπει να ξεκινά με τον ακριβή προσδιορισμό των στόχων, του φυσικού αντικειμένου και των αναμενόμενων αποτελεσμάτων. Η σαφής περιγραφή του αντικειμένου μειώνει την πιθανότητα παρερμηνειών και περιορίζει τις ανεξέλεγκτες αλλαγές κατά την υλοποίηση.
- **Ολοκληρωμένος σχεδιασμός.** Ο σχεδιασμός περιλαμβάνει τη διάσπαση του έργου σε επιμέρους δραστηριότητες, τον προγραμματισμό τους, την εκτίμηση της διάρκειας και του κόστους τους, καθώς και την κατανομή των απαιτούμενων πόρων. Εργαλεία όπως η Δομή Ανάλυσης Εργασιών (Work Breakdown Structure – WBS), τα διαγράμματα Gantt και η Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (Critical Path Method – CPM) αποτελούν βασικά μέσα υποστήριξης της διαδικασίας αυτής (ISO, 2018).
- **Οργάνωση και διαχείριση πόρων.** Η επιτυχία ενός έργου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή αξιοποίηση των ανθρώπινων πόρων, του εξοπλισμού, των υλικών και των οικονομικών μέσων. Η έγκαιρη διάθεση των απαραίτητων πόρων συμβάλλει στη μείωση καθυστερήσεων και στην αύξηση της παραγωγικότητας.
- **Συνεχής παρακολούθηση και έλεγχος.** Η πρόοδος του έργου πρέπει να παρακολουθείται διαρκώς μέσω δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs), συγκρίνοντας τα πραγματικά αποτελέσματα με το εγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα και τον προϋπολογισμό. Με τον τρόπο αυτό εντοπίζονται έγκαιρα αποκλίσεις και λαμβάνονται διορθωτικές ενέργειες.
- **Διαχείριση κινδύνων.** Κατά τη διάρκεια ενός έργου είναι πιθανό να προκύψουν τεχνικοί, οικονομικοί, περιβαλλοντικοί ή οργανωτικοί κίνδυνοι. Η αναγνώριση, αξιολόγηση και αντιμετώπισή τους αποτελεί βασικό στοιχείο της σύγχρονης διαχείρισης έργων.
- **Αποτελεσματική επικοινωνία.** Η συνεχής και έγκαιρη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ιδιοκτητών, εργολάβων, προμηθευτών, επιβλεπόντων μηχανικών και λοιπών εμπλεκομένων διασφαλίζει τον αποτελεσματικό συντονισμό των εργασιών και περιορίζει την πιθανότητα λαθών.

3.2.2 Ο Τριγωνικός Περιορισμός (Triple Constraint)

Σύμφωνα με τον Atkinson (1999), μία από τις σημαντικότερες θεωρητικές έννοιες της διαχείρισης έργων είναι ο Τριγωνικός Περιορισμός (Triple Constraint ή Iron Triangle). Το μοντέλο αυτό περιγράφει την αλληλεξάρτηση μεταξύ τριών βασικών παραμέτρων του έργου:

- Χρόνος

- Κόστος
- Πεδίο εφαρμογής ή φυσικό αντικείμενο

Οι τρεις αυτοί παράγοντες βρίσκονται σε συνεχή αλληλεπίδραση. Κάθε μεταβολή σε έναν από αυτούς επηρεάζει άμεσα τουλάχιστον έναν από τους υπόλοιπους. Για παράδειγμα, η μείωση του διαθέσιμου χρόνου ολοκλήρωσης συνήθως απαιτεί αύξηση των διαθέσιμων πόρων και συνεπώς αύξηση του κόστους. Αντίστοιχα, η επέκταση του φυσικού αντικειμένου χωρίς αναθεώρηση του χρονοδιαγράμματος ή του προϋπολογισμού οδηγεί σε αυξημένη πιθανότητα καθυστερήσεων ή υπέρβασης κόστους (Atkinson, 1999).

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, το παραδοσιακό τρίγωνο έχει επεκταθεί ώστε να συμπεριλαμβάνει πρόσθετες διαστάσεις, όπως η ποιότητα, η διαχείριση κινδύνων, η βιωσιμότητα, η ασφάλεια και η δημιουργία αξίας, αναγνωρίζοντας ότι η επιτυχία ενός έργου δεν αξιολογείται πλέον αποκλειστικά βάσει χρόνου και κόστους.

3.2.3 Ο Ρόλος του Project Manager

Ο Project Manager αποτελεί το κεντρικό πρόσωπο στη διοίκηση ενός έργου και είναι υπεύθυνος για τον συντονισμό όλων των εμπλεκόμενων, τη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων και την επίτευξη των στόχων του έργου. Οι βασικές αρμοδιότητές του περιλαμβάνουν τον προγραμματισμό των εργασιών, τη διαχείριση του προϋπολογισμού, την παρακολούθηση της προόδου, την αξιολόγηση των κινδύνων, τη λήψη διορθωτικών αποφάσεων και την αποτελεσματική επικοινωνία με τον πελάτη, τους προμηθευτές και τους υπεργολάβους.

Στα έργα εγκατάστασης ανεμογεννητριών, ο ρόλος του Project Manager αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς απαιτείται ο καθημερινός συντονισμός δραστηριοτήτων όπως η μεταφορά εξοπλισμού, η διαθεσιμότητα γερανών, οι εργασίες μηχανολογικής και ηλεκτρολογικής εγκατάστασης, οι δοκιμές λειτουργίας και η ενεργοποίηση των ανεμογεννητριών.

3.3 Γνωστικά Αντικείμενα του Project Management

3.3.1 Εισαγωγή

Η διαχείριση έργων εξελίχθηκε σημαντικά τις τελευταίες δεκαετίες, αντιστακώντας την αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων έργων. Για περισσότερα από είκοσι χρόνια, η πλέον διαδεδομένη προσέγγιση ήταν αυτή των Γνωστικών Αντικειμένων (Knowledge Areas), όπως παρουσιάζονταν στις προηγούμενες εκδόσεις του *Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)*. Η προσέγγιση αυτή οργανώνει τη διαχείριση έργων σε επιμέρους γνωστικά πεδία, καθένα από τα οποία περιλαμβάνει συγκεκριμένες διεργασίες, εργαλεία και τεχνικές (PMI, 2017).

Με νεότερες εκδόσεις το PMI υιοθέτησε μια περισσότερο ευέλικτη και προσανατολισμένη στην αξία φιλοσοφία, αντικαθιστώντας τις περιοχές γνώσης με δώδεκα αρχές (Principles) και οκτώ τομείς απόδοσης (Performance Domains) (PMI, 2021). Παρόλα αυτά, τα γνωστικά αντικείμενα (Knowledge Areas) εξακολουθούν να αποτελούν τη βάση εφαρμογής της διαχείρισης έργων σε πλήθος κατασκευαστικών οργανισμών και λογισμικών συστημάτων ελέγχου έργων (Project Controls), όπως τα Primavera P6 και Microsoft Project.

3.3.2 Διαχείριση Φυσικού Αντικειμένου (Scope Management)

Η διαχείριση φυσικού αντικείμενου αφορά τον καθορισμό, την τεκμηρίωση και τον έλεγχο όλων των εργασιών που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του έργου. Σκοπός της είναι να διασφαλίσει ότι εκτελείται μόνο το συμφωνημένο αντικείμενο, αποτρέποντας φαινόμενα ανεξέλεγκτης επέκτασης του έργου (PMI, 2017).

Στα έργα αιολικών πάρκων, η ορθή διαχείριση του φυσικού αντικείμενου είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς μεταβολές στις τεχνικές προδιαγραφές, στον αριθμό των ανεμογεννητριών ή στις απαιτήσεις του δικτύου μπορούν να επιφέρουν σημαντικές επιπτώσεις στο χρονοδιάγραμμα και στον προϋπολογισμό.

3.3.3 Διαχείριση Χρονοδιαγράμματος (Schedule Management)

Η διαχείριση χρονοδιαγράμματος περιλαμβάνει τον καθορισμό των δραστηριοτήτων, τη λογική αλληλουχία τους, την εκτίμηση διάρκειας και την ανάπτυξη του συνολικού προγράμματος του έργου (Kerzner, 2022).

Στην πράξη, το χρονοδιάγραμμα αποτελεί το βασικό εργαλείο διοίκησης ενός έργου, καθώς χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της προόδου, την αξιολόγηση καθυστερήσεων και τη λήψη διορθωτικών αποφάσεων. Η ανάπτυξη και ο έλεγχος του χρονοδιαγράμματος αποτελούν τον πυρήνα των σύγχρονων συστημάτων ελέγχου έργων (Project Controls).

3.3.4 Διαχείριση Κόστους (Cost Management)

Η διαχείριση κόστους περιλαμβάνει την εκτίμηση, τον προϋπολογισμό και τον συνεχή έλεγχο των οικονομικών πόρων του έργου (PMI, 2017).

Στόχος είναι η ολοκλήρωση του έργου εντός του εγκεκριμένου προϋπολογισμού, μέσω συνεχούς σύγκρισης μεταξύ προγραμματισμένου και πραγματικού κόστους.

3.3.5 Διαχείριση Ποιότητας (Quality Management)

Η διαχείριση ποιότητας αποσκοπεί στη διασφάλιση ότι το τελικό αποτέλεσμα συμμορφώνεται με τις συμβατικές και τεχνικές προδιαγραφές. Στα έργα αιολικών πάρκων, η ποιότητα δεν περιορίζεται στις επιθεωρήσεις κατά την εγκατάσταση, αλλά επεκτείνεται στον έλεγχο υλικών, στις δοκιμές λειτουργίας, στην τεκμηρίωση και στη συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα.

3.3.6 Διαχείριση Πόρων (Resource Management)

Η διαχείριση πόρων αφορά τόσο το ανθρώπινο δυναμικό όσο και τον απαιτούμενο εξοπλισμό, τα υλικά και τα οικονομικά μέσα. Στην εγκατάσταση ανεμογεννητριών περιλαμβάνει τον προγραμματισμό συνεργείων, γερανών, μεταφορών, εργαλείων και εξειδικευμένου προσωπικού, με στόχο τη μέγιστη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

3.3.7 Διαχείριση Επικοινωνιών (Communications Management)

Η αποτελεσματική επικοινωνία αποτελεί προϋπόθεση επιτυχούς διαχείρισης έργων. Η διαχείριση επικοινωνίας περιλαμβάνει τον καθορισμό των πληροφοριών που απαιτούνται από κάθε ενδιαφερόμενο μέρος, τον τρόπο διανομής τους και τη συχνότητα ενημέρωσης. Σε μεγάλα έργα υποδομών, η σαφής επικοινωνία περιορίζει τις καθυστερήσεις και τις αστοχίες συντονισμού.

3.3.8 Διαχείριση Κινδύνων (Risk Management)

Η διαχείριση κινδύνων περιλαμβάνει την αναγνώριση, ανάλυση, αξιολόγηση και αντιμετώπιση όλων των αβεβαιοτήτων που ενδέχεται να επηρεάσουν το έργο (ISO, 2018). Στα έργα αιολικών πάρκων, συνηθέστεροι κίνδυνοι όπως δυσμενείς καιρικές συνθήκες, καθυστερήσεις μεταφορών, έλλειψη εξοπλισμού, τεχνικές αστοχίες, αλλαγές σχεδιασμού, θέματα υγείας και ασφάλειας μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ομαλή εξέλιξη και την έγκαιρη ολοκλήρωση του έργου.

3.3.9 Διαχείριση Προμηθειών (Procurement Management)

Η Διαχείριση Προμηθειών αφορά τον σχεδιασμό, τη σύναψη και τη διοίκηση συμβάσεων με προμηθευτές και υπεργολάβους.

Η επιτυχής λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την τήρηση του χρονοδιαγράμματος, ιδιαίτερα όταν απαιτούνται ειδικές μεταφορές και εξειδικευμένος εξοπλισμός.

3.3.10 Διαχείριση Ενδιαφερομένων Μερών (Stakeholder Management)

Η Διαχείριση Ενδιαφερομένων Μερών στοχεύει στην αναγνώριση όλων των φορέων που επηρεάζουν ή επηρεάζονται από το έργο και στη διατήρηση της ενεργού συμμετοχής τους.

Στα έργα αιολικών πάρκων, τα βασικά ενδιαφερόμενα μέρη περιλαμβάνουν τον κύριο του έργου, τους κύριους αναδόχους, όπως τον κατασκευαστή των ανεμογεννητριών και τους αναδόχους των έργων διάνοιξης και οδοποιίας, θεμελιώσεων και εγκατάστασης του δικτύου μέσης τάσης, τους υπεργολάβους, τον διαχειριστή του ηλεκτρικού δικτύου και τις αρμόδιες αρχές.

3.4 Συστήματα Ελέγχου Έργων (Project Controls)

3.4.1 Ορισμός των Συστημάτων Ελέγχου

Τα συστήματα ελέγχου έργων αποτελούν ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαδικασιών, μεθοδολογιών και εργαλείων που χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό, την παρακολούθηση, τη μέτρηση και τον έλεγχο της απόδοσης ενός έργου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του (AACE International, 2020).

Ο βασικός σκοπός τους είναι η παροχή αξιόπιστης πληροφόρησης σχετικά με την πραγματική κατάσταση ενός έργου, έτσι ώστε η διοίκηση να μπορεί να λαμβάνει έγκαιρες και τεκμηριωμένες αποφάσεις. Μέσω της συλλογής και ανάλυσης δεδομένων σχετικά με το κόστος, τον χρόνο, την πρόοδο και τους κινδύνους, τα συτήματα αυτά επιτρέπουν την αναγνώριση αποκλίσεων από το αρχικό σχέδιο και την εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών (PMI, 2021).

Σύμφωνα με τον Kerzner (2022), η αποτελεσματική διαχείριση έργων απαιτεί ένα σύστημα ελέγχου που να παρέχει συνεχή ενημέρωση σχετικά με την πραγματική απόδοση του έργου σε σχέση με τους προκαθορισμένους στόχους.

Τα βασικά στοιχεία που παρακολουθούνται μέσω των συστημάτων ελέγχου, περιλαμβάνουν:

- το χρονοδιάγραμμα (schedule)
- το κόστος (cost)
- το αντικείμενο του έργου (scope)
- τους διαθέσιμους πόρους (resources)
- τους κινδύνους (risks)

Η ολοκληρωμένη παρακολούθηση αυτών των παραμέτρων είναι ιδιαίτερα σημαντική σε σύνθετα κατασκευαστικά έργα, όπου οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ δραστηριοτήτων μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές επιπτώσεις στην τελική απόδοση του έργου (Nicholas & Steyn, 2020).

3.4.2 Στόχοι των Συστημάτων Ελέγχου

Ο κύριος στόχος τους είναι η διατήρηση του έργου εντός των εγκεκριμένων ορίων ως προς τον χρόνο, το κόστος και το αντικείμενο εργασιών (PMI, 2021).

Ένας από τους σημαντικότερους στόχους είναι η έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων. Μέσω της σύγκρισης μεταξύ της εγκεκριμένης βάσης αναφοράς (Baseline) και της πραγματικής προόδου, μπορούν να εντοπιστούν πιθανές καθυστερήσεις ή υπερβάσεις κόστους πριν επηρεάσουν σημαντικά την ολοκλήρωση του έργου (Kerzner, 2022).

Παράλληλα, υποστηρίζουν τη διαδικασία λήψης αποφάσεων μέσω της παραγωγής αναφορών, δεικτών απόδοσης και προβλέψεων. Η ύπαρξη αξιόπιστων δεδομένων επιτρέπει στον Project Manager να αξιολογεί εναλλακτικά σενάρια και να εφαρμόζει διορθωτικές ενέργειες (Meredith et al., 2021).

Ένας ακόμη σημαντικός στόχος είναι η βελτιστοποίηση της χρήσης των διαθέσιμων πόρων. Σε κατασκευαστικά έργα μεγάλης κλίμακας, η αποτελεσματική διαχείριση ανθρώπινου δυναμικού, εξοπλισμού και υλικών επηρεάζει άμεσα την παραγωγικότητα και το τελικό κόστος του έργου (Nicholas & Steyn, 2020).

3.4.3 Εξέλιξη των Συστημάτων Ελέγχου

Η ανάπτυξη των συστημάτων ελέγχου συνδέεται άμεσα με την αύξηση της πολυπλοκότητας των σύγχρονων έργων. Στις αρχικές μορφές διαχείρισης έργων, ο έλεγχος περιοριζόταν κυρίως στην παρακολούθηση του χρονοδιαγράμματος μέσω απλών εργαλείων, όπως τα διαγράμματα Gantt (Kerzner, 2022).

Ωστόσο, η ανάγκη για καλύτερο οικονομικό έλεγχο και ακριβέστερη πρόβλεψη οδήγησε στην ανάπτυξη πιο προηγμένων μεθόδων, όπως η Διαχείριση Δεδουλευμένης Αξίας (Earned Value Management - EVM), η οποία συνδυάζει πληροφορίες κόστους και χρόνου για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός έργου (Fleming & Koppelman, 2016).

Η σύγχρονη αντίληψη των συστημάτων ελέγχου περιλαμβάνει πλέον:

- ολοκληρωμένη διαχείριση χρονοδιαγράμματος

- έλεγχο κόστους
- διαχείριση κινδύνων
- ανάλυση απόδοσης
- ψηφιακή παρακολούθηση δεδομένων

Η εξέλιξη των ψηφιακών τεχνολογιών έχει ενισχύσει περαιτέρω τις δυνατότητες μέσω αυτοματοποιημένης συλλογής δεδομένων, πληροφοριακών συστημάτων και εργαλείων ανάλυσης απόδοσης (AACE International, 2020).

3.4.4 Διαφορά μεταξύ Διαχείρισης Έργων (Project Management) και Συστημάτων Ελέγχου Έργων (Project Controls)

Η διαχείριση αποτελεί τη συνολική διαδικασία σχεδιασμού, οργάνωσης, εκτέλεσης και ολοκλήρωσης ενός έργου, ενώ τα συστήματα ελέγχου υποστηρίζουν αυτή τη διαδικασία.

Σύμφωνα με τους Meredith et al. (2021), ο Project Manager έχει την ευθύνη για τη συνολική επιτυχία του έργου, ενώ τα Project Controls παρέχουν τα απαραίτητα δεδομένα για την αξιολόγηση της πραγματικής κατάστασης και τη λήψη αποφάσεων.

3.4.5 Συμπεράσματα

Τα συστήματα ελέγχου αποτελούν θεμελιώδες στοιχείο της σύγχρονης διαχείρισης έργων, καθώς παρέχουν το απαραίτητο πλαίσιο για τη συνεχή παρακολούθηση και τον έλεγχο της απόδοσης ενός έργου.

Η εφαρμογή τους επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση προβλημάτων, τη βελτιστοποίηση πόρων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Ιδιαίτερα στα έργα ανάπτυξης αιολικών πάρκων αποτελούν κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας.

3.5 Βασικά Συστήματα Προγραμματισμού και Ελέγχου Έργου

Η αποτελεσματική εφαρμογή των συστημάτων ελέγχου στα κατασκευαστικά έργα προϋποθέτει την ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου συστήματος δομών, διαδικασιών και εργαλείων, μέσω των οποίων το έργο μπορεί να σχεδιαστεί, να προϋπολογιστεί, να παρακολουθηθεί και να ελεγχθεί. Τα συστήματα αυτά δεν λειτουργούν ως ανεξάρτητα εργαλεία, αλλά ως αλληλοσυνδεδεμένα στοιχεία ενός ενιαίου πλαισίου, το οποίο συνδέει το αντικείμενο του έργου με τον χρόνο, το κόστος, τους πόρους και τις οργανωτικές ευθύνες.

Κεντρική αρχή αποτελεί η δημιουργία μιας κοινής δομής αναφοράς, η οποία επιτρέπει σε όλα τα εμπλεκόμενα μέρη να χρησιμοποιούν την ίδια «γλώσσα» κατά την παρακολούθηση της προόδου. Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στα σύνθετα κατασκευαστικά έργα, όπου συμμετέχουν διαφορετικές οργανωτικές μονάδες, εργολάβοι, υπεργολάβοι, προμηθευτές και τεχνικές ομάδες.

Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύσσονται παρακάτω τα βασικά δομικά στοιχεία ενός ολοκληρωμένου συστήματος. Η διασύνδεσή τους επιτρέπει την ενοποιημένη παρακολούθηση του φυσικού αντικείμενου, του προϋπολογισμού, του χρονοδιαγράμματος και της πραγματικής απόδοσης του έργου. Η NASA, για παράδειγμα, αντιμετωπίζει τη σύνδεση WBS, OBS, RAM και Control Accounts ως θεμελιώδη μηχανισμό για την ανάθεση ευθύνης και τη μέτρηση της απόδοσης (NASA, 2019).

3.5.1 Δομή Ανάλυσης Εργασιών - Work Breakdown Structure (WBS)

Η δομή ανάλυσης εργασιών (WBS) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία. Πρόκειται για μια ιεραρχική αποδόμηση του συνολικού αντικειμένου ενός έργου σε μικρότερα και περισσότερο διαχειρίσιμα στοιχεία εργασίας. Η λογική της WBS είναι να μετατρέψει ένα σύνθετο έργο σε επιμέρους παραδοτέα και ομάδες εργασιών, οι οποίες μπορούν να προγραμματιστούν, να κοστολογηθούν, να ανατεθούν σε υπεύθυνους και να παρακολουθούνται.

Σύμφωνα με PMI (1994), η WBS δεν αποτελεί απλώς έναν κατάλογο δραστηριοτήτων. Αντίθετα, επικεντρώνεται κυρίως στο τι πρέπει να παραχθεί ή να ολοκληρωθεί στο πλαίσιο του έργου και όχι στο πώς ή πότε θα πραγματοποιηθεί. Επιπροσθέτως, οργανώνει και ορίζει το συνολικό αντικείμενο του έργου και αποτελεί κοινό πλαίσιο αναφοράς για τον σχεδιασμό, την ανάθεση ευθυνών, την παρακολούθηση και τον έλεγχο.

Η ανάπτυξη της WBS πραγματοποιείται συνήθως από το ανώτερο επίπεδο του έργου προς χαμηλότερα επίπεδα ανάλυσης. Ένα τυπικό παράδειγμα για ένα έργο αιολικού πάρκου μπορεί να είναι:

- Αιολικό Πάρκο
 - Μελέτη και Αδειοδότηση
 - Διαχείριση Έργου
 - Τεχνικός Σχεδιασμός
 - Προμήθεια Εξαρτημάτων και Υλικών
 - Πολιτικά Έργα (Οδοποιία, Θεμελίωση, κλπ)
 - Ηλεκτρολογικά Έργα (Υποσταθμός, Σταθμοί διασύνδεσης/σύζευξης, Εγκατάσταση δικτύου μέσης τάσης, Εγκατάσταση δικτύου επικοινωνιών, κλπ)
 - Μεταφορά Εξοπλισμού
 - Εγκατάσταση Ανεμογεννητριών
 - Θέση σε λειτουργία (Commissioning)
 - Παράδοση Έργου

Κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω. Για παράδειγμα, η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να διαχωριστεί σε:

- Προετοιμασία θέσης εγκατάστασης
- Παραλαβή και έλεγχο εξοπλισμού
- Εγκατάσταση τμημάτων πύλων (Tower sections)
- Εγκατάσταση Νασέλας/Ατράκτου (Nacelle)
- Εγκατάσταση Συστήματος μετάδοσης ισχύος (Drivetrain)
- Εγκατάσταση Πλήμνης (Hub)
- Εγκατάσταση Πτερυγίων (Blades)
- Μηχανολογικές εργασίες
- Ηλεκτρολογικές συνδέσεις/εργασίες
- Δοκιμές / Έλεγχος (Commissioning)
- Θέση σε λειτουργία (Commissioning)

Η περαιτέρω αποδόμηση συνεχίζεται μέχρι το επίπεδο στο οποίο η εργασία μπορεί να εκτιμηθεί, να προγραμματιστεί, να ανατεθεί και να ελεγχθεί αποτελεσματικά. Σύμφωνα με τη NASA (2019), η WBS αποτελεί κοινό σημείο αναφοράς για όλα τα στοιχεία ενός έργου και συνδέεται άμεσα με τον προγραμματισμό, το κόστος, τη διαχείριση κινδύνων και τη μέτρηση της απόδοσης. Η WBS αποτελεί, επομένως, το θεμέλιο πάνω στο οποίο μπορούν να αναπτυχθούν το χρονοδιάγραμμα, ο προϋπολογισμός και το σύστημα μέτρησης απόδοσης.

3.5.2 Οργανωτική Δομή Ανάλυσης - Organizational Breakdown Structure (OBS)

Η οργανωτική δομή ανάλυσης αποτελεί την οργανωτική συμπληρωματική δομή της WBS. Ενώ η WBS απαντά στο ερώτημα «τι πρέπει να γίνει;», η OBS απαντά στο ερώτημα «ποιος είναι υπεύθυνος για την εκτέλεσή του;».

Η OBS παρουσιάζει την οργανωτική διάρθρωση του έργου και αποτυπώνει τις ομάδες, τα τμήματα, τους διευθυντές έργου (project managers), τους διευθυντές εργοταξίου (site managers), τους μηχανικούς και επιβλέποντες μηχανικούς έργου (engineering and supervision dept.), τους εργολάβους και υπεργολάβους (contractors and subcontractors), τους υπόλοιπους οργανωτικούς φορείς που συμμετέχουν στην υλοποίηση.

Σε ένα έργο αιολικού πάρκου, για παράδειγμα, η OBS μπορεί να περιλαμβάνει:

- Διεύθυνση Έργου (Project Management)
- Τεχνικός Σχεδιασμός (Engineering)
- Προμήθεια (Procurement)
- Εφοδιαστική Διαχείριση (Logistics)
- Εγκατάσταση/Κατασκευή (Construction)
 - Διεύθυνση Εργοταξίου (Site Managers)
- Διαχείριση Υγείας, Ασφάλειας και Περιβάλλοντος (HSE Management)
- Διαχείριση Ποιότητας
 - Επίβλεψη Εργασιών (Mechanical and Electrical Engineers)
- Ομάδα Ελέγχου/Θέσης σε Λειτουργία (Commissioning)
- Εργολάβοι/Υπεργολάβοι (Contractors/Subcontractors)

Η χρησιμότητα της OBS δεν περιορίζεται στην απεικόνιση της οργανωτικής δομής. Αποτελεί βασικό μηχανισμό για την κατανομή ευθυνών και την ενσωμάτωση της οργανωτικής διάστασης στο σύστημα ελέγχου του έργου. Η σύνδεση της OBS με τη WBS επιτρέπει τον προσδιορισμό του οργανωτικού φορέα που είναι υπεύθυνος για κάθε επιμέρους τμήμα του αντικειμένου.

3.5.3 Δομή Ανάλυσης Κόστους - Cost Breakdown Structure (CBS)

Η δομή ανάλυσης κόστους αποτελεί τη δομή μέσω της οποίας οργανώνεται και αναλύεται το κόστος του έργου σε επιμέρους κατηγορίες. Σκοπός της είναι να επιτρέψει την αντιστοίχιση των προϋπολογισμένων και πραγματικών δαπανών με συγκεκριμένα στοιχεία του έργου.

Η CBS μπορεί να περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, κόστη κύριων και επιμέρους εργασιών, υλικών, εξοπλισμού, ανυψωτικών μηχανημάτων, μεταφορών κύριων εξαρτημάτων, όπως επίσης και κόστη προσωπικού, υπεργολάβων, προμηθευτών, γενικά έξοδα, διοικητικά κόστη κ.α..

Η δομή αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν συνδέεται με τη δομή ανάλυσης εργασιών (WBS) μέσω ενός κοινού συστήματος κωδικοποίησης ή συστήματος κωδικοποίησης κόστους. Με αυτόν τον τρόπο, μια συγκεκριμένη δαπάνη μπορεί να αντιστοιχηθεί τόσο στο αντικείμενο εργασίας στο οποίο αφορά όσο και στην αντίστοιχη κατηγορία κόστους. Η AACE International (2020), υπογραμμίζει τη σημασία της κωδικοποίησης και της σύνδεσης των δομών έργου και πόρων για τη δημιουργία ενός συνεκτικού συστήματος διαχείρισης κόστους.

Για ένα αιολικό πάρκο, για παράδειγμα, το κόστος εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να αναλυθεί σε:

- Εγκατάσταση ανεμογεννήτριας
 - Υπεργολάβος (Εγκατάσταση και Η/Μ εργασίες)
 - Κύριος και βοηθητικοί γερανοί
 - Εργατικό δυναμικό

→ Υλικά και αναλώσιμα

Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να εντοπίσει όχι μόνο ότι το κόστος εγκατάστασης αυξήθηκε, αλλά και σε ποιο τμήμα της εργασίας και για ποια κατηγορία δαπάνης εμφανίζεται η απόκλιση.

3.5.4 Πίνακας Ανάθεσης Αρμοδιοτήτων - Responsibility Assignment Matrix (RAM)

Ο πίνακας ανάθεσης αρμοδιοτήτων αποτελεί το εργαλείο που συνδέει τη WBS με την OBS και αποτυπώνει με σαφήνεια την ευθύνη για κάθε τμήμα του αντικειμένου του έργου.

Η RAM μπορεί να θεωρηθεί ως ένας πίνακας όπου:

- Οι γραμμές αντιπροσωπεύουν στοιχεία της WBS
- Οι στήλες αντιπροσωπεύουν οργανωτικές μονάδες ή υπευθύνους
- Τα σημεία τομής προσδιορίζουν την ευθύνη

Η RAM μπορεί επίσης να αναπτυχθεί με τη λογική RACI:

- Responsible – Υπεύθυνος για την εκτέλεση της εργασίας
- Accountable – Τελικός υπεύθυνος
- Consulted – Παρέχει συμβουλή/τεχνική ή άλλη υποστήριξη
- Informed – Ενημερώνεται για την πορεία εξέλιξης και το αποτέλεσμα μιας εργασίας

Στο ακόλουθο παράδειγμα πίνακα ανάθεσης αρμοδιοτήτων (RACI), που αφορά έργο εγκατάστασης αιολικού πάρκου, παρουσιάζονται οι βασικές εργασίες του έργου και προσδιορίζεται η κατανομή των αρμοδιοτήτων μεταξύ των εμπλεκόμενων οργανωτικών μονάδων και ρόλων.

Πίνακας 2: Παράδειγμα Πίνακα RAM (RACI Matrix)

Εργασία (WBS)	Οργανωτικές Μονάδες / Ρόλοι Έργου								
	Διεύθυνση Έργου (Project Management)	Τεχνικός Σχεδιασμός (Engineering)	Προμήθεια (Procurement)	Εφοδιαστική Διαχείριση (Logistics)	Διεύθυνση Εργοταξίου (Site Managers)	Υγεία, Ασφάλεια και Περιβάλλον (HSE Management)	Επιβλέψη Εργασιών (Mechanical and Electrical Engineers)	Έλεγχος/Θέση σε Λειτουργία (Commissioning)	Εργολάβοι/ Υπεργολάβοι (Contractors/ Subcontractors)
Μελέτη και Αδειοδότηση	I	I	I	I	I	I	I	I	I
Διαχείριση Έργου	A	C	I	C	C	I	I	I	I
Τεχνικός Σχεδιασμός	C	A	C	C	I	I	I	I	I
Προμήθεια Εξαρτημάτων και Υλικών	C	C	A	I	C	I	I	I	R
Πολιτικά Έργα	I	A	I	I	R	C	C	I	R
Ηλεκτρολογικά Έργα	I	C	I	I	A	C	C	C	R
Μεταφορά Εξοπλισμού	C	I	I	A	R	C	C	I	R
Εγκατάσταση Ανεμογεννητριών	I	C	I	I	A	C	C	I	R
Θέση σε λειτουργία	C	R	I	I	A	C	C	R	I
Παράδοση Έργου	A	C	C	C	R	C	R	C	I

Υπόμνημα (RACI)
R - Responsible (Υπεύθυνος για την εκτέλεση)
A - Accountable (Τελικός υπεύθυνος)
C - Consulted (Παρέχει συμβουλή/υποστήριξη)
I - Informed (Ενημερώνεται)

3.5.5 Λογαριασμοί Ελέγχου - Control Accounts (CA)

Οι λογαριασμοί ελέγχου αποτελούν βασικό στοιχείο και χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του αντικειμένου, του χρονοδιαγράμματος και του κόστους ενός έργου σε συγκεκριμένα σημεία ευθύνης. Συνήθως αποτελούν το σημείο σύνδεσης μεταξύ της WBS και της OBS, επιτρέποντας την ανάθεση ευθύνης και τη μέτρηση της απόδοσης του έργου.

Σύμφωνα με τη NASA (2021), οι λογαριασμοί ελέγχου ορίζονται ως το σημείο στο οποίο η ευθύνη για την εργασία ανατίθεται σε συγκεκριμένη οργανωτική μονάδα και όπου συγκρίνονται ο προγραμματισμένος προϋπολογισμός, το πραγματικό κόστος και η κερδηθείσα αξία (earned value).

Ακόμη μπορούν να αναλυθούν περαιτέρω σε πακέτα εργασίας (Work Packages – WP), τα οποία αποτελούν μικρότερες μονάδες εργασίας στις οποίες πραγματοποιείται η λεπτομερής παρακολούθηση της προόδου και του κόστους.

3.5.6 Διαχείριση Γραμμών Αναφοράς - Baseline Management

Η διαχείριση γραμμών αναφοράς αφορά τη δημιουργία, έγκριση, διατήρηση και ελεγχόμενη τροποποίηση των βασικών σημείων αναφοράς έναντι των οποίων αξιολογείται η πραγματική απόδοση του έργου. Διακρίνονται κυρίως σε:

1. Γραμμή Αναφοράς Αντικειμένου του Έργου (Scope Baseline)
2. Γραμμή Αναφοράς Χρονοδιαγράμματος (Schedule Baseline)
3. Γραμμή Αναφοράς Κόστους (Cost Baseline)
4. Γραμμή Αναφοράς Μέτρησης Απόδοσης (Performance Measurement Baseline – PMB)

Η Γραμμή Αναφοράς Αντικειμένου του Έργου (Scope Baseline) καθορίζει το εγκεκριμένο αντικείμενο του έργου. Η Γραμμή Αναφοράς Χρονοδιαγράμματος (Schedule Baseline) αποτυπώνει το εγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα, ενώ η Γραμμή Αναφοράς Κόστους (Cost Baseline) αποτυπώνει το εγκεκριμένο κόστος. Η ενοποίηση των χρονικών και οικονομικών διαστάσεων οδηγεί στη Γραμμή Αναφοράς Μέτρησης Απόδοσης (Performance Measurement Baseline – PMB), η οποία αποτελεί τη βάση για τη μέτρηση της απόδοσης του έργου.

Η διατήρηση της γραμμής αναφοράς είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ένα έργο μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής του. Ωστόσο, οι αλλαγές δεν θα πρέπει να μεταβάλλουν ανεξέλεγκτα τη βάση σύγκρισης. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται το φαινόμενο κατά το οποίο η γραμμή αναφοράς τροποποιείται εκ των υστέρων με τρόπο που αποκρύπτει τις πραγματικές αποκλίσεις του έργου.

3.5.7 Εφαρμογή στα έργα εγκατάστασης αιολικών πάρκων

Η εφαρμογή των παραπάνω συστημάτων αποκτά ιδιαίτερη σημασία στα έργα εγκατάστασης αιολικών πάρκων, λόγω της σύνθετης αλληλεξάρτησης μεταξύ τεχνικών εργασιών, εφοδιαστικής αλυσίδας, διαθέσιμου εξοπλισμού, καιρικών συνθηκών, υπεργολάβων και περιορισμών ασφαλείας.

Για παράδειγμα, η δραστηριότητα Εγκατάσταση Ανεμογεννήτριας μπορεί να αποτελεί στοιχείο της δομής ανάλυσης εργασιών (WBS) και να συνδέεται, μέσω του πίνακα ανάθεσης αρμοδιοτήτων (RAM), με τον διευθυντή εργοταξίου (Site Manager) και την ομάδα εγκατάστασης (Subcontractor). Σε επίπεδο λογαριασμού ελέγχου (CA) μπορούν να συγκεντρωθούν οι απαιτούμενοι πόροι, ο απαιτούμενος χρόνος και ο προϋπολογισμός της συγκεκριμένης δραστηριότητας.

Με τον τρόπο αυτό, μια καθυστέρηση στην παράδοση ενός βασικού εξαρτήματος μπορεί να συνδεθεί με συγκεκριμένο στοιχείο της δομής ανάλυσης εργασιών, υπεύθυνο οργανωτική μονάδα και λογαριασμό ελέγχου (CA). Παράλληλα, η επίδραση της καθυστέρησης στο χρονοδιάγραμμα και στο κόστος μπορεί να παρακολουθείται σε σύγκριση με την εγκεκριμένη γραμμή αναφοράς (Baseline).

3.6 Προγραμματισμός Έργου

Μέσω του προγραμματισμού προσδιορίζονται οι εργασίες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του έργου, η διάρκειά τους, οι μεταξύ τους αλληλεξαρτήσεις, τα βασικά ορόσημα (Milestones) και οι απαιτούμενοι πόροι.

Η σημασία του προγραμματισμού είναι ιδιαίτερα αυξημένη στα κατασκευαστικά έργα και ειδικότερα στην κατασκευή αιολικών πάρκων, όπου ένας μεγάλος αριθμός τεχνικών, εφοδιαστικών και οργανωτικών δραστηριοτήτων πρέπει να συντονιστεί μέσα σε συγκεκριμένα χρονικά περιθώρια. Η κατασκευή οδών πρόσβασης και πλατειών γερανών, η ολοκλήρωση των θεμελιώσεων, η μεταφορά των κύριων εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών, η κινητοποίηση των γερανών, η κύρια εγκατάσταση, οι ηλεκτρομηχανολογικές εργασίες, η σύνδεση με το δίκτυο και η θέση σε λειτουργία της ανεμογεννήτριας χαρακτηρίζονται από ισχυρές μεταξύ τους εξαρτήσεις.

Ο προγραμματισμός δεν πρέπει συνεπώς να αντιμετωπίζεται αποκλειστικά ως μία διαδικασία παρουσίασης ημερομηνιών μέσω ενός διαγράμματος Gantt. Αντίθετα, αποτελεί ένα δυναμικό χρονικό μοντέλο του έργου, μέσω του οποίου μπορούν να αναλυθούν οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των δραστηριοτήτων, να αναγνωριστούν οι χρονικά κρίσιμες εργασίες και να αξιολογηθούν οι επιπτώσεις πιθανών καθυστερήσεων.

3.6.1 Βασικές Αρχές και Ανάπτυξη Χρονοδιαγράμματος

Η ανάπτυξη του χρονοδιαγράμματος βασίζεται στη σταδιακή μετατροπή του φυσικού αντικείμενου του έργου σε προγραμματιζόμενες δραστηριότητες. Σύμφωνα με PMI (2019), για κάθε δραστηριότητα προσδιορίζονται η διάρκεια, οι λογικές σχέσεις με άλλες δραστηριότητες, οι απαιτούμενοι πόροι και τυχόν χρονικοί περιορισμοί.

Οι βασικότερες σχέσεις μεταξύ δραστηριοτήτων είναι οι Finish-to-Start (FS), Start-to-Start (SS), Finish-to-Finish (FF) και Start-to-Finish (SF).

Σε ένα έργο αιολικού πάρκου, για παράδειγμα, η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας προϋποθέτει την ολοκλήρωση μιας σειράς προηγούμενων δραστηριοτήτων, όπως η κατασκευή και αποδέσμευση της θεμελίωσης, η ετοιμότητα της πλατείας γερανού και η διαθεσιμότητα των απαιτούμενων εξαρτημάτων. Μετά την ολοκλήρωση της κύριας εγκατάστασης ακολουθούν οι μηχανολογικές, ηλεκτρολογικές εργασίες και η θέση σε λειτουργία. Η σωστή αποτύπωση αυτών των σχέσεων επιτρέπει στο χρονοδιάγραμμα να αναπαριστά την πραγματική κατασκευαστική διαδικασία και όχι απλώς ένα σύνολο προγραμματισμένων ημερομηνιών. Η αξιοπιστία του χρονοδιαγράμματος είναι επομένως καθοριστική για τον συντονισμό των διαφορετικών εμπλεκόμενων μερών και την έγκαιρη αναγνώριση πιθανών αποκλίσεων.

3.6.2 Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής – Critical Path Method (CPM)

Μία από τις σημαντικότερες τεχνικές προγραμματισμού είναι η Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (Critical Path Method - CPM). Η μέθοδος προσδιορίζει τη χρονικά κρίσιμη αλληλουχία δραστηριοτήτων του έργου και επιτρέπει την εκτίμηση της συνολικής διάρκειάς του. Οι δραστηριότητες της κρίσιμης διαδρομής απαιτούν ιδιαίτερη παρακολούθηση, καθώς

καθυστερήσεις σε αυτές μπορούν να επηρεάσουν άμεσα την ημερομηνία ολοκλήρωσης του έργου, εφόσον δεν υπάρχει διαθέσιμο χρονικό περιθώριο

Συναφής έννοια είναι το χρονικό περιθώριο, το οποίο εκφράζει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο μία δραστηριότητα μπορεί να μετακινηθεί χωρίς να επηρεάσει συγκεκριμένα χρονικά σημεία του έργου. Η ανάλυση της κρίσιμης διαδρομής και των διαθέσιμων χρονικών περιθωρίων υποστηρίζει, επομένως, την ιεράρχηση των δραστηριοτήτων που απαιτούν αυξημένη διοικητική προσοχή.

Για κάθε δραστηριότητα μπορούν να υπολογιστούν οι χρόνοι Early Start (ES), Early Finish (EF), Late Start (LS) και Late Finish (LF). Από αυτούς προκύπτει το Total Float (TF), δηλαδή το χρονικό περιθώριο κατά το οποίο μία δραστηριότητα μπορεί να καθυστερήσει χωρίς να επηρεάσει την αντίστοιχη καθορισμένη ημερομηνία ολοκλήρωσης του προγράμματος:

$$TF = LS - ES = LF - EF$$

Σε ένα αιολικό έργο, για παράδειγμα, μία καθυστέρηση στην ολοκλήρωση της πλατείας του κύριου γερανού μπορεί αρχικά να απορροφηθεί από το διαθέσιμο περιθώριο. Εφόσον όμως το περιθώριο αυτό εξαντληθεί, η συγκεκριμένη δραστηριότητα μπορεί να καταστεί κρίσιμη και να επηρεάσει την έναρξη της κύριας εγκατάστασης. Εάν η εγκατάσταση συνδέεται στη συνέχεια με συγκεκριμένα ορόσημα (milestones), η αρχική καθυστέρηση μπορεί να μεταφερθεί μέχρι την τελική ημερομηνία ολοκλήρωσης.

Η CPM επομένως δεν αποτελεί απλώς μία μαθηματική τεχνική υπολογισμού της διάρκειας, αλλά έναν σημαντικό μηχανισμό έγκαιρης αναγνώρισης χρονικών κινδύνων και υποστήριξης διοικητικών αποφάσεων.

3.6.3 Τεχνική Αξιολόγησης και Αναθεώρησης Προγράμματος - Program Evaluation and Review Technique (PERT)

Η τεχνική αξιολόγησης και αναθεώρησης προγράμματος (PERT) χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου υπάρχει σημαντική αβεβαιότητα ως προς τη διάρκεια των δραστηριοτήτων. Η μέθοδος αυτή βασίζεται σε περισσότερες από μία εκτιμήσεις διάρκειας ώστε να ενσωματώνεται η αβεβαιότητα στον χρονικό προγραμματισμό.

Στην κατασκευή αιολικών πάρκων η προσέγγιση αυτή μπορεί να είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε δραστηριότητες που επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ανυψώσεις κύριων εξαρτημάτων και ειδικότερα η εγκατάσταση πτερυγίων, όπου η εκτέλεση εξαρτάται από συγκεκριμένα όρια ταχύτητας ανέμου. Αντίστοιχη αβεβαιότητα μπορεί να εμφανιστεί στις μεταφορές υπερμεγεθών φορτίων, σε διαδικασίες αδειοδότησης, σε εργασίες σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο ή σε τεχνικές διορθωτικές ενέργειες.

3.6.4 Μέθοδος Κρίσιμης Αλυσίδας - Critical Chain Method (CCM)

Η μέθοδος κρίσιμης αλυσίδας (CCM) επεκτείνει τη λογική του χρονικού προγραμματισμού δίνοντας μεγαλύτερη έμφαση στους περιορισμούς που προκύπτουν από τη διαθεσιμότητα των πόρων.

Σε αντίθεση με τη CPM, η οποία επικεντρώνεται πρωτίτως στις λογικές σχέσεις των δραστηριοτήτων, η CCM εξετάζει παράλληλα τις εξαρτήσεις που δημιουργούνται από περιορισμένους πόρους.

Σε έργα εγκατάστασης ανεμογεννητριών, ένας κύριος γερανός μεγάλης ανυψωτικής ικανότητας, για παράδειγμα, μπορεί να εξυπηρετεί μόνο μία συγκεκριμένη ακολουθία εγκαταστάσεων κάθε χρονική στιγμή. Αντίστοιχα, η περιορισμένη διαθεσιμότητα εξειδικευμένων ομάδων εγκατάστασης μπορεί να αποτελέσει περιοριστικό παράγοντα για την εξέλιξη του έργου, ακόμη και όταν τα αντίστοιχα μέτωπα εργασίας είναι τεχνικά έτοιμα προς εκτέλεση.

3.6.5 Ορόσημα (Milestones) και Βασικά Σημεία Ελέγχου

Τα ορόσημα αποτελούν σημαντικά γεγονότα ή σημεία ελέγχου του έργου, τα οποία χρησιμοποιούνται για την αποτύπωση σημαντικών γεγονότων ή σημείων ελέγχου, όπως η ολοκλήρωση μιας κύριας φάσης του έργου.

Στην περίπτωση ενός αιολικού πάρκου, ενδεικτικά ορόσημα μπορούν να είναι η ολοκλήρωση των θεμελιώσεων, η ετοιμότητα των πλατειών γερανών, η παράδοση των κύριων εξαρτημάτων, η έναρξη και ολοκλήρωση της κύριας εγκατάστασης, η πρώτη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η προσωρινή ή τελική παραλαβή του έργου.

Ιδιαίτερη σημασία έχουν τα συμβατικά ορόσημα (contractual milestones), καθώς μπορεί να συνδέονται με πληρωμές, συμβατικές υποχρεώσεις, προσυμφωνημένες αποζημιώσεις ή άλλους όρους της σύμβασης. Για τον λόγο αυτό, η παρακολούθησή τους αποτελεί σημαντικό κομμάτι της διαχείρισης του εκάστοτε έργου.

3.6.6 Παρακολούθηση και Έλεγχος Χρονοδιαγράμματος

Η αξία του χρονοδιαγράμματος δεν περιορίζεται στην αρχική ανάπτυξή του. Κατά τη φάση εκτέλεσης απαιτείται συστηματική ενημέρωση με πραγματικά δεδομένα προόδου, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση της προγραμματισμένης με την πραγματική εξέλιξη του έργου.

Η σύγκριση με τη γραμμή αναφοράς χρονοδιαγράμματος (Schedule Baseline) επιτρέπει την αναγνώριση χρονικών αποκλίσεων και την αξιολόγηση της επίδρασής τους στην κρίσιμη διαδρομή και στα βασικά ορόσημα του έργου. Παράλληλα, η επικαιροποίηση του χρονοδιαγράμματος παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης προβλέψεων σχετικά με τις μελλοντικές ημερομηνίες ολοκλήρωσης των δραστηριοτήτων και του έργου συνολικά.

Ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός (Look-Ahead Planning) εστιάζει στις δραστηριότητες των επόμενων εβδομάδων και επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση περιορισμών που ενδέχεται να εμποδίσουν την εκτέλεσή τους. Η λογική αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία στο πλαίσιο της Λιτής Κατασκευής (Lean Construction) και του συστήματος Last Planner, τα οποία αναπτύσσονται στο επόμενο κεφάλαιο.

Στα έργα αιολικών πάρκων, η συνεχής παρακολούθηση του χρονοδιαγράμματος είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς καθυστερήσεις σε μία δραστηριότητα μπορούν να μεταφερθούν στις επόμενες φάσεις. Για παράδειγμα, καθυστέρηση στην ολοκλήρωση των υποδομών ή στην παράδοση βασικών εξαρτημάτων μπορεί να επηρεάσει την κινητοποίηση του κύριου γερανού, την εγκατάσταση των ανεμογεννητριών και κατ'επέκταση, τις επόμενες φάσεις του έργου. Συνεπώς, το χρονοδιάγραμμα λειτουργεί ως δυναμικό εργαλείο σχεδιασμού, παρακολούθησης και πρόβλεψης, αποτελώντας βασικό στοιχείο ενός ολοκληρωμένου συστήματος Project Controls.

3.6.7 Παρακολούθηση αποκλίσεων και πρόβλεψη ολοκλήρωσης

Η ουσιαστική αξία του προγραμματισμού στο πλαίσιο των συστημάτων ελέγχου δεν βρίσκεται μόνο στον αρχικό σχεδιασμό, αλλά κυρίως στη δυνατότητα έγκαιρης αναγνώρισης αποκλίσεων και πρόβλεψης της τελικής χρονικής απόδοσης. Η σύγκριση μεταξύ προγραμματισμού και πραγματικής προόδου επιτρέπει στην ομάδα έργου να αξιολογήσει όχι μόνο αν μία δραστηριότητα έχει καθυστερήσει, αλλά και αν η καθυστέρηση αυτή επηρεάζει την κρίσιμη διαδρομή (critical path) ή κάποιο σημαντικό ορόσημο (milestone).

Για παράδειγμα, μία καθυστέρηση στην παράδοση ενός κύριου εξαρτήματος ανεμογεννήτριας δεν συνεπάγεται απαραίτητα αντίστοιχη καθυστέρηση της συνολικής ημερομηνίας ολοκλήρωσης. Η πραγματική επίπτωση εξαρτάται από

τη θέση της δραστηριότητας στο χρονοδιάγραμμα, το διαθέσιμο χρονικό περιθώριο (TF), τη δυνατότητα αλλαγής της σειράς εγκατάστασης και τη διαθεσιμότητα των απαιτούμενων πόρων.

Υπό αυτή την έννοια, το χρονοδιάγραμμα λειτουργεί ως ένα σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης, επιτρέποντας στη διοίκηση του έργου να παρέμβει πριν μία επιμέρους απόκλιση εξελιχθεί σε συνολική καθυστέρηση.

3.7 Έλεγχος Χρονοδιαγράμματος και Κόστους (Schedule and Cost Control)

Ο έλεγχος χρονοδιαγράμματος και κόστους αποτελεί βασική λειτουργία των συστημάτων ελέγχου έργων και αποσκοπεί στη συστηματική παρακολούθηση της απόδοσης ενός έργου σε σχέση με τον εγκεκριμένο χρονικό και οικονομικό σχεδιασμό. Η αποτελεσματική διαχείριση ενός έργου δεν περιορίζεται στην κατάρτιση ενός χρονοδιαγράμματος και ενός προϋπολογισμού, αλλά απαιτεί συνεχή σύγκριση της πραγματικής απόδοσης με τις αντίστοιχες γραμμές αναφοράς, αναγνώριση αποκλίσεων και πρόβλεψη της πιθανής τελικής έκβασης του έργου (PMI, 2021).

Ο χρόνος και το κόστος παρουσιάζουν ισχυρή αλληλεξάρτηση. Μία χρονική καθυστέρηση μπορεί να αυξήσει το κόστος λόγω παράτασης της χρήσης εξοπλισμού, παραμονής προσωπικού και υπερβολών στο έργο ή πρόσθετων γενικών εξόδων. Αντίστοιχα, μία προσπάθεια επιτάχυνσης του προγράμματος μπορεί να απαιτήσει πρόσθετους πόρους, υπερωρίες ή επιπλέον εξοπλισμό.

Μία από τις σημαντικότερες μεθόδους που επιτρέπουν την ενοποιημένη παρακολούθηση των δύο αυτών διαστάσεων είναι η Διαχείριση Δεδουλευμένης Αξίας (Earned Value Management - EVM).

3.7.1 Διαχείριση Δεδουλευμένης Αξίας - Earned Value Management (EVM)

Η Earned Value Management (EVM) αποτελεί μία δομημένη μέθοδο μέτρησης της απόδοσης του έργου, η οποία ενσωματώνει το φυσικό αντικείμενο, το χρονοδιάγραμμα και το κόστος σε ένα κοινό σύστημα ελέγχου. Βασικό πλεονέκτημά της είναι ότι δεν εξετάζει μόνο πόσα χρήματα έχουν δαπανηθεί ή πόσος χρόνος έχει παρέλθει, αλλά συσχετίζει τις δαπάνες αυτές με την ποσότητα του έργου που έχει πραγματικά ολοκληρωθεί.

Η εφαρμογή της EVM βασίζεται σε τρεις θεμελιώδεις μεταβλητές:

- Planned Value (PV): Η εγκεκριμένη αξία του έργου που είχε προγραμματιστεί να ολοκληρωθεί μέχρι μία συγκεκριμένη ημερομηνία.
- Earned Value (EV): Η εγκεκριμένη προϋπολογισμένη αξία της εργασίας που έχει πράγματι ολοκληρωθεί μέχρι την ημερομηνία αναφοράς.
- Actual Cost (AC): Το πραγματικό κόστος που έχει πραγματοποιηθεί για την εκτέλεση της συγκεκριμένης εργασίας.

Για παράδειγμα, εάν σύμφωνα με τον προγραμματισμό μέχρι μία συγκεκριμένη ημερομηνία θα έπρεπε να έχει ολοκληρωθεί εργασία αξίας 1.000.000 €, αλλά η εργασία που έχει πραγματικά ολοκληρωθεί αντιστοιχεί σε προϋπολογισμένη αξία 800.000 €, ενώ έχουν ήδη δαπανηθεί 900.000 €, τότε:

$$PV = 1.000.000 \text{ €}$$

$$EV = 800.000 \text{ €}$$

$$AC = 900.000 \text{ €}$$

Ήδη από τα μεγέθη αυτά προκύπτει ότι το έργο έχει ολοκληρώσει λιγότερη εργασία από την προγραμματισμένη, ενώ ταυτόχρονα το πραγματικό κόστος της εργασίας υπερβαίνει την αξία που έχει παραχθεί. Η μέτρηση αυτών των αποκλίσεων πραγματοποιείται κυρίως μέσω των δεικτών SPI και CPI.

3.7.2 Δείκτης Απόδοσης Χρονοδιαγράμματος - Schedule Performance Index (SPI)

Ο δείκτης απόδοσης χρονοδιαγράμματος (SPI) χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της χρονικής απόδοσης του έργου και υπολογίζεται ως ο λόγος της δεδουλευμένης αξίας προς την προγραμματισμένη αξία:

$$SPI = EV / PV$$

Η ερμηνεία του δείκτη είναι:

$SPI = 1,00$: η πρόοδος είναι σύμφωνη με τον προγραμματισμό,

$SPI > 1,00$: έχει παραχθεί περισσότερη εργασία από την προγραμματισμένη,

$SPI < 1,00$: έχει παραχθεί λιγότερη εργασία από την προγραμματισμένη.

Στο προηγούμενο παράδειγμα:

$$SPI = 800.000 / 1.000.000 = 0,80$$

Το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι, από πλευράς δεδουλευμένης αξίας, το έργο έχει επιτύχει περίπου το 80% της προγραμματισμένης προόδου μέχρι τη συγκεκριμένη ημερομηνία.

Ο SPI αποτελεί χρήσιμο δείκτη έγκαιρης αναγνώρισης αποκλίσεων, αλλά δεν πρέπει να χρησιμοποιείται απομονωμένα για την πρόβλεψη της τελικής ημερομηνίας ολοκλήρωσης. Η χρονική κατάσταση πρέπει να εξετάζεται παράλληλα με το ενημερωμένο χρονοδιάγραμμα, την κρίσιμη διαδρομή και το χρονικό διαθέσιμο των δραστηριοτήτων (PMI, 2019).

3.7.3 Δείκτης Απόδοσης Κόστους - Cost Performance Index (CPI).

Ο Cost Performance Index (CPI) μετρά την οικονομική αποδοτικότητα της εκτέλεσης και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$CPI = EV / AC$$

Η ερμηνεία του είναι:

$CPI = 1,00$: το κόστος βρίσκεται σε συμφωνία με την παραγόμενη αξία,

$CPI > 1,00$: η οικονομική απόδοση είναι καλύτερη από την προγραμματισμένη,

$CPI < 1,00$: το έργο παρουσιάζει δυσμενή απόκλιση κόστους.

Για τα δεδομένα του προηγούμενου παραδείγματος:

$$CPI = 800.000 / 900.000 = 0,89$$

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι για κάθε 1,00 € πραγματικού κόστους, παράγεται περίπου 0,89 € προϋπολογισμένης αξίας εργασίας. Επομένως, η οικονομική απόδοση του έργου είναι χαμηλότερη από την προβλεπόμενη.

Η ταυτόχρονη εξέταση των SPI και CPI παρέχει μία συνοπτική εικόνα της κατάστασης. Για παράδειγμα, όταν $SPI < 1$ και $CPI < 1$, το έργο παρουσιάζει ταυτόχρονα δυσμενή απόδοση τόσο ως προς την προγραμματισμένη πρόοδο όσο και ως προς το κόστος.

Στην περίπτωση κατασκευής ενός αιολικού πάρκου, μία τέτοια κατάσταση θα μπορούσε να προκύψει από καθυστερήσεις στις εργασίες εγκατάστασης σε συνδυασμό με παρατεταμένη παραμονή του κύριου γερανού και των ομάδων εγκατάστασης στο εργοτάξιο. Η πραγματική πρόοδος θα ήταν μικρότερη από την προγραμματισμένη, ενώ παράλληλα το πραγματικό κόστος θα συνέχιζε να αυξάνεται.

3.7.4 Απόκλιση Χρονοδιαγράμματος - Schedule Variance (SV) και Απόκλιση Κόστους - Cost Variance (CV).

Εκτός από τους δείκτες απόδοσης, η EVM επιτρέπει τον υπολογισμό των αποκλίσεων του έργου σε απόλυτες τιμές.

Η Schedule Variance (SV) υπολογίζεται ως:

$$SV = EV - PV$$

ενώ η Cost Variance (CV) ως:

$$CV = EV - AC$$

Για το προηγούμενο παράδειγμα:

$$SV = 800.000 - 1.000.000 = -200.000 \text{ €}$$

και

$$CV = 800.000 - 900.000 = -100.000 \text{ €}$$

Οι αρνητικές τιμές υποδηλώνουν δυσμενή απόκλιση τόσο ως προς την προγραμματισμένη πρόοδο όσο και ως προς το κόστος. Πρέπει ωστόσο να διευκρινιστεί ότι η SV εκφράζεται σε νομισματικές μονάδες αξίας εργασίας και όχι σε μονάδες χρόνου. Για τον πραγματικό χρονικό προσδιορισμό της καθυστέρησης απαιτείται παράλληλη ανάλυση του χρονοδιαγράμματος.

3.7.5 Εκτίμηση Κόστους κατά την Ολοκλήρωση - Estimate at Completion (EAC).

Η EVM δεν χρησιμοποιείται μόνο για την αξιολόγηση της υφιστάμενης κατάστασης, αλλά και για την ανάπτυξη προβλέψεων σχετικά με το τελικό κόστος. Η εκτίμηση κόστους κατά την ολοκλήρωση (EAC) αντιπροσωπεύει την εκτιμώμενη συνολική δαπάνη του έργου κατά την ολοκλήρωσή του.

Μία από τις συνηθέστερες σχέσεις είναι:

$$EAC = BAC / CPI$$

[όπου BAC (Budget at Completion): ο συνολικός εγκεκριμένος προϋπολογισμός]

Η συγκεκριμένη σχέση χρησιμοποιείται όταν θεωρείται ότι η μέχρι σήμερα οικονομική απόδοση θα συνεχιστεί και στο υπόλοιπο του έργου.

Εάν, για παράδειγμα:

$$BAC = 5.000.000 \text{ €}$$

και

$$CPI = 0,89$$

τότε:

$$EAC = 5.000.000 / 0,89 \approx 5.617.978 \text{ €}$$

Η πρόβλεψη υποδηλώνει ότι, εάν η υφιστάμενη τάση κόστους συνεχιστεί, το έργο ενδέχεται να ολοκληρωθεί περίπου **618.000 €** πάνω από τον αρχικό προϋπολογισμό.

3.7.6 Εκτίμηση Κόστους για την Ολοκλήρωση - Estimate to Complete (ETC).

Η εκτίμηση κόστους για την ολοκλήρωση (ETC) εκφράζει το εκτιμώμενο πρόσθετο κόστος που απαιτείται από την ημερομηνία αναφοράς μέχρι την ολοκλήρωση του έργου. Όταν έχει ήδη υπολογιστεί το EAC, μπορεί να προσδιοριστεί ως:

$$ETC = EAC - AC$$

Για παράδειγμα, εάν το προβλεπόμενο τελικό κόστος είναι:

$$EAC = 5.617.978 \text{ €}$$

και μέχρι σήμερα έχουν πραγματοποιηθεί:

$$AC = 2.000.000 \text{ €}$$

τότε:

$$ETC = 5.617.978 - 2.000.000 = 3.617.978 \text{ €}$$

Το ETC αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό μέγεθος για την πρόβλεψη του κόστους, καθώς επιτρέπει στην ομάδα έργου να εκτιμήσει τις χρηματοδοτικές ανάγκες που απομένουν μέχρι την ολοκλήρωση του έργου.

3.7.7 Εφαρμογή του ελέγχου χρόνου και κόστους στα έργα αιολικών πάρκων

Η ολοκληρωμένη παρακολούθηση χρόνου και κόστους αποκτά ιδιαίτερη σημασία στην κατασκευή αιολικών πάρκων, λόγω του υψηλού κόστους του εξοπλισμού, της απασχόλησης εξειδικευμένων συνεργείων και της χρήσης βαρέων ανυψωτικών μέσων. Καθυστερήσεις που οφείλονται σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες, προβλήματα κατά τη μεταφορά των κύριων εξαρτημάτων, καθυστερημένες παραδόσεις υλικών και εξοπλισμού, τεχνικές αστοχίες ή περιορισμένη διαθεσιμότητα κρίσιμων πόρων μπορούν να προκαλέσουν ταυτόχρονα χρονικές και οικονομικές επιπτώσεις στο έργο.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η αδυναμία πραγματοποίησης μιας προγραμματισμένης ανύψωσης λόγω υψηλών ταχυτήτων ανέμου. Η φυσική πρόοδος μπορεί να παραμείνει στάσιμη, ενώ το κόστος του κύριου γερανού, των συνεργείων και άλλων πόρων εξακολουθεί να επιβαρύνει το έργο. Η κατάσταση αυτή μπορεί να οδηγήσει ταυτόχρονα σε μείωση των δεικτών SPI και CPI.

Η χρήση των EVM, SPI, CPI, EAC και ETC επιτρέπει επομένως τη μετάβαση από μία απλή καταγραφή της προόδου σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα μέτρησης και πρόβλεψης της απόδοσης. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η έγκαιρη αναγνώριση των τάσεων. Ένα μεμονωμένο αρνητικό αποτέλεσμα δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το έργο θα αποτύχει ως προς τους τελικούς του στόχους. Η συνεχής όμως επιδείνωση των δεικτών σε διαδοχικές περιόδους αναφοράς αποτελεί ένδειξη ότι απαιτείται διερεύνηση των αιτιών και εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών.

Ο έλεγχος χρόνου και κόστους συνεπώς δεν πρέπει να λειτουργεί αποκλειστικά ως μηχανισμός αναφοράς προόδου, αλλά ως εργαλείο έγκαιρης προειδοποίησης και λήψης αποφάσεων. Η συστηματική σύγκριση της πραγματικής απόδοσης με τις εγκεκριμένες γραμμές αναφοράς, σε συνδυασμό με την ανάλυση των τάσεων και την ανάπτυξη αξιόπιστων προβλέψεων, επιτρέπει στην ομάδα έργου να αναγνωρίζει έγκαιρα πιθανές υπερβάσεις και να εφαρμόζει τις κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες.

3.8 Διαχείριση Κινδύνων - Project Risk Management

Η διαχείριση κινδύνων αποτελεί θεμελιώδη λειτουργία της διοίκησης ενός έργου, καθώς κάθε έργο εκτελείται υπό συνθήκες αβεβαιότητας. Τεχνικοί, οικονομικοί, συμβατικοί, οργανωτικοί και εξωτερικοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την επίτευξη των στόχων του έργου ως προς τον χρόνο, το κόστος, την ποιότητα και το φυσικό αντικείμενο. Συνεπώς, η συστηματική αναγνώριση και διαχείριση των κινδύνων αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη διαμόρφωση ρεαλιστικών προβλέψεων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Το ISO 31000 αντιμετωπίζει τη διαχείριση κινδύνου ως οργανωμένη διαδικασία αναγνώρισης, ανάλυσης, αξιολόγησης, αντιμετώπισης, παρακολούθησης και επικοινωνίας του κινδύνου.

Ο κίνδυνος δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται αποκλειστικά ως απειλή. Στη σύγχρονη προσέγγιση της διοίκησης έργων, η αβεβαιότητα μπορεί να δημιουργήσει τόσο αρνητικές επιπτώσεις όσο και θετικές επιπτώσεις ή ευκαιρίες. Στόχος της διαχείρισης κινδύνων είναι επομένως να περιοριστεί η έκθεση του έργου σε δυσμενή γεγονότα και, όπου είναι δυνατόν, να αξιοποιηθούν οι ευκαιρίες που μπορούν να βελτιώσουν την απόδοσή του (PMI, 2021).

Στα έργα κατασκευής αιολικών πάρκων η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα έντονη. Οι εργασίες εκτελούνται σε διαφορετικά γεωγραφικά σημεία, εξαρτώνται από σύνθετες αλυσίδες εφοδιασμού και περιλαμβάνουν τη χρήση

εξειδικευμένου εξοπλισμού και μεγάλων ανυψωτικών μηχανημάτων. Παράλληλα, δραστηριότητες όπως η μεταφορά κύριων εξαρτημάτων και η εγκατάσταση πτερυγίων, μπορούν να επηρεαστούν σημαντικά από καιρικές συνθήκες, καθυστερήσεις προμηθευτών, τεχνικές αστοχίες και εξωτερικές εγκρίσεις.

3.8.1 Αναγνώριση Κινδύνων - Risk Identification

Η αναγνώριση κινδύνων αποτελεί το πρώτο στάδιο της διαδικασίας και αποσκοπεί στον συστηματικό εντοπισμό γεγονότων ή συνθηκών που μπορούν να επηρεάσουν τους στόχους του έργου. Η διαδικασία δεν πραγματοποιείται μόνο κατά την έναρξη, αλλά επαναλαμβάνεται καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής, καθώς οι συνθήκες και η έκθεση του έργου μεταβάλλονται συνεχώς.

Η αναγνώριση μπορεί να βασιστεί σε διαφορετικές πηγές πληροφοριών, όπως προηγούμενα έργα, τεχνική εμπειρία, συνεντεύξεις με ειδικούς, συμβατικά έγγραφα, χρονοδιαγράμματα και στοιχεία προμηθειών.

Η ανάλυση κινδύνων συνδέεται με τη WBS και επιτρέπει την αντιστοίχιση των κινδύνων με συγκεκριμένες περιοχές του φυσικού αντικειμένου και διευκολύνει την ανάθεση ευθύνης για την παρακολούθησή τους.

Σε ένα έργο κατασκευής αιολικού πάρκου, ενδεικτικές κατηγορίες κινδύνου μπορεί να είναι:

A/A	Κατηγορία κινδύνου		Υποθετικός κίνδυνος (παρουσία στο έργο)
1		Καθυστερήσεις στην παράδοση ανεμογεννητριών ή άλλων κρίσιμων υλικών	✓
2		Προβλήματα στις μεταφορές υπερμεγεθών φορτίων	✓
3		Δυσμενείς καιρικές συνθήκες	✓
4		Περιορισμένη διαθεσιμότητα κύριου ή βοηθητικών γερανών	✓
5		Τεχνικές αστοχίες ή ελλείψεις εξοπλισμού	✓
6		Καθυστερήσεις σε έργα υποδομής και πλατείες εγκατάστασης γερανών	✓
7		Καθυστερήσεις στη σύνδεση και ενεργοποίηση του ηλεκτρικού δικτύου	✓
8		Ζητήματα ποιότητας και επανεργασίες	✓
9		Ατυχήματα ή περιορισμοί HSE	✓
10		Μεταβολές του φυσικού αντικειμένου και συμβατικές διαφορές	✓

Σχήμα 3: Ενδεικτικές κατηγορίες κινδύνου σε έργο κατασκευής αιολικού πάρκου

Η αναγνώριση πρέπει να είναι όσο το δυνατόν συγκεκριμένη. Αντί για μία γενική καταγραφή όπως «κίνδυνος καθυστέρησης εγκατάστασης», είναι προτιμότερο να αποτυπώνεται σαφώς η αιτία, το πιθανό γεγονός και η επίπτωσή του. Με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται τόσο η αξιολόγηση όσο και ο σχεδιασμός κατάλληλων ενεργειών αντιμετώπισης.

3.8.2 Ποιοτική Ανάλυση Κινδύνων - Qualitative Risk Analysis

Μετά την αναγνώριση ακολουθεί η ποιοτική ανάλυση κινδύνων, μέσω της οποίας οι κίνδυνοι αξιολογούνται και ιεραρχούνται ανάλογα με τη σχετική τους σημασία. Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση βασίζεται στον συνδυασμό της πιθανότητας εμφάνισης και της επίπτωσης κάθε κινδύνου.

Η ποιοτική αξιολόγηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη διότι επιτρέπει στην ομάδα του έργου να επικεντρώσει τους διαθέσιμους πόρους στους σημαντικότερους κινδύνους, αντί να αντιμετωπίζει όλους τους καταγεγραμμένους κινδύνους με την ίδια ένταση. Η ιεράρχηση με προκαθορισμένες κλίμακες πιθανότητας και επίπτωσης αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της ποιοτικής ανάλυσης κινδύνων.

3.8.3 Ποσοτική Ανάλυση Κινδύνων - Quantitative Risk Analysis

Για τους σημαντικότερους κινδύνους μπορεί να ακολουθήσει ποσοτική ανάλυση. Σε αυτή την περίπτωση η πιθανότητα και οι επιπτώσεις μετατρέπονται σε αριθμητικά μεγέθη, ώστε να αξιολογηθεί η συνολική επίδραση της αβεβαιότητας στο κόστος ή στο χρονοδιάγραμμα του έργου.

3.8.4 Μητρώο Κινδύνων - Risk Register

Το βασικό εργαλείο καταγραφής και παρακολούθησης αποτελεί το μητρώο κινδύνων. Πρόκειται για ένα δυναμικό αρχείο στο οποίο συγκεντρώνονται οι αναγνωρισμένοι κίνδυνοι και οι βασικές πληροφορίες που απαιτούνται για τη διαχείρισή τους. Το μητρώο κινδύνων αποτελεί ένα βασικό αποτέλεσμα της διαδικασίας αναγνώρισης και μπορεί να περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, περιγραφή του κινδύνου, χρονικό ορίζοντα και υπεύθυνο διαχείρισης.

Για κάθε κίνδυνο δύναται να ορίζεται υπεύθυνος, ανεξάρτητα από τον Τεχνικό Ασφαλείας του εργοταξίου, ο οποίος αναλαμβάνει την παρακολούθησή του και τον συντονισμό της εφαρμογής των συμφωνημένων ενεργειών αντιμετώπισης. Το μητρώο κινδύνων πρέπει να επικαιροποιείται περιοδικά, καθώς νέοι κίνδυνοι εμφανίζονται, υφιστάμενοι μεταβάλλονται και άλλοι παύουν να είναι ενεργοί.

Η σημασία του δεν βρίσκεται επομένως στην απλή δημιουργία ενός καταλόγου κινδύνων, αλλά στη χρήση του ως ενεργού εργαλείου διοίκησης. Κατά τις περιοδικές συναντήσεις του έργου μπορούν να εξετάζονται οι σημαντικότεροι κίνδυνοι, η εξέλιξη της έκθεσης, η κατάσταση των μέτρων αποτροπής και η εμφάνιση νέων απειλών.

3.8.5 Στρατηγικές Αντιμετώπισης

Η αναγνώριση και η αξιολόγηση των κινδύνων δεν έχουν πρακτική αξία εάν δεν οδηγούν σε συγκεκριμένες ενέργειες. Για κάθε σημαντικό κίνδυνο πρέπει επομένως να προσδιορίζεται κατάλληλη στρατηγική αντιμετώπισης.

Στην περίπτωση ενός αιολικού πάρκου, για παράδειγμα, ο κίνδυνος καθυστερημένης παράδοσης ενός κρίσιμου ανυψωτικού εξοπλισμού μπορεί να περιοριστεί μέσω έγκαιρης παραγγελίας, ύπαρξης εναλλακτικού προμηθευτή ή διατήρησης κατάλληλου εφεδρικού εξοπλισμού.

Η επιλογή της κατάλληλης απόκρισης πρέπει να λαμβάνει υπόψη όχι μόνο το μέγεθος του κινδύνου αλλά και το κόστος της ίδιας της αντιμετώπισης. Δεν είναι οικονομικά ορθολογικό να δαπανάται για μετριασμό κινδύνου, ποσό δυσανάλογο προς τη σοβαρότητα και την οικονομική έκθεση που δημιουργεί ο ίδιος ο κίνδυνος.

Η διαχείριση κινδύνων πρέπει να συνδέεται άμεσα με το χρονοδιάγραμμα, τον έλεγχο του κόστους και τον προγραμματισμό. Ένας κίνδυνος δεν πρέπει να παραμένει ως απομονωμένη εγγραφή στο μητρώο κινδύνων, αλλά να εξετάζεται ως προς την πιθανή επίδρασή του σε συγκεκριμένες δραστηριότητες, ορόσημα, πόρους και οικονομικά μεγέθη.

3.9 Ψηφιακά Εργαλεία Συστημάτων Ελέγχου Έργων

Η διαχείριση μεγάλου αριθμού δραστηριοτήτων, πόρων, οικονομικών δεδομένων, κινδύνων και δεικτών απόδοσης απαιτεί πληροφοριακά συστήματα που επιτρέπουν τη συστηματική συλλογή, επεξεργασία, ανάλυση και παρουσίαση των δεδομένων του έργου.

Στο πλαίσιο των συστημάτων ελέγχου, διαφορετικά εργαλεία εξυπηρετούν διαφορετικές λειτουργίες. Εφαρμογές όπως το Primavera P6 και το Microsoft Project χρησιμοποιούνται κυρίως για τον χρονικό προγραμματισμό και την παρακολούθηση της προόδου, ενώ εργαλεία Business Intelligence, όπως το Power BI, μετατρέπουν δεδομένα από διαφορετικές πηγές σε αναφορές και διαδραστικούς πίνακες ελέγχου. Παράλληλα, η εφαρμογή της Μοντελοποίησης Πληροφοριών Κατασκευής (BIM) επιτρέπει τη σύνδεση του τρισδιάστατου μοντέλου με πληροφορίες χρόνου και κόστους, δημιουργώντας τις έννοιες του 4D και 5D BIM (Autodesk, χ.χ.).

Η αξία των ψηφιακών εργαλείων δεν προκύπτει μόνο από τη χρήση κάθε εφαρμογής μεμονωμένα, αλλά κυρίως από τη δυνατότητα διασύνδεσης των διαφορετικών πληροφοριακών συστημάτων, ώστε τα δεδομένα του έργου να μετατρέπονται σε αξιόπιστη πληροφορία για τη λήψη αποφάσεων.

3.9.1 Primavera P6

Το Oracle Primavera P6 Enterprise Project Portfolio Management (P6 EPPM) αποτελεί ένα από τα πλέον εξειδικευμένα συστήματα προγραμματισμού και ελέγχου σύνθετων έργων. Υποστηρίζει τον σχεδιασμό, τον προγραμματισμό και τον έλεγχο τόσο μεμονωμένων έργων όσο και ευρύτερων προγραμμάτων και χαρτοφυλάκιο έργων, ενώ παρέχει δυνατότητες διαχείρισης πόρων και συνδυασμού πληροφοριών χρόνου και κόστους (Oracle, χ.χ.).

Η Oracle επισημαίνει επίσης τη δυνατότητα του Primavera P6 να συνδέει τον χρονικό προγραμματισμό με στοιχεία κόστους, ώστε να υποστηρίζονται η παρακολούθηση της προόδου, η αξιολόγηση μεταβολών και η ανάπτυξη προβλέψεων (Oracle, χ.χ.).

Η περιοδική ενημέρωση του προγράμματος επιτρέπει τον εντοπισμό των καθυστερήσεων που καταναλώνουν διαθέσιμο χρονικό περιθώριο, ποιες δραστηριότητες μετακινούνται προς την κρίσιμη διαδρομή και ποια ορόσημα κινδυνεύουν να επηρεαστούν.

3.9.2 Microsoft Project

Το Microsoft Project αποτελεί επίσης ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο χρονικού προγραμματισμού. Υποστηρίζει τη δημιουργία διάρκειας και αλληλεξάρτησης δραστηριοτήτων, ορόσημων και χρονοδιαγραμμάτων τύπου Gantt, παρέχοντας μία περισσότερο άμεση και σχετικά απλή προσέγγιση στη δημιουργία και διαχείριση ενός χρονοδιαγράμματος (Microsoft, χ.χ.).

Το εργαλείο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία της λογικής αλληλουχίας των εργασιών, την ανάθεση πόρων και την παρακολούθηση της εξέλιξης ενός έργου. Παράλληλα, η παρουσίαση των δραστηριοτήτων μέσω διαγράμματος Gantt διευκολύνει την επικοινωνία του προγράμματος μεταξύ των διαφορετικών εμπλεκόμενων μερών.

3.9.3 Power BI

Το Microsoft Power BI αποτελεί πλατφόρμα Business Intelligence και οπτικοποίηση δεδομένων, μέσω της οποίας δεδομένα από διαφορετικές πηγές μπορούν να συνδεθούν, να αναλυθούν και να παρουσιαστούν μέσω διαδραστικών αναφορών και πινάκων ελέγχου. Η Microsoft περιγράφει το Power BI ως πλατφόρμα που επιτρέπει τη σύνδεση και ενοποίηση δεδομένων και τη μετατροπή τους σε πληροφορίες που μπορούν να υποστηρίξουν επιχειρηματικές αποφάσεις (Microsoft, χ.χ.).

Για παράδειγμα, σε ένα αιολικό έργο ένα dashboard μπορεί να παρουσιάζει ανά ανεμογεννήτρια την κατάσταση των έργων υποδομής, μεταφοράς κύριων εξαρτημάτων, κύριας εγκατάστασης ανεμογεννήτριας, ηλεκτρολογικών εργασιών και εργασιών θέσης σε λειτουργία. Η διοίκηση μπορεί έτσι να αποκτήσει μία άμεση συνολική εικόνα χωρίς να απαιτείται η εξέταση πολλών ανεξάρτητων αναφορών.

Η αξία του Power BI βρίσκεται συνεπώς κυρίως στη μετατροπή μεγάλου όγκου δεδομένων σε εύκολα κατανοητή διοικητική πληροφορία. Ωστόσο, η ποιότητα ενός πίνακα ελέγχου εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των δεδομένων που το τροφοδοτούν.

3.9.4 Μοντελοποίηση Πληροφοριών Κατασκευής - Building Information Modeling (BIM 4D και 5D)

Το BIM αποτελεί μία ψηφιακή διαδικασία δημιουργίας και διαχείρισης πληροφοριών ενός κατασκευαστικού στοιχείου κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Το BIM δεν περιορίζεται επομένως στην τρισδιάστατη γεωμετρική αναπαράσταση, αλλά μπορεί να ενσωματώσει πρόσθετες πληροφορίες που σχετίζονται με την κατασκευή και τη διαχείριση του έργου (Autodesk, χ.χ.).

Όταν το τρισδιάστατο μοντέλο συνδέεται με το χρονοδιάγραμμα, δημιουργείται το 4D BIM, όπου η τέταρτη διάσταση είναι ο χρόνος. Μέσω της σύνδεσης των στοιχείων του μοντέλου με συγκεκριμένες δραστηριότητες μπορεί να απεικονιστεί η κατασκευαστική αλληλουχία και η εξέλιξη του έργου στον χρόνο (Autodesk, 2024).

Όταν στο μοντέλο ενσωματωθούν επιπλέον πληροφορίες κόστους, προκύπτει το 5D BIM. Σύμφωνα με την Autodesk (χ.χ.), η τέταρτη διάσταση συνδέεται με τον προγραμματισμό και την αλληλουχία των εργασιών, ενώ η πέμπτη με τα δεδομένα κόστους.

3.9.5 Πίνακες Ελέγχου (Dashboards) και Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (Key Performance Indicators - KPIs)

Οι πίνακες ελέγχου αποτελούν το επίπεδο στο οποίο τα δεδομένα του έργου μετατρέπονται σε συνοπτική πληροφορία για τη διοίκηση. Ένας αποτελεσματικός πίνακας δεν πρέπει να παρουσιάζει απλώς μεγάλο αριθμό δεδομένων, αλλά να επιλέγει τους κατάλληλους βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs) που επιτρέπουν την έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων και τάσεων.

Η χρήση οπτικών ενδείξεων και γραφημάτων επιτρέπει στη διοίκηση να αναγνωρίζει γρήγορα περιοχές που απαιτούν προσοχή. Ωστόσο, τα πίνακες ελέγχου δεν πρέπει να μετατρέπονται σε απλές «έγχρωμες αναφορές». Κάθε KPI πρέπει

να συνδέεται με συγκεκριμένο στόχο, σημείο αναφοράς και όπου παρουσιάζεται σημαντική απόκλιση, να οδηγεί σε περαιτέρω διερεύνηση και άμεση διορθωτική ενέργεια.

Κεφάλαιο 4: Λιτή Κατασκευή (Lean Construction) στα Κατασκευαστικά Έργα

4.1 Λιτή Κατασκευή (Lean Construction): Έννοια, Εξέλιξη και Βασικές Αρχές

Η λιτή κατασκευή αποτελεί μία προσέγγιση στη διοίκηση και οργάνωση της κατασκευαστικής παραγωγής, η οποία αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση της παραγόμενης αξίας και στον περιορισμό της σπατάλης, μέσω της βελτίωσης της ροής των εργασιών, της συνεργασίας και της συνεχούς βελτίωσης των διαδικασιών. Σε αντίθεση με μία προσέγγιση που επικεντρώνεται αποκλειστικά στην αποτελεσματικότητα των επιμέρους δραστηριοτήτων, η λιτή κατασκευή εξετάζει το έργο ως ένα συνολικό σύστημα παραγωγής, στο οποίο η απόδοση κάθε εργασίας επηρεάζεται από τις προηγούμενες και τις επόμενες διαδικασίες (Ballard & Howell, 2003).

Οι θεωρητικές καταβολές της λιτής κατασκευής εντοπίζονται στη φιλοσοφία της λιτής παραγωγής και ιδιαίτερα στο Toyota Production System (TPS), το οποίο αναπτύχθηκε με έμφαση στη μείωση της σπατάλης, στη βελτίωση της παραγωγικής ροής και στη συνεχή βελτίωση. Η φιλοσοφία αυτή σταδιακά επεκτάθηκε πέρα από τη βιομηχανική παραγωγή και προσαρμόστηκε στις ιδιαίτερες συνθήκες διαφορετικών κλάδων, μεταξύ των οποίων και η κατασκευή.

Η τοπική βελτιστοποίηση μιας μεμονωμένης εργασίας δεν συνεπάγεται απαραίτητα βελτίωση του συνολικού έργου. Για παράδειγμα, η αύξηση της παραγωγικότητας ενός συνεργείου δεν δημιουργεί ουσιαστικό όφελος όταν η επόμενη δραστηριότητα δεν είναι έτοιμη να ξεκινήσει και το αποτέλεσμα είναι η δημιουργία αναμονής ή συσσώρευσης ημιτελούς εργασίας. Για τον λόγο αυτό, μία από τις βασικές αρχές είναι η βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος και όχι μόνο των επιμέρους τμημάτων του.

Στο πλαίσιο αυτό, οι βασικές αρχές του Lean μπορούν να συνοψιστούν στη δημιουργία αξίας (Generate Value), στην εξάλειψη της σπατάλης (Eliminate Waste), στη διατήρηση ομαλής ροής (Focus on Flow), στον σεβασμό προς τους ανθρώπους (Respect for People), στη βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος (Optimize the Whole) και στη συνεχή βελτίωση (Continuous Improvement). Οι αρχές αυτές είναι αλληλένδετες και διαμορφώνουν περισσότερο μία συνολική φιλοσοφία διοίκησης παρά ένα μεμονωμένο σύνολο τεχνικών ή εργαλείων (Lean Construction Institute [LCI], χ.χ.).

Συνεπώς, η λιτή κατασκευή δεν αποτελεί απλώς μία συλλογή εργαλείων προγραμματισμού, αλλά μία διαφορετική αντίληψη για την οργάνωση και διοίκηση της κατασκευαστικής παραγωγής. Αντιμετωπίζει το έργο ως ένα αλληλοεξαρτώμενο σύστημα και επιδιώκει να δημιουργήσει μεγαλύτερη αξία με λιγότερη σπατάλη, μεγαλύτερη αξιοπιστία και καλύτερη συνεργασία μεταξύ των συμμετεχόντων. Η θεώρηση αυτή δημιουργεί τη βάση για την αναλυτικότερη εξέταση των τριών ιδιαίτερα σημαντικών εννοιών στην επόμενη ενότητα, της αξίας, της σπατάλης και της ροής.

4.2 Αξία, Σπατάλη και Ροή στην Κατασκευή

Οι έννοιες της αξίας (Value), της σπατάλης (Waste) και της ροής (Flow) βρίσκονται στον πυρήνα της φιλοσοφίας της λιτής κατασκευής και αποτελούν βασικούς άξονες για την αξιολόγηση και βελτίωση της κατασκευαστικής παραγωγής. Η παραδοσιακή προσέγγιση τείνει να αντιμετωπίζει το έργο ως ένα σύνολο επιμέρους δραστηριοτήτων μετατροπής, δίνοντας έμφαση κυρίως στην αποδοτικότητα καθεμιάς. Η λιτή προσέγγιση διευρύνει αυτή τη θεώρηση, εξετάζοντας

παράλληλα τι δημιουργεί πραγματική αξία, ποιες ενέργειες δεν προσθέτουν αξία και κατά πόσο η εργασία κινείται ομαλά μεταξύ των διαφορετικών σταδίων παραγωγής (Koskela, 1992).

4.2.1 Αξία (Value)

Στη λιτή κατασκευή, η αξία δεν προσδιορίζεται αποκλειστικά από το κόστος ή την ποσότητα της εργασίας που εκτελέστηκε, αλλά από τον βαθμό στον οποίο το τελικό αποτέλεσμα ικανοποιεί τις πραγματικές απαιτήσεις και ανάγκες του πελάτη. Κατά συνέπεια, μία δραστηριότητα μπορεί να εκτελείται αποδοτικά και να καταναλώνει πόρους, χωρίς απαραίτητα να δημιουργεί αντίστοιχη αξία.

Η προσέγγιση αυτή μετατοπίζει το ενδιαφέρον από το ερώτημα «πόσο αποτελεσματικά εκτελείται μία δραστηριότητα;» προς το ευρύτερο ερώτημα «συμβάλλει η συγκεκριμένη δραστηριότητα στη δημιουργία του επιθυμητού αποτελέσματος;». Η δημιουργία αξίας προϋποθέτει επομένως σαφή κατανόηση των απαιτήσεων του πελάτη και συστηματική μεταφορά τους στις διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής (Koskela, 1992).

Στην κατασκευή ενός αιολικού πάρκου, για παράδειγμα, η αξία δεν δημιουργείται απλώς με την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας. Το αποτέλεσμα πρέπει να ανταποκρίνεται στις τεχνικές και ποιοτικές απαιτήσεις, να είναι ασφαλές, λειτουργικό και έτοιμο να παραδοθεί σύμφωνα με τις απαιτήσεις του έργου. Μία εγκατάσταση που ολοκληρώνεται γρήγορα αλλά απαιτεί εκτεταμένες επανεργασίες πριν από την θέση σε λειτουργία, δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι μεγιστοποιεί την παραγόμενη αξία.

Η έννοια της αξίας συνδέεται επομένως άμεσα με τη σπατάλη. Όσο περισσότεροι πόροι καταναλώνονται σε δραστηριότητες που δεν συμβάλλουν στο απαιτούμενο αποτέλεσμα, τόσο μικρότερη είναι η συνολική αποτελεσματικότητα του παραγωγικού συστήματος.

4.2.2 Σπατάλη (Waste)

Ως σπατάλη στη φιλοσοφία της λιτής κατασκευής νοείται γενικά κάθε δραστηριότητα που καταναλώνει χρόνο, εργασία ή άλλους πόρους χωρίς να δημιουργεί αντίστοιχη αξία για τον τελικό χρήστη. Η σπατάλη στην κατασκευή δεν περιορίζεται συνεπώς στα απορριπτόμενα υλικά. Περιλαμβάνει επίσης μη παραγωγικό χρόνο, αναμονές, περιττές μετακινήσεις, επανεργασίες, υπερβολικά αποθέματα και άλλες μορφές αναποτελεσματικής χρήσης πόρων (LCI, χ.χ)

Στην αρχική θεώρηση του Koskela, η κατασκευαστική διαδικασία περιλαμβάνει τόσο δραστηριότητες που προσθέτουν αξία όσο και δραστηριότητες που δεν προσθέτουν αξία. Ενέργειες όπως η αναμονή, η αποθήκευση και οι μετακινήσεις υλικών συχνά δεν εμφανίζονται με σαφήνεια στα παραδοσιακά εργαλεία προγραμματισμού, παρότι μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την πραγματική παραγωγικότητα του έργου (Koskela, 1992).

Στη σύγχρονη λιτή πρακτική αναγνωρίζονται συνήθως οκτώ βασικές μορφές σπατάλης, οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν στο περιβάλλον των κατασκευαστικών έργων.

Πίνακας 3: Οι Οκτώ Βασικές Μορφές Σπατάλης στο Lean Construction

Μορφή σπατάλης			Περιγραφή	Ενδεικτικό παράδειγμα στην κατασκευή
1		Ελαττώματα (Defects)	Λάθη που απαιτούν διόρθωση, επανεκτέλεση εργασιών, αντικατάσταση ή πρόσθετοι έλεγχοι	Λανθασμένη εγκατάσταση που πρέπει να επαναληφθεί
2		Υπερπαραγωγή / Υποπαραγωγή (Over/Under Production)	Παραγωγή νωρίτερα ή αργότερα από τον απαιτούμενο χρόνο ή σε μεγαλύτερη ή μικρότερη ποσότητα από αυτή που απαιτείται	Εκτέλεση εργασίας πριν είναι έτοιμη η επόμενη φάση
3		Αναμονή (Waiting)	Μη παραγωγικός χρόνος κατά τον οποίο εργαζόμενοι, εξοπλισμός ή δραστηριότητες παραμένουν σε αδράνεια	Συνεργείο σε αναμονή υλικών ή ολοκλήρωσης προηγούμενης εργασίας
4		Μη Αξιοποίηση Ανθρώπινου Δυναμικού (Not Utilizing Talent)	Ανεπαρκής αξιοποίηση των γνώσεων, δεξιοτήτων, εμπειρίας και ικανοτήτων των εργαζομένων	Μη συμμετοχή των συνεργείων κατά τον προγραμματισμό
5		Περιττές Μεταφορές (Transportation)	Περιττές ή μη αποδοτικές μετακινήσεις υλικών, εξοπλισμού ή άλλων πόρων	Επαναλαμβανόμενες μετακινήσεις υλικών στο εργοτάξιο
6		Υπερβολικά Αποθέματα (Inventory)	Διατήρηση υπερβολικών ή μη αναγκαίων αποθεμάτων υλικών, εξοπλισμού ή ημιτελών εργασιών	Υλικά παραδίδονται πολύ νωρίτερα από τη χρήση τους
7		Περιττές Κινήσεις (Motion)	Μη αναγκαίες ή μη αποδοτικές κινήσεις εργαζομένων και εξοπλισμού	Αναζήτηση εργαλείων ή υλικών σε διαφορετικές περιοχές
8		Περιττή Επεξεργασία (Extra Processing)	Εκτέλεση πρόσθετων ή περιττών εργασιών, διαδικασιών, ελέγχων ή ενεργειών που δεν προσθέτουν αξία στο τελικό αποτέλεσμα	Επανάληψη ελέγχων και επιθεωρήσεων χωρίς να υπάρχει τεχνική ή συμβατική απαίτηση

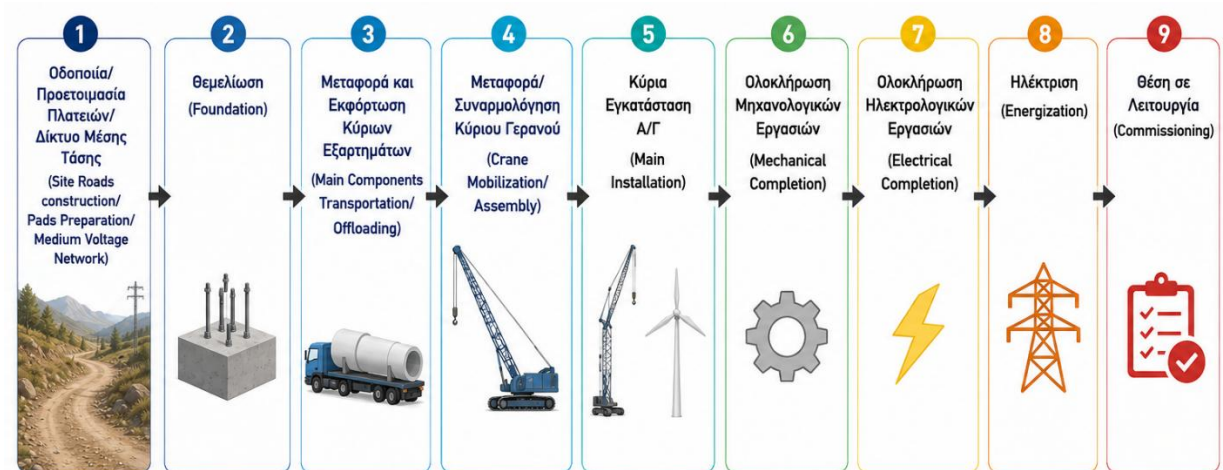
Οι παραπάνω μορφές σπατάλης συχνά δεν εμφανίζονται ανεξάρτητα. Για παράδειγμα, μία πρόωρη παράδοση μεγάλου όγκου υλικών μπορεί να δημιουργήσει απόθεμα, να απαιτήσει πρόσθετη μεταφορά και περιττές κινήσεις και τελικά να προκαλέσει ελαττώματα και αστοχίες, εάν τα υλικά υποστούν φθορά κατά την παρατεταμένη αποθήκευσή τους.

Ιδιαίτερη σημασία στα κατασκευαστικά έργα έχει η αναμονή (Waiting). Ένα συνεργείο μπορεί να βρίσκεται στο εργοτάξιο αλλά να αδυνατεί να ξεκινήσει επειδή δεν έχει ολοκληρωθεί η προηγούμενη δραστηριότητα, λείπουν υλικά ή εργαλεία, δεν έχει εκδοθεί κάποια απαιτούμενη έγκριση ή δεν είναι διαθέσιμος ο κατάλληλος εξοπλισμός. Παρότι το προσωπικό και οι πόροι είναι διαθέσιμοι, δεν παράγεται αξία και δημιουργείται ταυτόχρονα χρονική και οικονομική επιβάρυνση.

4.2.3 Ροή (Flow)

Η έννοια της ροής αφορά την ομαλή και όσο το δυνατόν περισσότερο συνεχή μετάβαση της εργασίας από μία παραγωγική διαδικασία στην επόμενη, με περιορισμό των διακοπών, των αναμονών και της μεταβλητότητας. Στη λιτή κατασκευή, η αποτελεσματικότητα δεν αξιολογείται επομένως μόνο από την ταχύτητα με την οποία ολοκληρώνεται κάθε μεμονωμένη δραστηριότητα, αλλά και από το πόσο αξιόπιστα μεταφέρεται η εργασία μεταξύ διαφορετικών συνεργείων και σταδίων.

Για παράδειγμα, σε ένα έργο αιολικού πάρκου μπορεί να υπάρχει η ακόλουθη παραγωγική ακολουθία:



Σχήμα 4: Ενδεικτική παραγωγική ακολουθία σε έργο αιολικού πάρκου

Η αποτελεσματική ολοκλήρωση ενός σταδίου έχει περιορισμένη αξία εάν το επόμενο δεν είναι έτοιμο να παραλάβει το αντίστοιχο μέτωπο εργασίας. Εάν, για παράδειγμα, ολοκληρωθεί η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας αλλά το συνεργείο μηχανολογικών εργασιών δεν είναι διαθέσιμο για αρκετές ημέρες, δημιουργείται διακοπή της ροής. Αντίστοιχα, η πρόωρη παράδοση εξαρτημάτων χωρίς δυνατότητα άμεσης εγκατάστασης δημιουργεί αποθέματα και ανάγκες αποθήκευσης αντί για συνεχή παραγωγική πρόοδο.

Η μεταβλητότητα της ροής επηρεάζει επίσης την παραγωγικότητα των επόμενων συνεργείων. Οι Ballard και Howell (1998) υποστηρίζουν ότι η δημιουργία ποιοτικών και εκτελέσιμων αναθέσεων εργασίας μπορεί να προστατεύσει τις παραγωγικές μονάδες από την αβεβαιότητα της ροής και να βελτιώσει τόσο τη δική τους παραγωγικότητα όσο και εκείνη των επόμενων μονάδων παραγωγής.

Η βελτίωση της ροής προϋποθέτει συνεπώς όχι απλώς την επιτάχυνση των εργασιών, αλλά κυρίως τη μείωση των εμποδίων μεταξύ τους. Η έγκαιρη διαθεσιμότητα πληροφοριών, υλικών, προσωπικού και εξοπλισμού, καθώς και η σωστή ολοκλήρωση των προηγούμενων εργασιών, περιορίζουν τις διακοπές και δημιουργούν περισσότερο προβλέψιμη παραγωγή.

4.2.4 Η αλληλεξάρτηση Αξίας - Σπατάλης - Ροής

Οι τρεις έννοιες δεν πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ανεξάρτητα στοιχεία. Η αξία καθορίζει το αποτέλεσμα που πρέπει να επιτευχθεί, η αναγνώριση της σπατάλης αποκαλύπτει πού καταναλώνονται πόροι χωρίς αντίστοιχη συνεισφορά και η ροή εξετάζει κατά πόσο οι δραστηριότητες συνδέονται αποτελεσματικά μεταξύ τους. Η σχέση τους μπορεί να αποδοθεί συνοπτικά ως:



Σχήμα 5: Κύκλος Συνεχούς Βελτίωσης Lean

Η μείωση της σπατάλης μπορεί συνεπώς να ενισχύσει άμεσα τη ροή. Η εξάλειψη, για παράδειγμα, μιας επαναλαμβανόμενης αναμονής μεταξύ δύο συνεργειών μειώνει τον μη παραγωγικό χρόνο και επιτρέπει στην εργασία να μεταβεί ταχύτερα και περισσότερο αξιόπιστα στο επόμενο στάδιο. Αντίστοιχα, η βελτίωση της ροής μπορεί να αποκαλύψει νέες μορφές σπατάλης που προηγουμένως παρέμεναν κρυμμένες μέσα στη διαδικασία. Η λιτή κατασκευή αντιμετωπίζει επομένως τη μείωση της σπατάλης και τη βελτίωση της ροής ως βασικούς μηχανισμούς για την αύξηση της αξίας του συνολικού έργου.

Στα έργα κατασκευής αιολικών πάρκων η λογική αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική λόγω της ισχυρής αλληλεξάρτησης μεταξύ εφοδιαστικής (logistics), έργων υποδομής, κύριου και βοηθητικών γερανών, συνεργεία εγκατάστασης και ηλεκτρομηχανολογικών εργασιών. Η τοπική βελτιστοποίηση ενός μόνο συνεργείου δεν είναι αρκετή εάν δημιουργεί αναμονές ή περιορισμούς στο επόμενο στάδιο. Στόχος πρέπει να είναι η δημιουργία μιας σταθερής και αξιόπιστης παραγωγικής ροής σε επίπεδο συνολικού έργου.

Η μετάβαση από τις γενικές αυτές αρχές στην καθημερινή διαχείριση της παραγωγής απαιτεί ένα περισσότερο δομημένο σύστημα προγραμματισμού και ελέγχου. Τον ρόλο αυτό αναλαμβάνει σε σημαντικό βαθμό το σύστημα Last Planner (LPS), το οποίο εξετάζεται στην επόμενη ενότητα και επιδιώκει να μετατρέψει τον προγραμματισμό σε μία περισσότερο συνεργατική και αξιόπιστη διαδικασία παραγωγής.

4.3 Last Planner System (LPS)

Το LPS αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα συστήματα προγραμματισμού και ελέγχου παραγωγής της λιτής κατασκευής. Αναπτύχθηκε με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας του προγραμματισμού, μέσω της ενεργού συμμετοχής των ανθρώπων που βρίσκονται κοντά στην πραγματική εκτέλεση των εργασιών και της σταδιακής μετατροπής του γενικού προγράμματος σε συγκεκριμένες, εφικτές δεσμεύσεις παραγωγής (Ballard, 2000)

Ο όρος Last Planner αναφέρεται στα πρόσωπα που βρίσκονται στο τελευταίο επίπεδο σχεδιασμού πριν από την πραγματική εκτέλεση και έχουν τη δυνατότητα να δεσμεύουν πόρους και συνεργεία σε συγκεκριμένες εργασίες. Ανάλογα με τη δομή του έργου, μπορεί να πρόκειται για εργοδηγούς, επιβλέποντες μηχανικούς ή υπεύθυνους υπεργολάβων. Το LPS επιδιώκει να μετατρέψει τον προγραμματισμό από μία αποκλειστικά κεντρική διαδικασία σε μία συνεργατική διαδικασία σχεδιασμού.

Η βασική λογική του συστήματος μπορεί να αποδοθεί ως:

SHOULD → CAN → WILL → DID

Όπου το SHOULD αντιπροσωπεύει τις εργασίες που σύμφωνα με το συνολικό πρόγραμμα πρέπει να πραγματοποιηθούν, το CAN εκείνες που είναι πραγματικά εφικτό να εκτελεστούν αφού έχουν αρθεί οι σχετικοί περιορισμοί, το WILL τις εργασίες για τις οποίες οι ομάδες δεσμεύονται ότι θα εκτελέσουν και το DID εκείνες που τελικά ολοκληρώθηκαν (Ballard, 2000).

Η μετάβαση αυτή πραγματοποιείται μέσα από διαφορετικά επίπεδα προγραμματισμού, από τον γενικό σχεδιασμό μέχρι την εβδομαδιαία παραγωγή και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

4.3.1 Κύριος Προγραμματισμός (Master Planning) και Προγραμματισμός Φάσεων (Phase Planning)

Ο κύριος προγραμματισμός αποτελεί το υψηλότερο επίπεδο προγραμματισμού του LPS και αποτυπώνει τη συνολική στρατηγική εκτέλεσης του έργου. Περιλαμβάνει τις βασικές φάσεις, τα σημαντικότερα ορόσημα (milestones) και τις κύριες χρονικές αλληλεξαρτήσεις. Σύμφωνα με Ballard & Tommelein (2021), σκοπός του δεν είναι να καθορίσει με μεγάλη λεπτομέρεια κάθε επιμέρους εργασία, αλλά να δημιουργήσει το γενικό χρονικό πλαίσιο εντός του οποίου θα οργανωθεί η παραγωγή.

Ο προγραμματισμός φάσεων αναλύει περισσότερο συγκεκριμένες φάσεις του κύριου προγραμματισμού και πραγματοποιείται συνήθως με τη συμμετοχή των βασικών εμπλεκόμενων ομάδων. Ιδιαίτερα σημαντική είναι η εφαρμογή της λογικής αντίστροφου προγραμματισμού, κατά την οποία ο σχεδιασμός ξεκινά από ένα επιθυμητό ορόσημο και εξετάζει προς τα πίσω ποιες εργασίες πρέπει να ολοκληρωθούν ώστε να επιτευχθεί (Ballard, 2000).

Η διαδικασία αυτή βοηθά τις διαφορετικές ομάδες να κατανοήσουν όχι μόνο τις δικές τους εργασίες αλλά και τις σχέσεις τους με τις προηγούμενες και τις επόμενες δραστηριότητες.

4.3.2 Βραχυπρόθεσμος Προγραμματισμός (Look Ahead Planning)

Ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός αποτελεί το ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ του γενικού προγράμματος και του εβδομαδιαίου προγραμματισμού εργασιών. Εξετάζει τις εργασίες που αναμένεται να εκτελεστούν μέσα στις επόμενες εβδομάδες και επιδιώκει να διασφαλίσει ότι οι απαραίτητες προϋποθέσεις θα έχουν εξασφαλιστεί πριν από την προγραμματισμένη έναρξή τους.

Μία εργασία πρέπει να μεταφέρεται στο βραχυπρόθεσμο πρόγραμμα μόνο όταν είναι πραγματικά εκτελέσιμη και όχι απλώς επειδή εμφανίζεται ως προγραμματισμένη στο κύριο χρονοδιάγραμμα του έργου (Ballard, 2000).

Για παράδειγμα, η εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας δεν πρέπει να θεωρείται πραγματικά έτοιμη για εκτέλεση μόνο επειδή βρίσκεται στο πρόγραμμα της επόμενης εβδομάδας. Πρέπει προηγουμένως να έχει επιβεβαιωθεί ότι η θεμελίωση και η πλατεία είναι έτοιμες, τα εξαρτήματα έχουν παραδοθεί, χωρίς ανεπιθύμητες ζημιές και ελλείψεις, ο κύριος γερανός και το συνεργείο εγκατάστασης είναι διαθέσιμα, τα απαιτούμενα ανυψωτικά εργαλεία και όλος ο απαραίτητος εξοπλισμός βρίσκονται στο εργοτάξιο και δεν υπάρχει άλλος τεχνικός ή οργανωτικός περιορισμός.

Έτσι, μετατοπίζεται το ερώτημα από «τι πρέπει να κάνουμε;» σε «τι μπορούμε πραγματικά να κάνουμε;», αποτελώντας έναν από τους σημαντικότερους μηχανισμούς προστασίας της παραγωγής από την αβεβαιότητα.

4.3.3 Εβδομαδιαίος Προγραμματισμός Εργασιών (Weekly Work Planning)

Ο εβδομαδιαίος προγραμματισμός εργασιών αποτελεί το επίπεδο στο οποίο οι εργασίες που έχουν καταστεί εκτελέσιμες μετατρέπονται σε συγκεκριμένες δεσμεύσεις για την επόμενη περίοδο παραγωγής. Δεν πρέπει να αποτελεί απλώς μία μικρότερη χρονικά εκδοχή του κύριου χρονοδιαγράμματος. Περιλαμβάνει εργασίες οι οποίες έχουν ελεγχθεί ως προς την ετοιμότητά τους και μπορούν πράγματι να εκτελεστούν.

Με τον τρόπο αυτό μπορεί στο τέλος της περιόδου να αξιολογηθεί αντικειμενικά εάν η εργασία που είχε συμφωνηθεί ολοκληρώθηκε.

Ο εβδομαδιαίος προγραμματισμός ενισχύει επίσης τη συνεργασία μεταξύ των διαφορετικών ομάδων. Οι δεσμεύσεις δεν πρέπει να επιβάλλονται αποκλειστικά από το ανώτερο επίπεδο διοίκησης, αλλά να συμφωνούνται με τους ανθρώπους που γνωρίζουν τις πραγματικές συνθήκες εκτέλεσης και είναι υπεύθυνοι για την εκτέλεση.

4.3.4 Ποσοστό Ολοκλήρωσης Προγραμματισμένων Εργασιών (Percent Plan Complete - PPC) και Αιτίες Μη Ολοκλήρωσης (Reasons for Non-Completion – RNC)

Η αξιοπιστία του εβδομαδιαίου προγραμματισμού αξιολογείται κυρίως μέσω του ποσοστού ολοκλήρωσης προγραμματισμένων εργασιών (PPC). Ο δείκτης εκφράζει το ποσοστό των προγραμματισμένων εργασιών που ολοκληρώθηκαν πραγματικά κατά την εξεταζόμενη περίοδο (Ballard, 2000).

Ο υπολογισμός πραγματοποιείται ως:

Εάν, για παράδειγμα, σε ένα είχαν συμφωνηθεί 20 εργασίες και ολοκληρώθηκαν οι 16, τότε:

Το $PPC = 80\%$ σημαίνει ότι ολοκληρώθηκε το 80% των δεσμεύσεων της συγκεκριμένης περιόδου. Ο δείκτης δεν μετρά τη συνολική φυσική πρόοδο του έργου, αλλά την αξιοπιστία του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού. Συνεπώς, δεν πρέπει να συγχέεται με δείκτες όπως το SPI ή το συνολικό ποσοστό ολοκλήρωσης.

Η πραγματική αξία του PPC προκύπτει όταν συνδυάζεται με την ανάλυση των Reasons for Non-Completion (RNC). Για κάθε εργασία που είχε προγραμματιστεί αλλά δεν ολοκληρώθηκε πρέπει να καταγράφεται η πραγματική αιτία της απόκλισης. Ενδεικτικά, οι αιτίες μπορούν να ταξινομηθούν σε:

Πίνακας 4: Ενδεικτικές κατηγορίες Αιτιών Μη Ολοκλήρωσης (Reasons for Non-Completion - RNC)

Κατηγορία RNC	Ενδεικτικό παράδειγμα
 Υλικά	Καθυστερημένη παράδοση εξαρτήματος
 Εξοπλισμός	Βλάβη ή μη διαθεσιμότητα γερανού
 Ανθρώπινο δυναμικό	Ανεπαρκής διαθεσιμότητα συνεργείου
 Προηγούμενη εργασία	Μη ολοκλήρωση προηγούμενης εργασίας
 Σχεδιασμός / Πληροφορίες	Έλλειψη σχεδίου ή τεχνικής οδηγίας
 Ποιότητα / Επανεργασία	Διορθωτική εργασία λόγω μη συμμόρφωσης
 Εξωτερικές συνθήκες	Καιρικοί ή άλλοι εξωτερικοί περιορισμοί
 Προγραμματισμός / Συντονισμός	Λανθασμένη αλληλουχία ή ανεπαρκής προετοιμασία

Η επαναλαμβανόμενη καταγραφή των RNC επιτρέπει την αναγνώριση συστηματικών αιτιών αποτυχίας του προγραμματισμού. Εάν, για παράδειγμα, η έλλειψη υλικών εμφανίζεται επανειλημμένα ως κύρια αιτία μη ολοκλήρωσης, το πρόβλημα δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται μόνο με την επανατοποθέτηση των εργασιών στο πρόγραμμα. Απαιτείται διερεύνηση της διαδικασίας προμηθειών, εφοδιαστικής ή προγραμματισμός υλικών που δημιουργεί την απόκλιση.

Συνολικά, το Last Planner System συνδέει διαφορετικά επίπεδα προγραμματισμού σε μία ενιαία διαδικασία. Ο κύριος προγραμματισμός καθορίζει τη συνολική κατεύθυνση, ο προγραμματισμός φάσεων οργανώνει συνεργατικά τις επιμέρους φάσεις, ο βραχυπρόθεσμος προετοιμάζει τις εργασίες και απομακρύνει περιορισμούς, ενώ το εβδομαδιαίος μετατρέπει τις εκτελέσιμες εργασίες σε συγκεκριμένες δεσμεύσεις. Τέλος, το PPC και η ανάλυση των RNC παρέχουν τον μηχανισμό μέτρησης, μάθησης και βελτίωσης.

4.4 Αντίστροφος Προγραμματισμός βάσει Οροσήμων (Pull Planning) και Διαχείριση Περιορισμών (Constraint Management)

Ο αντίστροφος προγραμματισμός βάσει οροσήμων και η διαχείριση περιορισμών αποτελούν δύο αλληλένδετες πρακτικές της λιτής κατασκευής που υποστηρίζουν την αξιόπιστη ροή της παραγωγής. Το πρώτο καθορίζει τη λογική και την αλληλουχία των εργασιών με βάση το επιθυμητό αποτέλεσμα, ενώ το δεύτερο διασφαλίζει ότι οι εργασίες μπορούν πράγματι να εκτελεστούν όταν προγραμματίζονται. Αμφότερα εντάσσονται στη λειτουργία του Last Planner System (LPS) (LCI, χ.χ.).

4.4.1 Αντίστροφος Προγραμματισμός βάσει Οροσήμων (Pull Planning)

Ο αντίστροφος προγραμματισμός διαφοροποιείται από την παραδοσιακή λογική του προωθητικού προγραμματισμού, όπου οι εργασίες οργανώνονται προς τα εμπρός, ξεκινώντας από τις αρχικές δραστηριότητες και ακολουθώντας την

προκαθορισμένη λογική αλληλουχία του χρονοδιαγράμματος. Σε ένα τέτοιο σύστημα, οι εργασίες προωθούνται σύμφωνα με το κεντρικό χρονοδιάγραμμα, ακόμη και όταν η επόμενη διαδικασία δεν είναι πλήρως έτοιμη να τις παραλάβει. Αντίθετα, σε ένα αντίστροφο σύστημα, κάθε εργασία εκτελείται όταν η επόμενη δραστηριότητα είναι έτοιμη να παραλάβει και να αξιοποιήσει το αποτέλεσμά της, περιορίζοντας έτσι την πρόωρη εκτέλεση εργασιών και τη δημιουργία περιττών αποθεμάτων ή αναμονών (LCI, 2022).

Στην πράξη, η διαδικασία ξεκινά από ένα καθορισμένο τελικό ορόσημο και αναπτύσσεται προς τα πίσω, προσδιορίζοντας τις εργασίες και τις παραδόσεις μεταξύ διαδοχικών εργασιών που απαιτούνται για την επίτευξή του. Η διαδικασία πραγματοποιείται συνεργατικά από τις ομάδες που είναι υπεύθυνες για την πραγματική εκτέλεση των εργασιών.

Με αυτόν τον τρόπο, κάθε ομάδα προσδιορίζει τι πρέπει να παραλάβει από την προηγούμενη και τι πρέπει να παραδώσει στην επόμενη, ενισχύοντας τον συντονισμό και περιορίζοντας εργασίες που πραγματοποιούνται πρόωρα χωρίς να υπάρχει πραγματική ανάγκη.

4.4.2 Διαχείριση Περιορισμών (Constraint Management)

Η διαχείριση περιορισμών αφορά τη συστηματική αναγνώριση, παρακολούθηση και έγκαιρη άρση των περιορισμών που μπορούν να εμποδίσουν την εκτέλεση μιας προγραμματισμένης δραστηριότητας. Συνδέεται άμεσα με την προετοιμασία των εργασιών, καθώς μία εργασία δεν πρέπει να μεταφέρεται στον εβδομαδιαίο προγραμματισμό εάν δεν έχουν εξασφαλιστεί οι βασικές προϋποθέσεις για την εκτέλεσή της. Το LCI περιγράφει την προετοιμασία των εργασιών, ως τη διαδικασία μέσω της οποίας η επερχόμενη εργασία προετοιμάζεται ώστε να μπορεί πράγματι να πραγματοποιηθεί, ενώ η διαχείριση περιορισμών εστιάζει στην απομάκρυνση των αντίστοιχων εμποδίων.

Για παράδειγμα, πριν από την προγραμματισμένη εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας μπορούν να ελεγχθούν οι βασικές προϋποθέσεις:

Πίνακας 5: Ενδεικτικός Έλεγχος Κατασκευαστικών Προαπαιτούμενων

#	Προαπαιτούμενο		Κατάσταση
1		Ολοκλήρωση θεμελίωσης	
2		Διαθέσιμα εξαρτήματα/υλικά	
3		Διαθέσιμοι κύριος και βοηθητικοί γερανοί	
4		Διαθέσιμα συνεργεία	
5		Διαθέσιμα εργαλεία και ανυψωτικός εξοπλισμός	

Εάν ένα από τα παραπάνω δεν ικανοποιείται, καταγράφεται ως περιορισμός, ορίζεται υπεύθυνος για την επίλυσή της και καθορίζεται η απαιτούμενη ημερομηνία άρσης της. Η χρήση ενός μητρώου περιορισμών μπορεί να υποστηρίξει αυτή τη διαδικασία, καθιστώντας ορατή την κατάσταση των περιορισμών και την αντίστοιχη ευθύνη. Η πρακτική αυτή βοηθά ώστε οι περιορισμοί να αντιμετωπίζονται πριν μετατραπούν σε πραγματικές καθυστερήσεις της παραγωγής.

4.4.3 Σύνδεση Αντίστροφου Προγραμματισμού και Διαχείρισης Περιορισμών

Οι δύο πρακτικές λειτουργούν συμπληρωματικά. Το ένα προσδιορίζει τι πρέπει να συμβεί και με ποια αλληλουχία, ενώ το άλλο εξετάζει εάν οι αντίστοιχες εργασίες είναι πραγματικά έτοιμες να εκτελεστούν.

Με τον τρόπο αυτό, ο προγραμματισμός δεν περιορίζεται στην τοποθέτηση δραστηριοτήτων σε συγκεκριμένες ημερομηνίες, αλλά συνδέεται με την πραγματική ετοιμότητα των εργασιών προς εκτέλεση. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε έργα αιολικών πάρκων, όπου η εγκατάσταση προϋποθέτει τον αποτελεσματικό συντονισμό πολλών αλληλοεξαρτώμενων εργασιών και τη διασφάλιση της έγκαιρης διαθεσιμότητας των απαιτούμενων πόρων.

Συνεπώς και τα δυο, συμβάλλουν στη μετάβαση από έναν προγραμματισμό που βασίζεται κυρίως στην πρόβλεψη σε έναν περισσότερο συνεργατικό και εκτελέσιμο προγραμματισμό, με στόχο τη μείωση των αναμονών και τη δημιουργία σταθερότερης παραγωγικής ροής.

4.5 Just-in-Time και Διαχείριση Ροής Υλικών

Η αρχή Just-in-Time αποτελεί βασικό στοιχείο της φιλοσοφίας της λιτής κατασκευής και επιδιώκει τη διαθεσιμότητα των απαραίτητων υλικών και πόρων στη σωστή ποσότητα, στο σωστό σημείο και στον κατάλληλο χρόνο, σύμφωνα με τις πραγματικές ανάγκες της παραγωγής. Αντί της δημιουργίας μεγάλων αποθεμάτων ως προστασία απέναντι στην αβεβαιότητα, επιδιώκει τον καλύτερο συγχρονισμό μεταξύ προμήθειας, μεταφοράς και εκτέλεσης των εργασιών (Ohno, 1988).

Στην κατασκευή, η εφαρμογή του Just-in-Time συνδέεται άμεσα με τη διαχείριση της ροής υλικών (Material Flow Management). Η πρόωρη παράδοση μεγάλων ποσοτήτων μπορεί να δημιουργήσει ανάγκες αποθήκευσης, πρόσθετες μετακινήσεις, συμφόρηση του εργοταξίου και αυξημένο κίνδυνο φθοράς ή απώλειας υλικών. Αντίθετα, η καθυστερημένη παράδοση μπορεί να προκαλέσει αναμονή συνεργείων και εξοπλισμού και τελικά διακοπή της παραγωγικής ροής. Επομένως, στόχος δεν είναι απλώς η ελαχιστοποίηση των αποθεμάτων, αλλά η αξιόπιστη τροφοδοσία της παραγωγής σύμφωνα με τον πραγματικό ρυθμό εκτέλεσης (Koskela, 1992) πηγή.

Στα έργα αιολικών πάρκων, η συγκεκριμένη προσέγγιση αποκτά ιδιαίτερη σημασία λόγω του μεγάλου μεγέθους και βάρους των κύριων εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών. Η παράδοση των κύριων τμημάτων της ανεμογεννήτριας πρέπει να συντονίζεται με την ετοιμότητα των προσβάσεων και των πλατειών, τη διαθεσιμότητα του κύριου και των βοηθητικών γερανών και την πραγματική ακολουθία εγκατάστασης. Η άφιξη εξαρτημάτων πολύ πριν από την εγκατάστασή τους μπορεί να δημιουργήσει πρόσθετες ανάγκες προσωρινής αποθήκευσης και χειρισμών, ενώ η καθυστερημένη άφιξή τους μπορεί να οδηγήσει σε αδράνεια των γερανών και των συνεργείων.

Ωστόσο, στα κατασκευαστικά έργα, δεν σημαίνει ότι όλα τα υλικά πρέπει να παραδίδονται χωρίς κανένα απόθεμα ασφαλείας. Η κατασκευή χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη μεταβλητότητα από ένα σταθερό βιομηχανικό περιβάλλον και επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι μεταφορές, οι καιρικές συνθήκες, η διαθεσιμότητα προμηθευτών και οι αλλαγές του προγράμματος. Συνεπώς, η έκταση εφαρμογής του Just-in-Time πρέπει να προσαρμόζεται στους κινδύνους και στις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε έργου (Ballard & Howell, 1998).

Η αποτελεσματική διαχείριση της ροής υλικών απαιτεί επομένως στενή σύνδεση των τμημάτων προμηθειών και εφοδιαστικής, με τον βραχυπρόθεσμο και τον εβδομαδιαίο προγραμματισμό.

Συνολικά, το Just-in-Time δεν αποσκοπεί απλώς στη μείωση των αποθεμάτων, αλλά στη δημιουργία μιας συγχρονισμένης ροής μεταξύ εφοδιαστικής αλυσίδας και κατασκευαστικής διαδικασίας. Η σωστή εφαρμογή του μπορεί να περιορίσει τις αναμονές, τις περιττές μετακινήσεις και την αποθήκευση, συμβάλλοντας στη μείωση της σπατάλης και στη βελτίωση της συνολικής ροής του έργου.

4.6 Οπτική Διαχείριση (Visual Management) και Συνεχής Βελτίωση (Continuous Improvement)

Η οπτική διαχείριση και η συνεχής βελτίωση αποτελούν συμπληρωματικές πρακτικές της λιτής κατασκευής. Το πρώτο αποσκοπεί στη δημιουργία άμεσης και κοινής εικόνας της κατάστασης της παραγωγής, ενώ η δεύτερη στη συστηματική αξιοποίηση της εμπειρίας και των αποκλίσεων για τη βελτίωση των διαδικασιών. Κοινός στόχος είναι η έγκαιρη αναγνώριση προβλημάτων και η συμμετοχή των ομάδων στην αντιμετώπισή τους.

4.6.1 Οπτική Διαχείριση (Visual Management)

Η οπτική διαχείριση αφορά την παρουσίαση κρίσιμων πληροφοριών του έργου με απλό και άμεσα κατανοητό τρόπο, ώστε η πραγματική κατάσταση των εργασιών, οι προτεραιότητες και τα προβλήματα να είναι ορατά στους εμπλεκόμενους. Η πληροφορία δεν περιορίζεται έτσι σε εκτενείς αναφορές ή πληροφοριακά συστήματα, αλλά μεταφέρεται κοντά στο σημείο όπου πραγματοποιείται η εργασία.

Ενδεικτικά εργαλεία οπτικής διαχείρισης αποτελούν οι πίνακες προγραμματισμού, οι πίνακες ελέγχου βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs), οι πίνακες παρακολούθησης προόδου κ.ά. Σε ένα έργο αιολικού πάρκου, για παράδειγμα, ένας οπτικός πίνακας μπορεί να παρουσιάζει συνοπτικά την κατάσταση κάθε ανεμογεννήτριας.

Πίνακας 6: Πίνακας Κατάστασης Ανεμογεννητριών

A/Γ	Θεμελίωση 	Κύρια Εξαρτήματα στον Χώρο 	Εγκατάσταση 	Ηλεκτρολογικές Εργασίες 	Περιορισμοί / Εκκρεμότητες 
WTG01	 Ολοκληρώθηκε	 Ολοκληρώθηκαν	 Σε εξέλιξη	— Δεν έχει ξεκινήσει	—
WTG02	 Ολοκληρώθηκε	 Σε εξέλιξη (παραδόσεις)	— Δεν έχει ξεκινήσει	— Δεν έχει ξεκινήσει	 Αναμένεται παράδοση εξαρτημάτων
WTG03	 Ολοκληρώθηκε	 Εκκρεμεί	— Δεν έχει ξεκινήσει	— Δεν έχει ξεκινήσει	 Καθυστέρηση παράδοσης πτερυγίων

Υπόμνημα:  Ολοκληρώθηκε  Σε εξέλιξη  Εκκρεμεί  Δεν έχει ξεκινήσει  Περιορισμός / Εκκρεμότητα

Με αυτόν τον τρόπο, οι ομάδες μπορούν να αναγνωρίζουν γρήγορα την πρόοδο, τις εκκρεμότητες και τα σημεία που απαιτούν παρέμβαση. Η οπτική διαχείριση υποστηρίζει επομένως τη διαφάνεια, τον συντονισμό και την ταχύτερη λήψη αποφάσεων, καθιστώντας τα προβλήματα περισσότερο ορατά πριν εξελιχθούν σε σημαντικές αποκλίσεις.

4.6.2 Συνεχής Βελτίωση (Continuous Improvement)

Η συνεχής βελτίωση βασίζεται στη λογική ότι οι παραγωγικές διαδικασίες πρέπει να αξιολογούνται και να βελτιώνονται διαρκώς. Αντί τα προβλήματα να αντιμετωπίζονται μόνο ως μεμονωμένα γεγονότα, εξετάζονται οι βαθύτερες αιτίες που τα προκάλεσαν, ώστε να περιοριστεί η πιθανότητα επανάληψής τους (LCI, χ.χ.).

Στην κατασκευή ενός αιολικού πάρκου, για παράδειγμα, εάν παρατηρούνται επαναλαμβανόμενες καθυστερήσεις στην έναρξη μιας δραστηριότητας λόγω έλλειψης συγκεκριμένων εργαλείων, προσέγγιση της λιτής κατασκευής δεν περιορίζεται στην επίλυση κάθε περιστατικού ξεχωριστά. Εξετάζεται η βασική αιτία, συντάσσεται ανάλυση βασικής αιτίας (Root Cause Analysis - RCA), τροποποιείται η διαδικασία προετοιμασίας και η βελτίωση εφαρμόζεται στις επόμενες ανεμογεννήτριες ή φάσεις του έργου.

Συνολικά, η οπτική διαχείριση καθιστά την κατάσταση και τα προβλήματα της παραγωγής ορατά, ενώ η συνεχής βελτίωση μετατρέπει τις αποκλίσεις και την εμπειρία σε ευκαιρίες μάθησης και βελτίωσης. Ο συνδυασμός τους ενισχύει τη συνεργασία, περιορίζει την επανάληψη προβλημάτων και υποστηρίζει τη σταδιακή αύξηση της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας της κατασκευαστικής παραγωγής.

Κεφάλαιο 5: Συνδυαστική Εφαρμογή Lean Construction και Project Controls

5.1 Εισαγωγή και Σκοπός της Ενοποίησης

Η αποτελεσματική διαχείριση σύνθετων κατασκευαστικών έργων απαιτεί όχι μόνο την παρακολούθηση της απόδοσης έναντι ενός εγκεκριμένου σχεδιασμού, αλλά και τη συνεχή διασφάλιση ότι οι προγραμματισμένες εργασίες μπορούν πράγματι να εκτελεστούν με την απαιτούμενη ροή. Στο πλαίσιο αυτό, η συνδυαστική εφαρμογή των συστημάτων ελέγχου και της λιτής κατασκευής μπορεί να δημιουργήσει ένα περισσότερο ολοκληρωμένο σύστημα προγραμματισμού και ελέγχου.

Όπως αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, τα συστήματα ελέγχου παρέχουν τη δομή για τον καθορισμό και την παρακολούθηση του αντικείμενου του έργου, του χρόνου, του κόστους, της προόδου και των κινδύνων, χρησιμοποιώντας μεταξύ άλλων WBS, γραμμές αναφοράς, CPM, διαχείριση δεδουλευμένης αξίας (EVM), πρόβλεψη και δείκτες απόδοσης (KPIs). Ειδικότερα, το EVM συνδέει το αντικείμενο του έργου με το χρονοδιάγραμμα και τους διαθέσιμους πόρους, επιτρέποντας αντικειμενική μέτρηση της απόδοσης και πρόβλεψη της μελλοντικής εξέλιξης του έργου (PMI, 2020).

Η λιτή κατασκευή συμπληρώνει αυτή την προσέγγιση εστιάζοντας περισσότερο στην αξιοπιστία της παραγωγής, στη ροή των εργασιών, στην άρση περιορισμών και στη μείωση δραστηριοτήτων που δεν δημιουργούν αξία. Συνεπώς, ο συνδυασμός τους δεν αποσκοπεί στην αντικατάσταση της μίας προσέγγισης από την άλλη, αλλά στη δημιουργία ενός συστήματος στο οποίο ο κεντρικός σχεδιασμός και η μέτρηση της απόδοσης συνδέονται άμεσα με την πραγματική κατάσταση της παραγωγής στο εργοτάξιο.

Στα έργα αιολικών πάρκων η προσέγγιση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς η κατασκευή χαρακτηρίζεται από διαδοχικές και αλληλεξαρτώμενες δραστηριότητες, σημαντικές απαιτήσεις εφοδιαστικής και υψηλή εξάρτηση από τη διαθεσιμότητα εξοπλισμού, συνεργείων και κατάλληλων συνθηκών εκτέλεσης. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι επομένως να εξετάσει πώς τα εργαλεία μπορούν να συνδεθούν λειτουργικά, καταλήγοντας σε ένα ενιαίο πλαίσιο εφαρμογής προσαρμοσμένο στις ανάγκες κατασκευής αιολικών πάρκων.

5.2 Ενοποιημένο Πλαίσιο Προγραμματισμού και Ελέγχου

Η πρώτη και σημαντικότερη περιοχή συνδυαστικής εφαρμογής αφορά τη σύνδεση του μακροπρόθεσμου προγραμματισμού του έργου με τον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό των εργασιών. Το κεντρικό πρόγραμμα καθορίζει τις χρονικές απαιτήσεις και τις βασικές αλληλεξαρτήσεις, ενώ οι λιτές διαδικασίες εξετάζουν σταδιακά εάν οι προγραμματισμένες εργασίες είναι πραγματικά έτοιμες προς εκτέλεση.

5.2.1 Σύνδεση Κύριου Χρονοδιαγράμματος Έργου (Master Schedule) και Προγραμματισμού Φάσεων (Phase Planning)

Το κύριο χρονοδιάγραμμα αποτελεί το ανώτερο επίπεδο χρονικού προγραμματισμού, στο οποίο αποτυπώνονται οι κύριες δραστηριότητες, οι λογικές αλληλεξαρτήσεις, τα ορόσημα (milestones) και η κρίσιμη διαδρομή (Critical Path) του

έργου. Η διατήρηση ενός λογικά δομημένου προγράμματος είναι απαραίτητη ώστε τα επιμέρους στοιχεία του να υποστηρίζουν τα ανώτερα ορόσημα και να είναι δυνατή η αξιόπιστη παρακολούθηση της απόδοσης.

Στη συνδυαστική προσέγγιση, το κύριο χρονοδιάγραμμα δεν αντιμετωπίζεται ως ένα απομονωμένο πρόγραμμα που απλώς ενημερώνεται περιοδικά. Αποτελεί το σημείο αναφοράς για την ανάπτυξη των επόμενων επιπέδων σχεδιασμού:

- Κύριο Χρονοδιάγραμμα
 - Ορόσημα
 - Προγραμματισμός Φάσεων
 - Βραχυπρόθεσμος Προγραμματισμός
 - Εβδομαδιαίος Προγραμματισμός

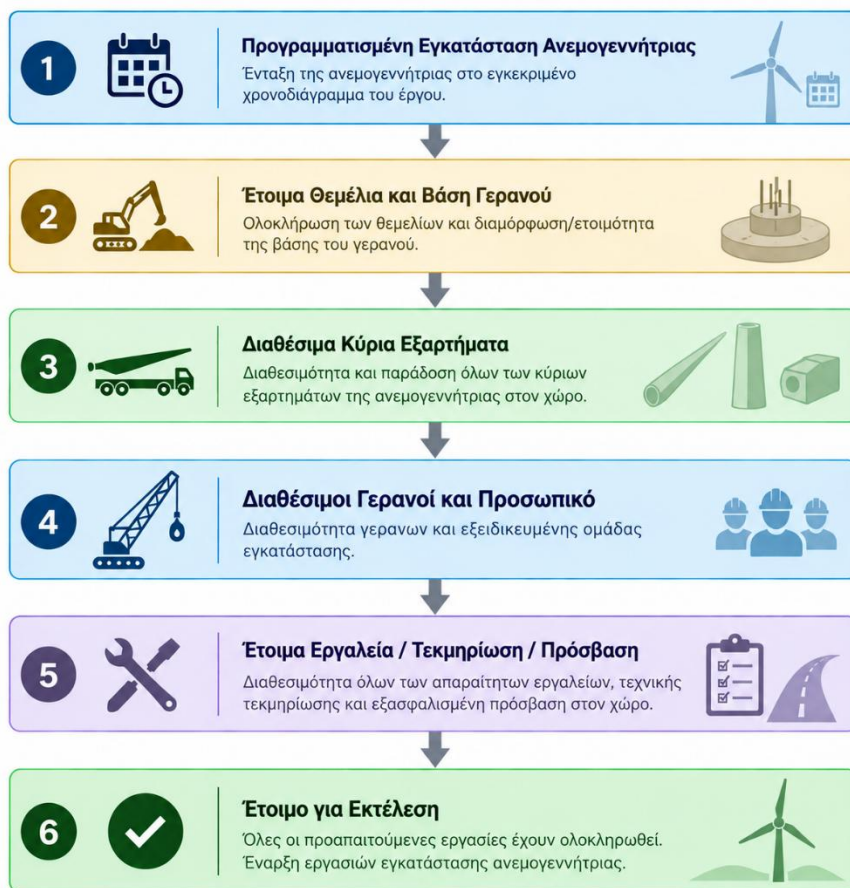
Ο προγραμματισμός φάσεων εξειδικεύει τις απαιτήσεις του κεντρικού προγράμματος σε συγκεκριμένες φάσεις παραγωγής και επιτρέπει τον καλύτερο συντονισμό των εμπλεκόμενων ομάδων. Με αυτόν τον τρόπο, ο μακροπρόθεσμος σχεδιασμός των συστημάτων ελέγχου μετατρέπεται σταδιακά σε περισσότερο λεπτομερή και συνεργατικό σχεδιασμό παραγωγής.

Σε ένα αιολικό πάρκο, για παράδειγμα, το κύριο χρονοδιάγραμμα μπορεί να καθορίζει το ορόσημο “Ολοκλήρωση Κύριας Εγκατάστασης Α/Γ”, ενώ ο προγραμματισμός φάσεων οργανώνει τη σειρά και τις προϋποθέσεις εγκατάστασης των επιμέρους ανεμογεννητριών.

5.2.2 Βραχυπρόθεσμος Προγραμματισμός (Look Ahead Planning) και Προγραμματισμός Προετοιμασίας Εργασιών (Make-Ready Planning)

Η σύνδεση μεταξύ του γενικού προγράμματος και της πραγματικής εκτέλεσης πραγματοποιείται κυρίως μέσω του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού. Στο επίπεδο αυτό εξετάζονται οι δραστηριότητες που πρόκειται να εκτελεστούν στο άμεσο μέλλον και αναγνωρίζονται εγκαίρως οι περιορισμοί που μπορούν να εμποδίσουν την έναρξή τους.

Η βασική μεταβολή σε σχέση με έναν καθαρά ημερολογιακό προγραμματισμό είναι ότι μία δραστηριότητα δεν θεωρείται έτοιμη μόνο επειδή πλησιάζει η προγραμματισμένη ημερομηνία έναρξής της. Πρέπει προηγουμένως να έχουν εξασφαλιστεί οι απαραίτητες προϋποθέσεις εκτέλεσης.



Σχήμα 6: Ενδεικτικό Διάγραμμα Ετοιμότητας Εγκατάστασης Ανεμογεννήτριας

Η διαδικασία προγραμματισμού προετοιμασίας εργασιών λειτουργεί επομένως ως προληπτικός μηχανισμός ελέγχου μεταξύ του προγράμματος και του εργοταξίου. Αντί η ομάδα να διαπιστώνει μία καθυστέρηση αφού αυτή έχει ήδη συμβεί, επιχειρεί να εντοπίσει εγκαίρως τις συνθήκες που μπορούν να την προκαλέσουν.

5.2.3 Εβδομαδιαίος Προγραμματισμός Εργασιών (Weekly Work Planning) και Ανατροφοδότηση του Κύριου Χρονοδιαγράμματος (Master Schedule)

Οι εργασίες που έχουν καταστεί πραγματικά διαθέσιμες μεταφέρονται στον εβδομαδιαίο προγραμματισμό, όπου μετατρέπονται σε συγκεκριμένες βραχυπρόθεσμες δεσμεύσεις. Η εκτέλεσή τους παράγει πραγματικά δεδομένα σχετικά με την πρόοδο, τις καθυστερήσεις και τους λόγους μη ολοκλήρωσης.

Τα δεδομένα αυτά δεν πρέπει να παραμένουν αποκλειστικά στο επίπεδο του λιτού προγραμματισμού. Πρέπει να επιστρέφουν στο σύστημα ελέγχου του έργου και να χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση του χρονοδιαγράμματος, την αξιολόγηση των αποκλίσεων και, όπου απαιτείται, την αναθεώρηση των προβλέψεων.

Η ουσιαστική αξία της συνδυαστικής προσέγγισης βρίσκεται ακριβώς σε αυτή την ανατροφοδότηση. Το κύριο χρονοδιάγραμμα καθορίζει την απαιτούμενη κατεύθυνση του έργου, ενώ τα δεδομένα από την πραγματική πρόοδο των εργασιών επιτρέπουν τη συνεχή αξιολόγηση του κατά πόσο αυτή η κατεύθυνση παραμένει εφικτή.

5.3 Ενοποίηση Παρακολούθησης Απόδοσης και Παραγωγικής Αξιοπιστίας

Η δεύτερη βασική περιοχή συνδυαστικής εφαρμογής αφορά τη σύνδεση της συνολικής μέτρησης της απόδοσης του έργου με την αξιοπιστία της καθημερινής παραγωγής. Τα συστήματα ελέγχου και η λιτή κατασκευή χρησιμοποιούν διαφορετικούς δείκτες, οι οποίοι όμως μπορούν να δημιουργήσουν μία περισσότερο ολοκληρωμένη εικόνα όταν αναλύονται συνδυαστικά.

5.3.1 Μέτρηση Προόδου (Progress Measurement) και Διαχείριση Δεδουλεμένης Αξίας (EVM)

Η παρακολούθηση της φυσικής προόδου επιτρέπει τη σύγκριση της πραγματικής κατάστασης του έργου με την εγκεκριμένη γραμμή αναφοράς. Όταν η πρόοδος συνδέεται με το κόστος και τον χρόνο μέσω του EVM, η διοίκηση μπορεί να αξιολογήσει αντικειμενικότερα την απόδοση και να αναπτύξει προβλέψεις για την τελική εξέλιξη του έργου.

Η προσέγγιση αυτή παρέχει σημαντική εικόνα για τη συνολική κατάσταση του έργου, αλλά δεν αποτυπώνει από μόνη της όλες τις λειτουργικές αιτίες που επηρεάζουν την εκτέλεση των εργασιών.

5.3.2 Συνδυαστική Χρήση SPI, CPI και PPC

Η προσέγγιση της λιτής κατασκευής μπορεί να συμπληρώσει τη μέτρηση της συνολικής απόδοσης μέσω δεικτών που εξετάζουν την αξιοπιστία του βραχυπρόθεσμου σχεδιασμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το ποσοστό ολοκλήρωσης προγραμματισμένων εργασιών (PPC), το οποίο δείχνει το ποσοστό των προγραμματισμένων δεσμεύσεων που ολοκληρώθηκαν όπως είχε συμφωνηθεί.

Έτσι, οι δείκτες μπορούν να εξετάζονται σε δύο διαφορετικά αλλά συμπληρωματικά επίπεδα:

Πίνακας 7: Πίνακας Δεικτών Ελέγχου Έργου

Δείκτης	Τι αξιολογεί	Επίπεδο ελέγχου
 SPI Schedule Performance Index	Απόδοση έναντι του χρονικού σχεδιασμού Δείχνει αν το έργο εκτελείται πιο γρήγορα ή πιο αργά από το προγραμματισμένο χρονοδιάγραμμα.	 Project Controls
 CPI Cost Performance Index	Αποδοτικότητα κόστους Δείχνει αν το έργο εκτελείται με χαμηλότερο ή υψηλότερο κόστος από τον προϋπολογισμό.	 Project Controls
 PPC Percent Plan Complete	Αξιοπιστία βραχυπρόθεσμων δεσμεύσεων Δείχνει το ποσοστό των εργασιών που ολοκληρώθηκαν όπως είχαν προγραμματιστεί και συμφωνηθεί σε μια συγκεκριμένη περίοδο.	 Lean Construction

Οι δείκτες δεν είναι ισοδύναμοι και δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται εναλλακτικά. Για παράδειγμα, ένα έργο μπορεί να παρουσιάζει ικανοποιητικό PPC σε μία συγκεκριμένη περίοδο, αλλά να παραμένει συνολικά καθυστερημένο έναντι της γραμμής αναφοράς λόγω προηγούμενων αποκλίσεων. Αντίστοιχα, η μέτρηση EV μπορεί να υποδείξει ότι το έργο βρίσκεται πίσω από τον σχεδιασμό, χωρίς από μόνη της να εξηγεί ποιοι λειτουργικοί περιορισμοί προκαλούν την απόκλιση.

5.3.3 Από τη Διαπίστωση της Απόκλισης στην Ανάλυση της Αιτίας

Η σημαντικότερη συνεισφορά της συνδυαστικής εφαρμογής είναι η μετάβαση από την απλή καταγραφή μιας απόκλισης στην κατανόηση των αιτιών της.

Για παράδειγμα, τα συστήματα ελέγχου (Project Controls) μπορεί να καταγράψουν μειωμένη πρόοδο ή δυσμενή απόκλιση από το πρόγραμμα. Παράλληλα, η ανάλυση των RNC μπορεί να δείξει ότι οι κυριότερες αιτίες είναι καθυστερημένες παραδόσεις, μη διαθεσιμότητα γερανών, μη ολοκλήρωση προαπαιτούμενων εργασιών ή ανεπαρκής προετοιμασία των εργασιών.

Στην περίπτωση ενός αιολικού πάρκου, εάν παρατηρούνται επαναλαμβανόμενες καθυστερήσεις κατά τη διάρκεια της κύριας εγκατάστασης, λόγω μη έγκαιρης διαθεσιμότητας εξαρτημάτων, η πληροφορία δεν πρέπει να περιορίζεται σε μία απλή μετατόπιση των ημερομηνιών στο πρόγραμμα. Η αιτία πρέπει να συνδέεται με τον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό, τη διαχείριση περιορισμών και τον προγραμματισμό της εφοδιαστικής, ώστε να περιοριστεί η πιθανότητα επανάληψής της στις επόμενες ανεμογεννήτριες.

Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα μεταβαίνει από μία κυρίως αντιδραστική λογική ελέγχου σε περισσότερο προληπτική διαχείριση της απόδοσης. Η μέτρηση δείχνει πού υπάρχει πρόβλημα, η ανάλυση της εκτέλεσης της εργασίας βοηθά να προσδιοριστεί γιατί δημιουργήθηκε και η διαδικασία συνεχούς βελτίωσης μετατρέπει την πληροφορία σε διορθωτική δράση.

5.4 Ενοποίηση Διαχείρισης Κινδύνων (Risk) και Περιορισμών (Constraint Management)

Η συνδυαστική εφαρμογή του διαχείρισης κινδύνων και της διαχείρισης περιορισμών ενισχύει τον προληπτικό χαρακτήρα της διαχείρισης του έργου. Παρότι οι δύο διαδικασίες σχετίζονται, δεν είναι ταυτόσημες. Ένας κίνδυνος (risk) αφορά ένα αβέβαιο γεγονός ή συνθήκη που, εφόσον συμβεί, μπορεί να επηρεάσει τους στόχους του έργου, ενώ ένας περιορισμός (constraint) αποτελεί υφιστάμενη συνθήκη που εμποδίζει ή μπορεί να εμποδίσει την ετοιμότητα μιας συγκεκριμένης εργασίας. Συνεπώς, πρώτο λειτουργεί κυρίως στο επίπεδο της αβεβαιότητας, ενώ το δεύτερο στο επίπεδο της παραγωγικής ετοιμότητας.

5.4.1 Σύνδεση Μητρώου Κινδύνων (Risk Register) και Μητρώου Περιορισμών (Constraint Log)

Στο ενοποιημένο πλαίσιο, τα δύο αυτά μητρώα λειτουργούν συμπληρωματικά. Οι σημαντικοί κίνδυνοι του έργου παρακολουθούνται ως προς την πιθανότητα, την επίπτωση, την απόκριση και τον υπεύθυνο διαχείρισης, ενώ μέσω του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού, αναγνωρίζονται συγκεκριμένα εμπόδια που πρέπει να αρθούν πριν από την εκτέλεση των εργασιών.

Η σύνδεση μπορεί να αποδοθεί ως:



Σχήμα 7: Κύκλος Διαχείρισης Κινδύνων και Περιορισμών

Για παράδειγμα, η πιθανή καθυστέρηση μεταφοράς κύριων εξαρτημάτων αποτελεί κίνδυνο για το πρόγραμμα εγκατάστασης. Όταν όμως είναι ήδη γνωστό ότι τα πτερύγια μιας συγκεκριμένης ανεμογεννήτριας δεν θα είναι διαθέσιμα πριν από την προγραμματισμένη ημερομηνία εγκατάστασης, η έλλειψή τους αποτελεί πλέον συγκεκριμένο περιορισμό που απαιτεί διαχειριστική ενέργεια.

5.5 Αναφορές Απόδοσης (Reporting), Οπτική Διαχείριση (Visual Management) και Συνεχής Βελτίωση (Continuous Improvement)

Η ενοποίηση της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου, προϋποθέτει ότι οι πληροφορίες από τον κεντρικό έλεγχο του έργου και την καθημερινή εκτέλεση των εργασιών μετατρέπονται σε μία κοινή και κατανοητή εικόνα της απόδοσης. Οι αναφορές απόδοσης και οι πίνακες ελέγχου μπορούν επομένως να συνδυαστούν με τις αρχές της οπτικής διαχείρισης, ώστε οι αποκλίσεις, οι περιορισμοί και οι προτεραιότητες να είναι άμεσα ορατές στα διαφορετικά επίπεδα διοίκησης.

5.5.1 Ενοποιημένη Πληροφόρηση και Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs)

Ένα αποτελεσματικό σύστημα αναφορών απόδοσης δεν πρέπει να περιορίζεται στην παρουσίαση της συνολικής προόδου και των αποκλίσεων από τη γραμμή αναφοράς. Μπορεί να ενσωματώνει δεδομένα τόσο από τα συστήματα ελέγχου έργου όσο και από την προσέγγιση λιτής κατασκευής, όπως η πραγματική πρόοδος, η απόκλιση χρονοδιαγράμματος, ο δείκτης απόδοσης χρονοδιαγράμματος, ο δείκτης απόδοσης κόστους, το ποσοστό ολοκλήρωσης προγραμματισμένων εργασιών, οι ανοικτοί περιορισμοί, οι κρίσιμοι κίνδυνοι και η κατάσταση των βασικών οροσήμων.

Με τον τρόπο αυτό, οι δείκτες αποτελέσματος συνδέονται με δείκτες που αποτυπώνουν την αξιοπιστία του προγραμματισμού και την ετοιμότητα των εργασιών προς εκτέλεση. Σε ένα αιολικό πάρκο, για παράδειγμα, ένας πίνακας ελέγχου μπορεί να παρουσιάζει παράλληλα την πρόοδο ανά ανεμογεννήτρια, την κατάσταση των βασικών οροσήμων, τους ανοικτούς περιορισμούς και την αξιοπιστία του εβδομαδιαίου προγραμματισμού.

5.5.2 Σύνδεση Αναφορών Απόδοσης και Συνεχούς Βελτίωσης

Η πραγματική αξία της μέτρησης προκύπτει όταν τα δεδομένα που συλλέγονται αξιοποιούνται για τη βελτίωση της επόμενης περιόδου εργασιών. Οι επαναλαμβανόμενες αποκλίσεις, οι αιτίες μη ολοκλήρωσης και οι περιορισμοί μπορούν να αναλύονται συστηματικά, ώστε να εντοπίζονται οι βασικές αιτίες και να εφαρμόζονται κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες.

Ένα πρόβλημα που εντοπίζεται κατά την εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας μπορεί να οδηγήσει σε προσαρμογή της μεθόδου προετοιμασίας ή εκτέλεσης των επόμενων ανεμογεννητριών. Με τον τρόπο αυτό, τα διδάγματα από το έργο δεν αποτελούν απλώς πληροφορίες που καταγράφονται μετά την ολοκλήρωσή του, αλλά αξιοποιούνται κατά τη διάρκεια της κατασκευής και ενσωματώνονται στις επόμενες εργασίες, υποστηρίζοντας τη συνεχή βελτίωση.

5.6 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η ανάλυση του παρόντος κεφαλαίου ανέδειξε ότι η λιτή κατασκευή και τα συστήματα ελέγχου έργου δεν αποτελούν ανταγωνιστικές, αλλά συμπληρωματικές προσεγγίσεις στη διαχείριση κατασκευαστικών έργων. Τα συστήματα ελέγχου έργου παρέχουν ένα δομημένο πλαίσιο για τον προγραμματισμό, τη μέτρηση, τον έλεγχο και την πρόβλεψη της απόδοσης, ενώ η λιτή κατασκευή επικεντρώνεται περισσότερο στην αξιοπιστία της εκτέλεσης των εργασιών, στην άρση περιορισμών, στη βελτίωση της ροής και στη συνεχή μάθηση.

Κεντρικό στοιχείο της συνδυαστικής εφαρμογής αποτελεί η σύνδεση των διαφορετικών επιπέδων προγραμματισμού. Το κύριο χρονοδιάγραμμα του έργου και οι γραμμές αναφοράς καθορίζουν τους συνολικούς στόχους, ενώ ο προγραμματισμός φάσεων, ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός, η διαδικασία προετοιμασίας εργασιών και ο εβδομαδιαίος προγραμματισμός μετατρέπουν σταδιακά αυτούς τους στόχους σε εργασίες που είναι πραγματικά έτοιμες προς εκτέλεση. Αντίστοιχα, η συνδυασμένη αξιοποίηση του δείκτη απόδοσης χρονοδιαγράμματος, του δείκτη απόδοσης κόστους και του ποσοστού ολοκλήρωσης προγραμματισμένων εργασιών, μαζί με την ανάλυση των αποκλίσεων και των αιτιών μη ολοκλήρωσης, επιτρέπει τη σύνδεση της συνολικής απόδοσης του έργου με την αξιοπιστία του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού (Ballard & Tommelein, 2021).

Στα έργα αιολικών πάρκων, η προσέγγιση αυτή αποκτά ιδιαίτερη σημασία λόγω της έντονης αλληλεξάρτησης μεταξύ των έργων υποδομής, της εφοδιαστικής, της εγκατάστασης των ανεμογεννητριών, των ηλεκτρολογικών εργασιών, της ηλεκτρίσης και της θέσης σε λειτουργία. Η έγκαιρη αναγνώριση και άρση των περιορισμών, σε συνδυασμό με τη συστηματική παρακολούθηση του χρόνου, του κόστους και της φυσικής προόδου, μπορεί να περιορίσει τις διακοπές στη ροή των εργασιών και να βελτιώσει τον συντονισμό μεταξύ των εμπλεκόμενων ομάδων.

Συνολικά, το προτεινόμενο πλαίσιο μπορεί να αποδοθεί μέσω του ακόλουθου επαναλαμβανόμενου κύκλου:



Σχήμα 8: Σύγκροτος Σνεχούς Βελτίωσης Έργου

Η αξία του κύκλου αυτού βρίσκεται στη δημιουργία ενός συστήματος συνεχούς ανατροφοδότησης, στο οποίο ο προγραμματισμός καθοδηγεί την εκτέλεση των εργασιών και τα πραγματικά δεδομένα από το εργοτάξιο επιστρέφουν στο σύστημα ελέγχου, υποστηρίζοντας την πρόβλεψη της εξέλιξης του έργου, τη λήψη διορθωτικών ενεργειών και τον επαναπρογραμματισμό. Κατά συνέπεια, η συνδυαστική εφαρμογή της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου έργου μπορεί να αποτελέσει τη βάση για μια ολοκληρωμένη, μετρήσιμη και προληπτική προσέγγιση στη διαχείριση της κατασκευής αιολικών πάρκων, συνδέοντας τον στρατηγικό έλεγχο του έργου με την πραγματική εκτέλεση των εργασιών στο εργοτάξιο.

Κεφάλαιο 6: Μεθοδολογία Έρευνας

6.1 Ερευνητικός Σκοπός και Ερευνητικά Ερωτήματα

Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι η διερεύνηση της συνδυαστικής εφαρμογής των αρχών της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου έργου στη διαχείριση της κατασκευής αιολικών πάρκων. Ειδικότερα, εξετάζεται κατά πόσο η σύνδεση του κεντρικού προγραμματισμού και ελέγχου με τον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό, τη διαχείριση περιορισμών και τη συνεχή βελτίωση μπορεί να συμβάλει στην αποτελεσματικότερη παρακολούθηση, τον έλεγχο και τον συντονισμό της κατασκευαστικής διαδικασίας.

Σε αντίθεση με μια αποκλειστικά θεωρητική προσέγγιση, η έρευνα επικεντρώνεται στην εφαρμογή των εννοιών που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια σε πραγματικές συνθήκες κατασκευής αιολικών έργων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη διερεύνηση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ του προγραμματισμού, της πραγματικής εκτέλεσης των εργασιών, της διαθεσιμότητας των πόρων, των περιορισμών και των αποκλίσεων μέσα στο πραγματικό περιβάλλον του έργου.

Με βάση τον παραπάνω σκοπό, τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα διατυπώνονται ως εξής:

1. Πώς μπορούν να συνδυαστούν λειτουργικά τα εργαλεία Lean Construction και Project Controls στη διαχείριση της κατασκευής αιολικών πάρκων;
2. Πώς μπορεί η σύνδεση μακροπρόθεσμου και βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού να συμβάλει στην έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων και περιορισμών;
3. Με ποιον τρόπο η συνδυασμένη παρακολούθηση της προόδου, της αξιοπιστίας στην εκτέλεση των εργασιών, των κινδύνων και των περιορισμών μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη αποφάσεων και τη συνεχή βελτίωση;
4. Ποια είναι τα βασικά οφέλη και οι περιορισμοί εφαρμογής ενός ενοποιημένου Lean Construction–Project Controls πλαισίου σε έργα αιολικών πάρκων;

Τα ερωτήματα αυτά καθορίζουν τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων και συνδέουν το θεωρητικό πλαίσιο των προηγούμενων κεφαλαίων με την εμπειρική διερεύνηση που ακολουθεί.

6.2 Ερευνητικός Σχεδιασμός και Μελέτη Περίπτωσης

Για την επίτευξη του ερευνητικού σκοπού επιλέγεται η στρατηγική της μελέτης περίπτωσης. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι κατάλληλη για τη διερεύνηση σύνθετων φαινομένων μέσα στο πραγματικό οργανωτικό και επιχειρησιακό τους περιβάλλον, ιδιαίτερα όταν τα όρια μεταξύ του υπό εξέταση φαινομένου και του πλαισίου στο οποίο αυτό εξελίσσεται δεν είναι σαφώς διακριτά (Yin, 2018). Παράλληλα, η μελέτη περίπτωσης επιτρέπει την αξιοποίηση πολλαπλών πηγών δεδομένων και τον συνδυασμό ποιοτικών και ποσοτικών στοιχείων, συμβάλλοντας στην πληρέστερη κατανόηση του αντικειμένου της έρευνας.

6.2.1 Επιλογή της Μελέτης Περίπτωσης

Ως εμπειρική βάση της έρευνας επιλέγεται έργο κατασκευής αιολικού πάρκου συνολικής ισχύος 66,6 MW, το οποίο αποτελείται από δύο διακριτές αλλά αλληλεξαρτώμενες φάσεις. Η πρώτη φάση έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 36,3 MW και η δεύτερη 30,3 MW, ενώ οι δύο περιοχές του έργου απέχουν μεταξύ τους περίπου 30 χλμ. Η συγκεκριμένη διάρθρωση επιτρέπει την εξέταση των βασικών φάσεων της κατασκευαστικής διαδικασίας, καθώς και των μεταξύ τους αλληλεξαρτήσεων ως προς τον προγραμματισμό, τη διαθεσιμότητα πόρων, την εφοδιαστική και την εκτέλεση των εργασιών.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των φάσεων, καθώς μία απόκλιση σε μία δραστηριότητα μπορεί να επηρεάσει τη διαθεσιμότητα του επόμενου μετώπου εργασίας, τους πόρους και τελικά το συνολικό χρονοδιάγραμμα.

Η μελέτη περίπτωσης δεν αποσκοπεί συνεπώς μόνο στην περιγραφή των έργων, αλλά στη χρησιμοποίησή τους ως πεδίο εφαρμογής και αξιολόγησης του συνδυαστικού πλαισίου λιτής κατασκευής και συστημάτων ελέγχου που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5.

6.2.2 Μονάδα και Όρια Ανάλυσης

Ως βασική μονάδα ανάλυσης ορίζεται η διαδικασία διαχείρισης και ελέγχου της κατασκευής των εξεταζόμενων αιολικών πάρκων. Η ανάλυση επικεντρώνεται κυρίως στις δραστηριότητες που σχετίζονται με τον χρονικό προγραμματισμό, την πρόοδο, την εφοδιαστική, την ετοιμότητα των εργασιών, τους κινδύνους και τους περιορισμούς.

Επιδιώκεται η σε βάθος διερεύνηση της εφαρμογής του προτεινόμενου πλαισίου σε πραγματικές συνθήκες έργου και η εξαγωγή συμπερασμάτων που μπορούν να αξιοποιηθούν σε έργα με αντίστοιχα χαρακτηριστικά.

6.3 Μέθοδος Επεξεργασίας και Ανάλυσης Δεδομένων

Η επεξεργασία και ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιείται με στόχο τη σύνδεση των πραγματικών στοιχείων του έργου με το θεωρητικό πλαίσιο της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου έργου. Τα δεδομένα οργανώνονται και εξετάζονται με βάση βασικές παραμέτρους, όπως η πρόοδος των εργασιών, το χρονοδιάγραμμα, το κόστος, οι κίνδυνοι, οι περιορισμοί και η αξιοπιστία στην εκτέλεση των προγραμματισμένων εργασιών.

Η ανάλυση περιλαμβάνει τη σύγκριση της προγραμματισμένης με την πραγματική εξέλιξη του έργου, τον εντοπισμό αποκλίσεων και την εξέταση των αιτιών που τις προκαλούν. Παράλληλα, αξιοποιούνται κατάλληλοι δείκτες απόδοσης και στοιχεία του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού, ώστε να αξιολογηθεί η σύνδεση μεταξύ του συνολικού ελέγχου του έργου και της καθημερινής εκτέλεσης των εργασιών.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω πινάκων, διαγραμμάτων και βασικών δεικτών, όπου αυτό κρίνεται απαραίτητο, ώστε να υποστηρίζεται η συστηματική αξιολόγηση της συνδυαστικής εφαρμογής των δύο προσεγγίσεων.

Επιπλέον, η διαθεσιμότητα και το επίπεδο λεπτομέρειας των δεδομένων ενδέχεται να διαφέρουν μεταξύ των εξεταζόμενων έργων και χρονικών περιόδων. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα δεν αποσκοπούν σε στατιστική γενίκευση, αλλά στην αναλυτική κατανόηση της εφαρμογής του προτεινόμενου πλαισίου σε πραγματικές συνθήκες κατασκευής.

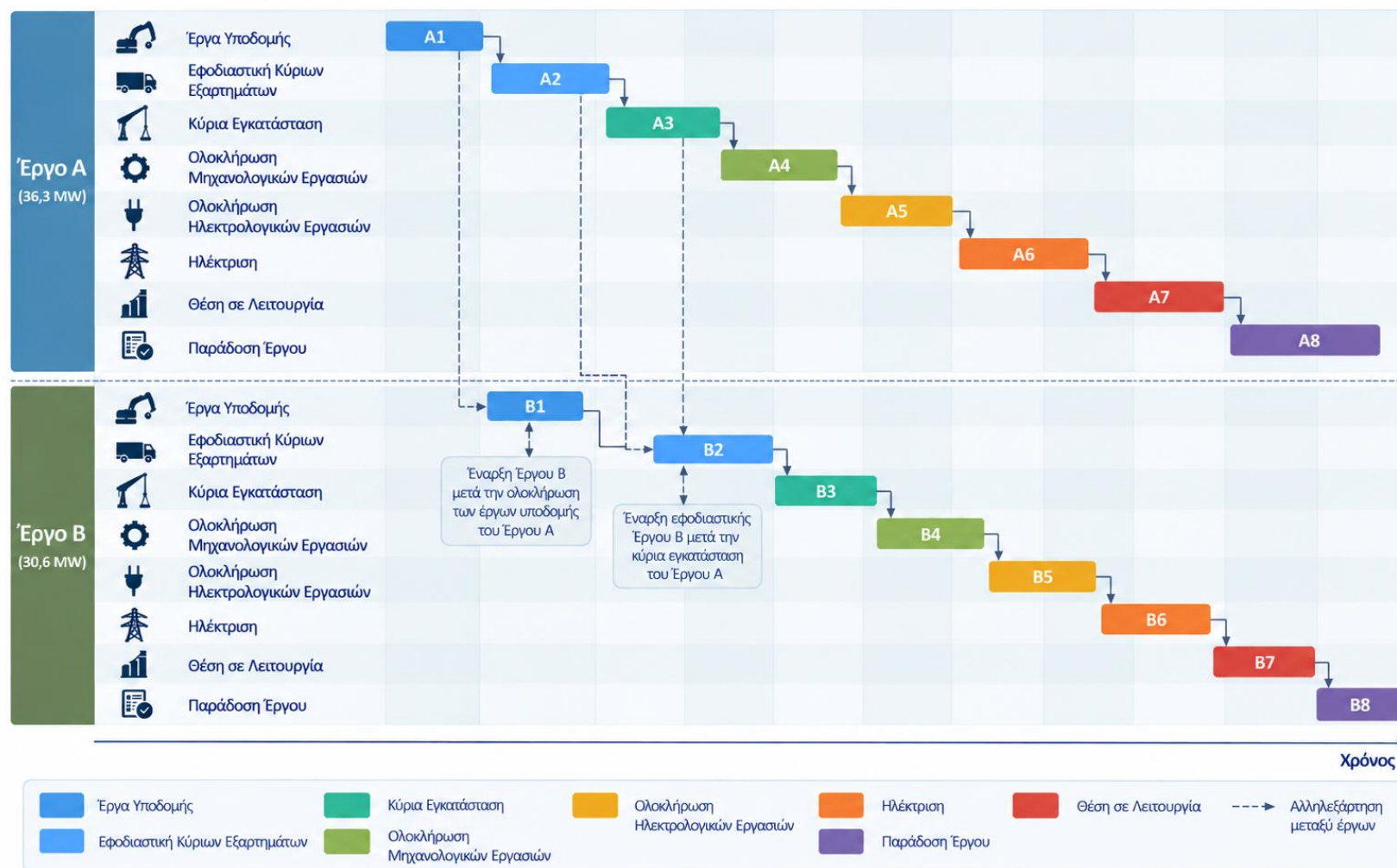
Κεφάλαιο 7: Μελέτη Περίπτωσης – Κατασκευή Αιολικού Πάρκου 67 MW

7.1 Παρουσίαση Έργου

Η παρούσα μελέτη περίπτωσης αφορά έργο κατασκευής αιολικού πάρκου συνολικής ισχύος 66,6 MW, το οποίο αποτελείται από δύο διακριτές αλλά αλληλεξαρτώμενες φάσεις. Η πρώτη φάση έχει συνολική εγκατεστημένη ισχύ 36,3 MW (Έργο Α) και η δεύτερη 30,6 MW (Έργο Β), ενώ οι δύο περιοχές του έργου απέχουν μεταξύ τους περίπου 30 χλμ. Σκοπός της ανάλυσης είναι η πρακτική εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια και ειδικότερα η διερεύνηση της συνδυαστικής χρήσης λιτής κατασκευής και συστημάτων ελέγχου σε πραγματικές συνθήκες κατασκευής.

Το έργο εξετάζεται ως ένα ολοκληρωμένο κατασκευαστικό σύστημα στο οποίο συμμετέχουν διαφορετικές τεχνικές ειδικότητες, προμηθευτές και υπεργολάβοι. Η υλοποίησή του απαιτεί τον συντονισμό των χωματουργικών και πολιτικών έργων, της εφοδιαστικής αλυσίδας, της μεταφοράς των κύριων εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών, των ανυψωτικών εργασιών, της μηχανολογικής και ηλεκτρολογικής ολοκλήρωσης και τελικά, της ενεργοποίησης και θέσης των ανεμογεννητριών σε λειτουργία.

Η συνολική κατασκευαστική ακολουθία και για τις δύο φάσεις του έργου, μπορεί να αποδοθεί ως εξής:



Σχήμα 9: Διαδοχή και Αλληλεξάρτηση Φάσεων Κατασκευής για τα Έργα A και B

Οι παραπάνω φάσεις παρουσιάζουν σημαντικές τεχνικές και χρονικές αλληλεξαρτήσεις. Για παράδειγμα, η έναρξη της κύριας εγκατάστασης μιας ανεμογεννήτριας στο Έργο Β προϋποθέτει την ολοκλήρωση της θεμελίωσης και της πλατείας ανέγερσης, την εξασφάλιση της πρόσβασης, την παράδοση των κύριων εξαρτημάτων των ανεμογεννητριών και στα δύο έργα, καθώς και τη διαθεσιμότητα γερανών, λοιπών μηχανημάτων υποστήριξης, εξοπλισμού και εξειδικευμένου προσωπικού εγκατάστασης, εφόσον έχει ολοκληρωθεί στο Έργο Α. Κατά συνέπεια, μία απόκλιση σε ένα προηγούμενο στάδιο μπορεί να μεταφερθεί στα επόμενα και να επηρεάσει το συνολικό χρονοδιάγραμμα του έργου.

Η μελέτη περίπτωσης επικεντρώνεται επομένως όχι μόνο στο τελικό αποτέλεσμα της κατασκευής, αλλά και στον τρόπο με τον οποίο προγραμματίστηκαν, συντονίστηκαν, εκτελέστηκαν και ελέγχθηκαν οι επιμέρους εργασίες. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη σύγκριση της προγραμματισμένης με την πραγματική εξέλιξη, στην αναγνώριση των σημαντικότερων αποκλίσεων και κινδύνων και στην αξιολόγηση των εργαλείων Lean Construction και Project Controls που παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

7.2 Τεχνικά Χαρακτηριστικά

Το υπό μελέτη έργο αφορά την κατασκευή δύο χερσαίων αιολικών πάρκων, συνολικής ονομαστικής ισχύος 66,9 MW, τα οποία περιλαμβάνουν συνολικά έντεκα ανεμογεννήτριες. Η τεχνική διάρθρωση του έργου περιλαμβάνει, πέραν των ανεμογεννητριών, το σύνολο των απαραίτητων υποδομών για την εγκατάσταση, την ηλεκτρική διασύνδεση και τη θέση τους σε λειτουργία.

Τα κύρια τεχνικά αντικείμενα του έργου μπορούν να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

Πίνακας 8: Κύρια Τεχνικά Αντικείμενα Έργου

Κατηγορία	Κύρια αντικείμενα
 Έργα Υποδομής	Οδοποιία πρόσβασης, πλατείες ανέγερσης, θεμελιώσεις και λοιπές υποδομές
 Εφοδιαστική Αλυσίδα και Εξαρτήματα	Μεταφορά και αποθήκευση εξοπλισμού, διαχείριση υλικών, εξαρτήματα
 Κύρια Εγκατάσταση	Ανέγερση και συναρμολόγηση κύριων τμημάτων Α/Γ
 Εργασίες Ολοκλήρωσης	Ολοκλήρωση μηχανολογικών και ηλεκτρολογικών εργασιών
 Ηλεκτρική Υποδομή	Εσωτερική και εξωτερική δικτύωση ΜΤ, υποσταθμός, συστήματα γείωσης, σύνδεση
 Περίοδος Θέσης σε Λειτουργία	Έλεγχοι και μετρήσεις, δοκιμές, διασύνδεση, θέση σε λειτουργία

Η κατασκευή κάθε ανεμογεννήτριας μπορεί να θεωρηθεί ως μία επιμέρους επαναλαμβανόμενη κατασκευαστική διαδικασία. Η επανάληψη παρόμοιων εργασιών από τη μία θέση ανεμογεννήτριας στην επόμενη δημιουργεί τη

δυνατότητα συγκριτικής παρακολούθησης της απόδοσης και αξιοποίησης των διδαγμάτων από την εμπειρία (Lessons Learned), στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό για την εφαρμογή των αρχών της λιτής κατασκευής (Lean Construction).

Παράλληλα, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των δύο αυτών αιολικών πάρκων δημιουργούν συγκεκριμένους τεχνικούς και οργανωτικούς περιορισμούς. Η μεταφορά και ανύψωση εξαρτημάτων μεγάλων διαστάσεων και βάρους, τα οποία σε ορισμένες περιπτώσεις φθάνουν σε μήκος τα 82 μέτρα και σε βάρος τους 85 τόνους, απαιτούν κατάλληλα διαμορφωμένες οδούς πρόσβασης και πλατείες ανέγερσης με επαρκή συμπίκνωση και φέρουσα ικανότητα. Παράλληλα, οι εργασίες εγκατάστασης εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τη διαθεσιμότητα εξειδικευμένων γερανών και συνεργείων, καθώς και από την επικράτηση κατάλληλων καιρικών συνθηκών. Αντίστοιχα, η μετάβαση από την εγκατάσταση στην ηλεκτρίση και στην θέση σε λειτουργία προϋποθέτει την ολοκλήρωση συγκεκριμένων μηχανολογικών και ηλεκτρολογικών εργασιών και των αντίστοιχων ποιοτικών ελέγχων.

7.3 Δομή Ανάλυσης Εργασιών (Work Breakdown Structure - WBS) της Μελέτης Περίπτωσης

Η WBS χρησιμοποιείται στη μελέτη περίπτωσης ως η βασική δομή οργάνωσης και ανάλυσης του αντικειμένου του έργου. Στην παρούσα μελέτη, η διάρθρωσή της βασίζεται στα κύρια παραδοτέα και στις βασικές κατασκευαστικές φάσεις των δύο αιολικών πάρκων, τα οποία αντιμετωπίζονται ως ενιαίο έργο και δεν διαχωρίζονται σε δύο επιμέρους έργα, με σκοπό την απλούστευση της δομής και την ευκολότερη κατανόησή της. Σε ανώτερο επίπεδο μπορεί να διαμορφωθεί ως εξής:

- Αιολικό Πάρκο – 66,9 MW (36,3 + 30,6 MW)
 - Μελέτη και Αδειοδότηση
 - Διαχείριση Έργου
 - Τεχνικός Σχεδιασμός
 - Προμήθεια Εξαρτημάτων και Υλικών
 - Πολιτικά Έργα (Οδοποιία, Θεμελίωση, κλπ)
 - Ηλεκτρολογικά Έργα (Υποσταθμός, Σταθμοί διασύνδεσης/σύζευξης, Εγκατάσταση δικτύου μέσης τάσης, Εγκατάσταση δικτύου επικοινωνιών, κλπ)
 - Μεταφορά Εξοπλισμού
 - Εγκατάσταση Ανεμογεννητριών
 - Θέση σε λειτουργία (Commissioning)
 - Ολοκλήρωση και Παράδοση Έργου

Η παραπάνω δομή μπορεί στη συνέχεια να αναλυθεί σε χαμηλότερα επίπεδα. Ενδεικτικά, η Εγκατάσταση Ανεμογεννητριών μπορεί να αναπτυχθεί ως:

- Εγκατάσταση Ανεμογεννητριών
 - Αρχική Μετακίνηση και Προετοιμασία Γερανών
 - Παραλαβή και Έλεγχος Εξοπλισμού
 - Εγκατάσταση Ανεμογεννητριών
 - Αποσυναρμολόγηση και Αποχώρηση Γερανών
 - Μηχανολογικές και Ηλεκτρολογικές συνδέσεις/εργασίες
 - Αποχώρηση Συνεργείων Εγκατάστασης & Η/Μ εργασιών
 - Δοκιμές / Έλεγχος Πάρκου (Commissioning)
 - Θέση σε λειτουργία Πάρκου (Commissioning)

Αντίστοιχα, όπου απαιτείται λεπτομερέστερος έλεγχος, η WBS μπορεί να αναπτυχθεί ανά ανεμογεννήτρια (Α/Γ), επιτρέποντας την παρακολούθηση της προόδου κάθε θέσης και τη σύγκριση μεταξύ διαφορετικών Α/Γ.

Παράλληλα, η WBS δημιουργεί τη βάση για τις αναλύσεις που ακολουθούν. Στην 7.4 θα συνδεθεί με το χρονοδιάγραμμα και τις λογικές αλληλεξαρτήσεις, στην 7.5 με τη δομή του κόστους, ενώ στις ενότητες 7.7 και 7.8 θα αποτελέσει το κοινό σημείο αναφοράς για τη σύνδεση της πραγματικής παραγωγής με τα εργαλεία της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου.

7.4 Ανάλυση Χρονοδιαγράμματος

Η ανάλυση του χρονοδιαγράμματος αποτελεί βασικό στοιχείο της μελέτης περίπτωσης, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της χρονικής εξέλιξης του έργου και τον εντοπισμό δραστηριοτήτων που μπορούν να επηρεάσουν την ημερομηνία ολοκλήρωσής του. Το χρονοδιάγραμμα συνδέεται με τη WBS που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, ώστε κάθε δραστηριότητα να αντιστοιχεί σε συγκεκριμένο τμήμα του φυσικού αντικειμένου.

Ως αρχικό σημείο αναφοράς χρησιμοποιείται το εγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα αναφοράς (Baseline Schedule), το οποίο αποτυπώνει τον εγκεκριμένο χρονικό σχεδιασμό του έργου. Κατά την εκτέλεση, το πρόγραμμα ενημερώνεται με πραγματικές ημερομηνίες έναρξης και ολοκλήρωσης, ποσοστά προόδου, υπολειπόμενες διάρκειες των δραστηριοτήτων και επικαιροποιημένες προβλέψεις. Η σύγκριση το εγκεκριμένου χρονοδιαγράμματος αναφοράς με το επικαιροποιημένο χρονοδιάγραμμα, επιτρέπει την αναγνώριση των χρονικών αποκλίσεων και την αξιολόγηση των επιπτώσεών τους στα κύρια ορόσημα (milestones).

7.4.1 Βασικά Ορόσημα (Milestones) και Κατασκευαστική Ακολουθία

Για το εξεταζόμενο αιολικό πάρκο, το χρονοδιάγραμμα μπορεί να οργανωθεί γύρω από τα βασικά ορόσημα της κατασκευής.

Η ολοκλήρωση κάθε σταδίου αποτελεί προϋπόθεση ή βασικό δεδομένο για τον προγραμματισμό έναρξης επόμενων δραστηριοτήτων. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση δεν περιορίζεται στις ημερομηνίες των επιμέρους εργασιών, αλλά εξετάζει τις λογικές αλληλεξαρτήσεις και τον συντονισμό μεταξύ διαφορετικών αναδόχων, εργολάβων, υπεργολάβων κλπ.. Ενδεικτικά, η παρακολούθηση των κύριων ορόσημων σε μια ανεμογεννήτρια μπορούν να παρουσιαστούν ως εξής:

Πίνακας 9: Ανάλυση Χρονικών Αποκλίσεων Κύριων Ορόσημων του Έργου

 Ορόσημο	 Γραμμή Αναφοράς (Baseline)	 Πραγματική Ημερομηνία (Actual)	 Απόκλιση
 Ολοκλήρωση Έργων Υποδομής	15/04	22/04	+7 ημέρες
 Έναρξη Μεταφοράς Κύριων Εξαρτημάτων	20/04	27/04	+7 ημέρες
 Ολοκλήρωση Μεταφοράς Κύριων Εξαρτημάτων	24/04	01/05	+7 ημέρες
 Έναρξη Κύριας Εγκατάστασης	27/04	02/05	+5 ημέρες
 Ολοκλήρωση Κύριας Εγκατάστασης	29/04	08/05	+9 ημέρες
 Έναρξη Μηχανολογικών / Ηλεκτρολογικών Εργασιών	02/05	12/05	+11 ημέρες
 Ολοκλήρωση Μηχανολογικών / Ηλεκτρολογικών Εργασιών	11/05	23/05	+13 ημέρες
 Ηλέκτριση	12/05	25/05	+14 ημέρες
 Ολοκλήρωση Θέσης σε Λειτουργία	15/05	28/05	+14 ημέρες



Ο πίνακας επιτρέπει την αξιολόγηση όχι μόνο της αρχικής καθυστέρησης, αλλά και του βαθμού στον οποίο αυτή μετακυλίστηκε, απορροφήθηκε ή περιορίστηκε κατά τις επόμενες φάσεις του έργου. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, η αρχική καθυστέρηση των έργων υποδομής μετακυλίστηκε στις επόμενες δραστηριότητες, προκαλώντας διαδοχικές αποκλίσεις από το εγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα και επηρεάζοντας τα επόμενα ορόσημα του έργου.

7.4.2 Μέθοδος Κρίσιμης Διαδρομής (Critical Path Method - CPM) και Χρονικές Αποκλίσεις

Η CPM χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό της αλληλουχίας δραστηριοτήτων που καθορίζει τη συνολική διάρκεια του έργου. Μία καθυστέρηση σε κρίσιμη δραστηριότητα μπορεί να μετακινήσει την τελική ημερομηνία ολοκλήρωσης εφόσον δεν υπάρχει διαθέσιμο χρονικό περιθώριο ή δεν εφαρμοστούν αποτελεσματικές ενέργειες ανάκτησης του προγράμματος.

Σε ένα αιολικό έργο, μία ενδεικτική κρίσιμη ακολουθία μπορεί να είναι:



Σχήμα 10: Ενδεικτική Κρίσιμη Διαδρομή Έργου

Για παράδειγμα, εάν η ολοκλήρωση των πλατειών ανέγερσης καθυστερήσει κατά επτά ημέρες και δεν υπάρχει διαθέσιμο χρονικό περιθώριο, η καθυστέρηση μπορεί να επηρεάσει την κινητοποίηση του κύριου γερανού. Ωστόσο, εάν μεταβληθεί η σειρά εγκατάστασης και υπάρχει άλλη θέση ανεμογεννήτριας έτοιμη προς εκτέλεση, μέρος της επίπτωσης μπορεί να περιοριστεί. Το συγκεκριμένο παράδειγμα αναδεικνύει ότι η ανάλυση του χρονοδιαγράμματος πρέπει να συνδέεται όχι μόνο με τη μαθηματική λογική του CPM, αλλά και με την πραγματική ετοιμότητα των εργασιών προς εκτέλεση.

7.4.3 Χρονοδιάγραμμα Αναφοράς (Baseline) έναντι Πραγματικής Προόδου (Actual Progress)

Εκτός από τα ορόσημα (milestones), είναι χρήσιμη η σύγκριση της συνολικής προγραμματισμένης και πραγματικής φυσικής προόδου σε συγκεκριμένες ημερομηνίες αναφοράς.

Πίνακας 10: Πρόοδος Έργου ανά Μήνα

Πρόοδος Έργου ανά Μήνα			
Περίοδος	Προγραμματισμένη Πρόοδος (%)	Πραγματική Πρόοδος (%)	Απόκλιση (%)
Οκτώβριος	10%	3%	-7%
Νοέμβριος	25%	40%	+15%
Δεκέμβριος	45%	70%	+25%
Ιανουάριος	65%	75%	+10%
Φεβρουάριος	82%	85%	+3%
Μάρτιος	100%	100%	0%

Το συγκεκριμένο παράδειγμα από το Έργο Β, για την περίοδο μεταξύ Οκτωβρίου και Μαρτίου, παρουσιάζει αρχικά επιδείνωση της χρονικής απόκλισης κατά τον πρώτο μήνα, η οποία οφείλεται σε απρόβλεπτες καθυστερήσεις στη μεταφορά των κύριων εξαρτημάτων. Κατά τους δύο επόμενους μήνες παρατηρείται, ωστόσο, σημαντική ανάκτηση της

χαμένης προόδου και περιορισμός της χρονικής απόκλισης. Η εξέλιξη αυτή χρήζει περαιτέρω διερεύνησης, προκειμένου να προσδιοριστούν τόσο οι παράγοντες που προκάλεσαν την αρχική καθυστέρηση όσο και οι διορθωτικές ενέργειες και οργανωτικές παρεμβάσεις που συνέβαλαν στην ανάκτηση του χαμένου χρόνου.

Συνεπώς, η ανάλυση του χρονοδιαγράμματος δεν περιορίζεται στη διαπίστωση του κατά πόσο το έργο βρίσκεται «μπροστά ή πίσω» σε σχέση με το αρχικό εγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα, αλλά επεκτείνεται στη διερεύνηση της εξέλιξης των χρονικών αποκλίσεων, των αιτιών που τις προκάλεσαν και της αποτελεσματικότητας των διορθωτικών ενεργειών που εφαρμόστηκαν. Η ανάλυση αυτή συνδέεται στη συνέχεια με τους δείκτες χρονικής απόδοσης που παρουσιάζονται στην Ενότητα 7.8.

7.5 Ανάλυση Κόστους

Η ανάλυση κόστους εξετάζει την οικονομική απόδοση του έργου σε σχέση με τον εγκεκριμένο προϋπολογισμό και την πραγματική φυσική πρόοδο. Η σύνδεση της δομής ανάλυσης εργασιών (WBS) με τη δομή ανάλυσης κόστους (CBS) επιτρέπει την αντιστοίχιση των επιμέρους στοιχείων κόστους με συγκεκριμένα πακέτα εργασίας, παρέχοντας τη βάση για τον εντοπισμό και την αξιολόγηση των περιοχών στις οποίες εμφανίζονται σημαντικές οικονομικές αποκλίσεις.

Στην παρούσα μελέτη, η ανάλυση πραγματοποιείται σε επίπεδο κύριων πακέτων εργασίας μίας ανεμογεννήτριας, όπως τα έργα υποδομής, η μεταφορά και εφοδιαστική διαχείριση, η κύρια εγκατάσταση, οι ηλεκτρολογικές και μηχανολογικές εργασίες, η ηλεκτρική διασύνδεση με το δίκτυο και η θέση της ανεμογεννήτριας σε λειτουργία. Όπου κρίνεται απαραίτητο, τα πραγματικά οικονομικά μεγέθη τροποποιούνται αναλογικά για λόγους προστασίας της εμπιστευτικότητας και των εμπορικά ευαίσθητων δεδομένων, χωρίς να αλλοιώνονται οι μεταξύ τους αναλογίες και οι τάσεις που αποτελούν αντικείμενο της ανάλυσης.

7.5.1 Κατανομή Προϋπολογισμού

Μία ενδεικτική δομή παρακολούθησης μπορεί να είναι:

Πίνακας 11: Ανάλυση Κόστους και Αποκλίσεων ανά Πακέτο Εργασίας

Ανάλυση Κόστους και Αποκλίσεων ανά Πακέτο Εργασίας			
Πακέτο Εργασίας	Προϋπολογισμός (€ εκ.)	Πραγματικό Κόστος (€ εκ.)	Απόκλιση (€ εκ.)
Χωματουργικά Έργα	€1,00 εκ.	€1,20 εκ.	+€0,20 εκ.
Μεταφορές / Logistics	€0,20 εκ.	€0,40 εκ.	+€0,20 εκ.
Κύρια Εγκατάσταση	€0,05 εκ.	€0,08 εκ.	+€0,03 εκ.
Εργασίες Ολοκλήρωσης	€0,05 εκ.	€0,06 εκ.	+€0,01 εκ.
Ηλεκτρισμός / Διασύνδεση με Δίκτυο	€0,01 εκ.	€0,01 εκ.	€0,00 εκ.
Θέση σε Λειτουργία	€0,03 εκ.	€0,04 εκ.	+€0,01 εκ.
Σύνολο	€1,34 εκ.	€1,79 εκ.	+€0,45 εκ.

Η απλή σύγκριση μεταξύ προϋπολογισμένου και πραγματικού κόστους δεν επαρκεί από μόνη της για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης του έργου, καθώς το πραγματικό κόστος πρέπει να εξετάζεται σε συνάρτηση με τη φυσική πρόοδο που έχει πράγματι επιτευχθεί. Για τον λόγο αυτό, η λεπτομερέστερη αξιολόγηση της απόδοσης κόστους και χρονοδιαγράμματος μέσω της ανάλυσης δεδουλευμένης αξίας (Earned Value Analysis - EVA) πραγματοποιείται στην Ενότητα 7.8.

7.5.2 Ανάλυση Αιτιών Κόστους

Οι οικονομικές αποκλίσεις μπορούν να προκύψουν τόσο από άμεσες τεχνικές μεταβολές όσο και από απώλειες παραγωγικότητας. Σε ένα αιολικό έργο, χαρακτηριστικές πηγές πρόσθετου κόστους είναι:

- παρατεταμένη παραμονή του κύριου γερανού στο εργοτάξιο λόγω καθυστερήσεων,
- πρόσθετες μεταφορές ή επαναλαμβανόμενη διαχείριση κύριων εξαρτημάτων,
- χρόνοι αναμονής των συνεργείων,
- επανεργασίες λόγω τεχνικών προβλημάτων ή αποκλίσεων ποιότητας,
- πρόσθετες εργασίες και ανάγκη χρήσης επιπλέον εξοπλισμού,
- καθυστερήσεις και πρόσθετες δαπάνες λόγω δυσμενών καιρικών συνθηκών,,
- μεταβολές στο αντικείμενο ή στη μέθοδο κατασκευής του έργου.

Για παράδειγμα, μία καθυστέρηση 5 ημερών στην ετοιμότητα μιας θέσης Α/Γ, μπορεί να μην δημιουργήσει μόνο χρονική απόκλιση. Εάν ο κύριος γερανός και το συνεργείο εγκατάστασης βρίσκονται ήδη στο εργοτάξιο, μπορεί να προκύψει σημαντικό κόστος αναμονής που υπερβαίνει τον συμφωνημένο χρόνο παραμονής (σταλίες).

Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη συνδυαστική προσέγγιση της παρούσας εργασίας, καθώς καταδεικνύει ότι μία λειτουργική αναποτελεσματικότητα ή απόκλιση στην εκτέλεση των εργασιών, η οποία εντοπίζεται μέσω της λιτής κατασκευής, μπορεί να αποτυπωθεί στη συνέχεια ως μετρήσιμη χρονική και οικονομική επίπτωση μέσω των συστημάτων ελέγχου έργου.

7.5.3 Πρόβλεψη Τελικού Κόστους του Έργου

Η οικονομική παρακολούθηση δεν πρέπει να περιορίζεται στην καταγραφή των πραγματοποιημένων δαπανών. Καθώς το έργο εξελίσσεται, το πραγματικό κόστος και οι ήδη γνωστές οικονομικές δεσμεύσεις μπορούν να αξιοποιηθούν για την ανάπτυξη της εκτίμησης κόστους κατά την ολοκλήρωση (Estimate at Completion - EAC), παρέχοντας μία επικαιροποιημένη πρόβλεψη του συνολικού κόστους του έργου κατά την ολοκλήρωσή του.

Ενδεικτικά, κατά τη διάρκεια των εργασιών κύριας εγκατάστασης Α/Γ στο Έργο Α:

Πίνακας 12: Πίνακας Βασικών Παραμέτρων Κόστους

Ανάλυση Κόστους και Αποκλίσεων ανά Πακέτο Εργασίας			
Πακέτο Εργασίας	Προϋπολογισμός (€ εκ.)	Πραγματικό Κόστος (€ εκ.)	Απόκλιση (€ εκ.)
Χωματουργικά Έργα	€1,00 εκ.	€1,15 εκ.	+€0,15 εκ.
Μεταφορές / Logistics	€0,20 εκ.	€0,35 εκ.	+€0,15 εκ.
Κύρια Εγκατάσταση	€0,05 εκ.	€0,07 εκ.	+€0,02 εκ.
Εργασίες Ολοκλήρωσης	€0,05 εκ.	€0,05 εκ.	€0,00 εκ.
Ηλεκτρισμός / Διασύνδεση με Δίκτυο	€0,01 εκ.	€0,01 εκ.	€0,00 εκ.
Θέση σε Λειτουργία	€0,03 εκ.	€0,05 εκ.	+€0,02 εκ.
Σύνολο	€1,34 εκ.	€1,68 εκ.	+€0,34 εκ.

Πίνακας 13: Πίνακες Κόστους και Προβλέψεων Έργου

Βασικοί Δείκτες Κόστους Έργου	
Δείκτης	Ποσό (€ εκ.)
Εγκεκριμένος Προϋπολογισμός (BAC)	€1,34 εκ.
Πραγματικό Κόστος έως Σήμερα (AC)	€1,68 εκ.
Εκτιμώμενο Υπολειπόμενο Κόστος (ETC)	€0,12 εκ.

Προβλέψεις Κόστους Έργου	
Δείκτης	Ποσό (€ εκ.)
Εκτιμώμενο Συνολικό Κόστος (EAC)	€1,80 εκ.
Υπέρβαση Προϋπολογισμού (Forecast Overrun)	€0,46 εκ.

Η έγκαιρη πρόβλεψη μιας πιθανής υπέρβασης του προϋπολογισμού παρέχει στη διοίκηση τη δυνατότητα να αξιολογήσει και να εφαρμόσει κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες πριν από την ολοκλήρωση του έργου, περιορίζοντας ενδεχόμενες περαιτέρω οικονομικές αποκλίσεις. Η αναλυτική εφαρμογή του δείκτη απόδοσης κόστους (CPI), της απόκλισης κόστους (CV) και της εκτίμησης κόστους κατά την ολοκλήρωση (EAC) παρουσιάζεται στην Ενότητα 7.8, ώστε να αποφεύγεται η επανάληψη της σχετικής μεθοδολογίας.

7.6 Μητρώο Κινδύνων (Risk Register)

Το μητρώο κινδύνων χρησιμοποιείται στη μελέτη περίπτωσης ως οργανωμένο εργαλείο για την αναγνώριση, αξιολόγηση και παρακολούθηση των σημαντικότερων αβεβαιοτήτων που ενδέχεται να επηρεάσουν την κατασκευή του

έργου. Σε αντίθεση με μία γενική καταγραφή κινδύνων, η ανάλυση επικεντρώνεται σε εκείνους που μπορούν να επηρεάσουν συγκεκριμένα στοιχεία της δομής ανάλυσης εργασιών (WBS), ορόσημα, το κόστος ή τη ροή των εργασιών.

Για κάθε κίνδυνο καταγράφονται τουλάχιστον η περιγραφή, η πιθανότητα εμφάνισης, η επίπτωση, η συνολική αξιολόγηση, ο υπεύθυνος και η προβλεπόμενη ενέργεια αντιμετώπισης.

7.6.1 Αναγνώριση και Αξιολόγηση Κινδύνων

Στην περίπτωση των Έργων Α και Β, οι κίνδυνοι μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τεχνικούς, εφοδιαστικούς, χρονικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και οργανωτικούς, σύμφωνα με τη φύση και τις επιπτώσεις τους. Οι κίνδυνοι που παρουσιάζονται στη συνέχεια δεν αποτελούν υποθετικά σενάρια, αλλά βασίζονται σε πραγματικά περιστατικά και συνθήκες που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια της κατασκευής των δύο έργων. Από το σύνολο των κινδύνων που καταγράφηκαν, παρουσιάζονται ενδεικτικά έξι αντιπροσωπευτικές περιπτώσεις, οι οποίες καλύπτουν διαφορετικές κατηγορίες και επιπτώσεις στην εκτέλεση του έργου.

Πίνακας 14: Μητρώο Κινδύνων Έργου

Μητρώο Κινδύνων Έργου (Risk Register)					
ID	Κίνδυνος	Πιθανότητα (P)	Επίπτωση (I)	Δείκτης Κινδύνου (P × I)	Ενέργειες Αντιμετώπισης / Αποκρίση
R01	Καθυστέρηση στην παράδοση εξαρτημάτων	5	5	25	Εκ νέου διενέργεια της αδειοδοτικής διαδικασίας μεταφοράς.
R02	Υψηλές ταχύτητες ανέμου κατά την εγκατάσταση	4	4	16	Παρακολούθηση καιρικών συνθηκών / Ευέλικτο πρόγραμμα εργασιών / Εναλλακτικές λύσεις.
R03	Μη διαθεσιμότητα κύριου γερανού (main crane)	2	5	10	Τακτική επιβεβαίωση της διαθεσιμότητας / Συντονισμός του προγράμματος του γερανού με τις καιρικές προβλέψεις και το πρόγραμμα μεταφοράς των κύριων εξαρτημάτων / Πρόβλεψη εναλλακτικού γερανού ή προμηθευτή.
R04	Μη ολοκληρωμένη πλατεία εργασιών (crane pad)	2	4	8	Έγκαιρη προετοιμασία και επιθεώρηση πλατείας / Έλεγχος ετοιμότητας.
R05	Τεχνικό πρόβλημα σε εξάρτημα ανεμογεννήτριας (WTG component)	3	4	12	Επιθεώρηση και προληπτική αντικατάσταση / Διαθεσιμότητα ανταλλακτικών.
R06	Καθυστέρηση στις ηλεκτρολογικές εργασίες	3	5	15	Έγκαιρος συντονισμός υπεργολάβων και εφαρμογή σχεδίου μετριασμού του κινδύνου.

Κλίμακα: 1 = Πολύ χαμηλή, 2 = Χαμηλή, 3 = Μέτρια, 4 = Υψηλή, 5 = Πολύ υψηλή

όπου:

$$\text{Βαθμός Κινδύνου (Risk Score)} = \text{Πιθανότητα (Probability)} \times \text{Επίπτωση (Impact)}$$

Σε μία κλίμακα 1–5, για παράδειγμα, ένας κίνδυνος με πιθανότητα 4 και επίπτωση 5 αποκτά βαθμό κινδύνου:

$$4 \times 5 = 20$$

και επομένως απαιτεί υψηλότερη διαχειριστική προτεραιότητα από έναν κίνδυνο με βαθμό 6 ή 8.

Τα όρια ταξινόμησης του κινδύνου σε χαμηλό, μέτριο και υψηλό πρέπει να καθορίζονται εκ των προτέρων, σύμφωνα με τη μεθοδολογία αξιολόγησης κινδύνων του έργου, και να εφαρμόζονται με συνέπεια σε όλη τη διάρκεια υλοποίησής του. Η αξιολόγηση των κινδύνων δεν αποτελεί στατική διαδικασία, αλλά απαιτεί συνεχή παρακολούθηση και

επανεκτίμηση. Για τον λόγο αυτό, το Μητρώο Κινδύνων πρέπει να επικαιροποιείται καθώς μεταβάλλονται οι συνθήκες του έργου, προκύπτουν νέοι κίνδυνοι ή διαφοροποιούνται η πιθανότητα εμφάνισης και οι επιπτώσεις των ήδη καταγεγραμμένων κινδύνων.

7.6.3 Σύνδεση Κινδύνων και Περιορισμών στην Εκτέλεση του Έργου

Η σύνδεση του μητρώου κινδύνων με τη λιτή κατασκευή γίνεται ιδιαίτερα εμφανής όταν ένας δυνητικός κίνδυνος εξελίσσεται σε πραγματικό περιορισμό.

Στο σημείο αυτό αναδεικνύεται μία από τις βασικές διαστάσεις της συνδυαστικής εφαρμογής της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου έργου που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία. Το μητρώο κινδύνων λειτουργεί ως εργαλείο αναγνώρισης, αξιολόγησης και παρακολούθησης της αβεβαιότητας, ενώ η διαχείριση περιορισμών μεταφέρει την πληροφορία στο επίπεδο της άμεσης ετοιμότητας των εργασιών προς εκτέλεση. Η σύνδεση των δύο προσεγγίσεων με το χρονοδιάγραμμα και τον έλεγχο κόστους δημιουργεί μία σαφή διαδικασία, η οποία εκτείνεται από την αναγνώριση ενός πιθανού προβλήματος και την αξιολόγηση του κινδύνου έως τον εντοπισμό των περιορισμών, τη μέτρηση των χρονικών και οικονομικών επιπτώσεων και την εφαρμογή κατάλληλων διορθωτικών ενεργειών.

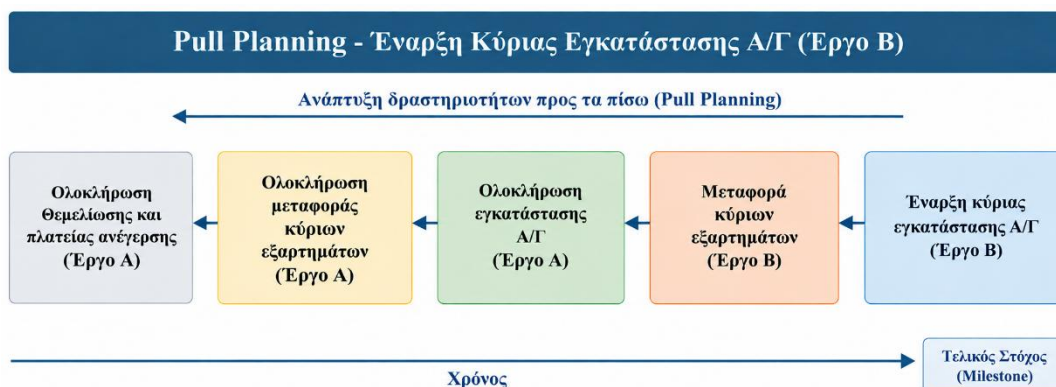
7.7 Εφαρμογή Λιτής Κατασκευής (Lean Construction)

Η εφαρμογή της λιτής κατασκευής στη μελέτη περίπτωσης επικεντρώνεται στη βελτίωση της αξιοπιστίας του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού και της ροής των εργασιών. Σε αντίθεση με το κύριο χρονοδιάγραμμα του έργου, το οποίο καθορίζει τη συνολική χρονική πορεία και τα βασικά ορόσημα, οι πρακτικές της λιτής κατασκευής εστιάζουν στο κατά πόσο οι εργασίες που πρόκειται να εκτελεστούν είναι πραγματικά έτοιμες προς εκτέλεση, ποιοι περιορισμοί πρέπει να αρθούν πριν από την έναρξή τους και κατά πόσο οι βραχυπρόθεσμες δεσμεύσεις ολοκληρώνονται σύμφωνα με τον προγραμματισμό. Με τον τρόπο αυτό, ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός δεν περιορίζεται στον καθορισμό του πότε πρέπει να πραγματοποιηθεί μία εργασία, αλλά εξετάζει και το κατά πόσο υπάρχουν οι απαραίτητες προϋποθέσεις για την αξιόπιστη εκτέλεσή της.

7.7.1 Pull Planning

Το Pull Planning εφαρμόζεται στις κύριες κατασκευαστικές φάσεις με αφετηρία ένα καθορισμένο ορόσημο και ανάπτυξη της απαιτούμενης ακολουθίας προς τα πίσω. Αντί να εξετάζεται μόνο το πότε μπορεί να ξεκινήσει μία εργασία, προσδιορίζεται πρώτα πότε απαιτείται το αποτέλεσμα από την επόμενη δραστηριότητα.

Για παράδειγμα, για το ορόσημο Έναρξη Κύριας Εγκατάστασης Α/Γ (Έργο Β):



Σχήμα 11: Διάγραμμα Pull Planning για Έργο Β

Η συγκεκριμένη προσέγγιση καθιστά εμφανή τα σημεία μετάβασης και αλληλεξάρτησης μεταξύ των επιμέρους φάσεων και των δύο έργων, όπως τη σύνδεση των έργων υποδομής, της εφοδιαστικής διαχείρισης και της κύριας εγκατάστασης του Έργου Α με την έναρξη της κύριας εγκατάστασης των Α/Γ του Έργου Β, επιτρέποντας παράλληλα τον έγκαιρο συντονισμό των εμπλεκόμενων ομάδων.

Η αξία του Pull Planning βρίσκεται επομένως στην οργάνωση των δραστηριοτήτων σύμφωνα με τις ανάγκες της επόμενης παραγωγικής φάσης και όχι αποκλειστικά βάσει ενός προκαθορισμένου ημερολογιακού προγράμματος.

7.7.2 Last Planner System

Το σύστημα Last Planner (LPS) χρησιμοποιείται για τη σύνδεση του κύριου χρονοδιαγράμματος του έργου με τον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό και την πραγματική εκτέλεση των εργασιών. Οι δραστηριότητες των επόμενων εβδομάδων εξετάζονται μέσω του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού εργασιών και υποβάλλονται σε διαδικασία προετοιμασίας προς εκτέλεση, ώστε να αναγνωρίζονται και να αίρονται εγκαίρως οι περιορισμοί που ενδέχεται να εμποδίσουν την εκτέλεσή τους (Ballard & Tommelein, 2021).

Για παράδειγμα, κατά την ημερολογιακή εβδομάδα 47 (CW47), στο Έργο Β (βλέπε Πίνακα 15), το κύριο χρονοδιάγραμμα προέβλεπε την ολοκλήρωση της κύριας εγκατάστασης της Α/Γ 08. Ωστόσο, η συγκεκριμένη δραστηριότητα δεν πληρούσε τις απαραίτητες προϋποθέσεις για την εκτέλεσή της, καθώς η μεταφορά των κύριων εξαρτημάτων, η οποία αποτελούσε βασικό προαπαιτούμενο για την έναρξη της κύριας εγκατάστασης, δεν είχε ακόμη ολοκληρωθεί. Συνεπώς, η δραστηριότητα δεν μπορούσε να θεωρηθεί έτοιμη προς εκτέλεση.

Επιπροσθέτως, ένα ακόμη χαρακτηριστικό παράδειγμα αφορά την Α/Γ 09, για την οποία, κατά την ίδια ημερολογιακή εβδομάδα, είχε προγραμματιστεί η μερική εκτέλεση της κύριας εγκατάστασης. Ωστόσο, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση, η μεταφορά των κύριων εξαρτημάτων δεν είχε ακόμη ολοκληρωθεί. Παράλληλα, σύμφωνα με τον Πίνακα 15, ο κύριος γερανός εξακολουθούσε να απασχολείται στην κύρια εγκατάσταση της προηγούμενης κατά σειρά Α/Γ.

Κατά συνέπεια, η δραστηριότητα δεν πληρούσε τις απαραίτητες προϋποθέσεις ώστε να θεωρηθεί έτοιμη προς εκτέλεση και στο πλαίσιο της διαδικασίας προετοιμασίας των εργασιών προς εκτέλεση, δεν θα έπρεπε να μεταφερθεί στον εβδομαδιαίο προγραμματισμό εργασιών. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύγεται η άσκοπη δέσμευση συνεργείων και εξοπλισμού σε δραστηριότητες που δεν είναι πραγματικά εκτελέσιμες, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων και στη βελτίωση της αξιοπιστίας του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού.

7.7.3 PPC Analysis

Η αξιοπιστία του εβδομαδιαίου προγραμματισμού (Weekly Work Plan) αξιολογείται μέσω του ποσοστού ολοκληρωμένων δεσμεύσεων (Percent Plan Complete - PPC):

$$PPC = \frac{\text{Εργασίες που ολοκληρώθηκαν όπως συμφωνήθηκαν}}{\text{Συνολικές προγραμματισμένες εργασίες}} \times 100$$

Εάν, για παράδειγμα, προγραμματίστηκαν 10 εργασίες και ολοκληρώθηκαν οι 7:

$$PPC = \frac{7}{10} \times 100 = 70\%$$

Στον επόμενο πίνακα πραγματοποιείται ανάλυση του ποσοστού ολοκληρωμένων δεσμεύσεων (PPC) για τις εργασίες των έξι ανεμογεννητριών του Έργου Α, σε περίοδο τεσσάρων ημερολογιακών εβδομάδων, με σκοπό την αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο οι προγραμματισμένες εργασίες ολοκληρώθηκαν σύμφωνα με τον εβδομαδιαίο προγραμματισμό.

Πίνακας 15: Πίνακας Εβδομαδιαίας Προόδου και Αξιοπιστίας

Εβδομάδα	Προγραμματισμένες δραστηριότητες (Planned)	Ολοκληρωμένες δραστηριότητες (Completed)	PPC (%)
CW40	10	10	100%
CW41	9	8	88,8%
CW42	11	10	90,9%
CW43	10	10	100%

Η αύξηση του PPC αποτελεί ένδειξη βελτίωσης της αξιοπιστίας του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού και της τήρησης των εβδομαδιαίων δεσμεύσεων, χωρίς ωστόσο να αποδεικνύει από μόνη της ότι το έργο εξελίσσεται σύμφωνα με το συνολικό εγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα. Για τον λόγο αυτό, ο PPC πρέπει να εξεταστεί παράλληλα με τους δείκτες των συστημάτων ελέγχου έργου (Project Controls), ώστε να διαμορφώνεται πληρέστερη εικόνα της χρονικής απόδοσης του έργου. Ιδιαίτερα χρήσιμη είναι και η ανάλυση των αιτιών μη ολοκλήρωσης (Reasons for Non-Completion - RNC):

Με τον τρόπο αυτό, η μέτρηση δεν περιορίζεται στον προσδιορισμό του αριθμού των εργασιών που δεν ολοκληρώθηκαν, αλλά επεκτείνεται στη διερεύνηση των αιτιών μη ολοκλήρωσής τους, δημιουργώντας τη βάση για την εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών και τη συνεχή βελτίωση των διαδικασιών

7.8 Εφαρμογή Συστημάτων Ελέγχου Έργων (Project Controls)

Η εφαρμογή των συστημάτων ελέγχου έργου (Project Controls) επικεντρώνεται στη μέτρηση και αξιολόγηση της απόδοσης του έργου σε σχέση με την εγκεκριμένη γραμμή βάσης. Για τον σκοπό αυτό, συνδέονται τα στοιχεία που αφορούν το αντικείμενο του έργου, το χρονοδιάγραμμα, την πρόοδο και το κόστος, ώστε να αξιολογείται όχι μόνο η

απόδοση του έργου μέχρι τη δεδομένη χρονική στιγμή, αλλά και να διαμορφώνεται μία επικαιροποιημένη πρόβλεψη της τελικής χρονικής και οικονομικής του εξέλιξης.

7.8.1 Ανάλυση Δεδουλευμένης Αξίας (Earned Value Analysis - EVA)

Η ανάλυση δεδουλευμένης αξίας (EVA) βασίζεται στις τρεις βασικές μεταβλητές:

- **Planned Value (PV):** Η εγκεκριμένη αξία του έργου που είχε προγραμματιστεί να ολοκληρωθεί μέχρι μία συγκεκριμένη ημερομηνία.
- **Earned Value (EV):** Η εγκεκριμένη προϋπολογισμένη αξία της εργασίας που έχει πράγματι ολοκληρωθεί μέχρι την ημερομηνία αναφοράς.
- **Actual Cost (AC):** Το πραγματικό κόστος που έχει πραγματοποιηθεί για την εκτέλεση της συγκεκριμένης εργασίας.

Έστω ότι, κατά την ημερομηνία αναφοράς που αντιστοιχεί στην ολοκλήρωση της κύριας εγκατάστασης της τέταρτης από τις πέντε ανεμογεννήτριες του Έργου B, ισχύουν τα ακόλουθα δεδομένα:

Πίνακας 16: Βασικές Παράμετροι Ανάλυσης Παραγόμενης Αξίας (EVM)

Παράμετρος	Τιμή
BAC	€7,50 εκ.
PV	€6,00 εκ.
EV	€7,50 εκ.
AC	€8,00 εκ.

Από τα παραπάνω προκύπτουν:

→ Απόκλιση χρονοδιαγράμματος - (Schedule Variance - SV):

$$SV = EV - PV = 7,50 - 6,00 = +1,50 \text{ εκ.}$$

→ Απόκλιση κόστους - (Cost Variance - CV):

$$CV = EV - AC = 7,50 - 8,00 = -0,50 \text{ εκ.}$$

Οι θετικές τιμές υποδεικνύουν ότι, κατά τη συγκεκριμένη ημερομηνία αναφοράς, το έργο παρουσιάζει ευνοϊκή απόδοση ως προς το χρονοδιάγραμμα, καθώς η κύρια εγκατάσταση των Α/Γ έχει προχωρήσει ταχύτερα από τον αρχικό προγραμματισμό. Αντίθετα, οι αρνητικές τιμές ως προς το κόστος υποδεικνύουν δυσμενή οικονομική απόδοση, καθώς το πραγματικό κόστος της εκτελεσθείσας εργασίας υπερβαίνει την αντίστοιχη προϋπολογισμένη αξία.

7.8.2 Ανάλυση απόδοσης κόστους (Cost Performance Analysis)

Η οικονομική αποδοτικότητα αξιολογείται μέσω του δείκτη απόδοσης κόστους (Cost Performance Index - CPI):

$$CPI = \frac{EV}{AC}$$

Με τα παραπάνω δεδομένα:

$$CPI = \frac{7,50}{8,00} \approx 0,94 \text{ εκ.} < 1,00$$

Τιμή **CPI < 1,00** υποδεικνύει ότι το έργο παράγει μικρότερη δεδουλευμένη αξία από το κόστος που καταναλώνει.

Εφόσον θεωρηθεί ότι η μέχρι σήμερα οικονομική αποδοτικότητα θα συνεχιστεί, μία απλοποιημένη εκτίμηση κόστους κατά την ολοκλήρωση (Estimate at Completion - EAC) μπορεί να υπολογιστεί ως:

$$EAC = \frac{BAC}{CPI}$$

Άρα:

$$EAC = \frac{7,50}{0,94} \approx 7,98 \text{ εκ.}$$

Η συγκεκριμένη πρόβλεψη υποδηλώνει πιθανή υπέρβαση περίπου **€0,48 εκατ.**, εφόσον δεν μεταβληθούν οι συνθήκες απόδοσης. Ωστόσο, η εκτίμηση αυτή δεν πρέπει να αντιμετωπίζεται μηχανιστικά, αλλά να αξιολογείται σε συνδυασμό με τους εναπομένοντες κινδύνους, τις υφιστάμενες οικονομικές δεσμεύσεις και τις προβλεπόμενες διορθωτικές ενέργειες, οι οποίες ενδέχεται να επηρεάσουν το τελικό κόστος του έργου.

7.8.3 Schedule Performance Analysis

Η χρονική απόδοση αξιολογείται μέσω του δείκτη απόδοσης χρονοδιαγράμματος (Schedule Performance Index - SPI):

$$SPI = \frac{EV}{PV}$$

Στο προηγούμενο παράδειγμα:

$$SPI = \frac{7,50}{6,00} = 1,25 \text{ εκ.} > 1,00$$

Το **SPI > 1,00** υποδεικνύει ότι το έργο παρουσιάζει ευνοϊκή χρονική απόδοση, καθώς η πρόοδος που έχει επιτευχθεί είναι μεγαλύτερη από την προγραμματισμένη για τη συγκεκριμένη ημερομηνία αναφοράς.

Η ανάλυση αποκτά μεγαλύτερη αξία όταν ο SPI εξετάζεται παράλληλα με τον PPC, ιδιαίτερα σε μία περίοδο κατά την οποία η επίτευξη των εβδομαδιαίων στόχων εργασίας στο Έργο Α παρουσίαζε υψηλό βαθμό επιτυχίας, ενώ ο SPI παρέμενε μικρότερος της μονάδας (SPI < 1,00). Η διαφοροποίηση αυτή δείχνει ότι, παρόλο που οι βραχυπρόθεσμες δεσμεύσεις ολοκληρώνονταν σε μεγάλο βαθμό σύμφωνα με τον εβδομαδιαίο προγραμματισμό, το έργο εξακολουθούσε να παρουσιάζει καθυστέρηση σε σχέση με το εγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα αναφοράς.

Πίνακας 17: Συνδυαστική Αξιολόγηση Δεικτών SPI και PPC

Περίοδος	SPI	PPC	Συνοπτική ερμηνεία
CW36	0,84	90%	Καθυστέρηση έναντι του προγράμματος, με υψηλή αξιοπιστία εκτέλεσης.
CW37	0,86	95%	Μικρή βελτίωση προόδου, πολύ υψηλή αξιοπιστία εκτέλεσης.
CW38	0,88	90%	Συνεχιζόμενη πρόοδος, εντός αποδεκτών ορίων, με υψηλή αξιοπιστία εκτέλεσης.
CW39	0,90	91%	Περαιτέρω βελτίωση προόδου, με σταθερά υψηλή αξιοπιστία εκτέλεσης.

Το τελευταίο παράδειγμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς PPC = 91% δεν σημαίνει ότι το έργο έχει ανακτήσει τη συσσωρευμένη καθυστέρηση. Η υψηλή τιμή του PPC υποδεικνύει ότι οι πρόσφατες βραχυπρόθεσμες δεσμεύσεις εκτελούνται με υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, ενώ η τιμή SPI = 0,90 εξακολουθεί να αποτυπώνει δυσμενή σωρευτική χρονική απόδοση σε σχέση με το εγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα αναφοράς. Συνεπώς, οι δύο δείκτες παρέχουν διαφορετική αλλά συμπληρωματική πληροφόρηση για τη χρονική απόδοση του έργου. Ακριβώς σε αυτό το σημείο γίνεται εμφανής η συμπληρωματικότητα Lean Construction και Project Controls.

7.9 Πίνακας παρακολούθησης και ελέγχου του έργου (Project Dashboard)

Η αποτελεσματική αξιοποίηση των παραπάνω δεδομένων προϋποθέτει τη συγκέντρωσή τους σε έναν ενιαίο πίνακα παρακολούθησης και ελέγχου του έργου. Σκοπός του πίνακα δεν είναι απλώς η οπτικοποίηση ενός μεγάλου αριθμού δεικτών, αλλά η παροχή μιας συνοπτικής και κοινής εικόνας της συνολικής απόδοσης του έργου, η οποία υποστηρίζει την έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Ακολουθεί ενιαίος πίνακας παρακολούθησης και ελέγχου για τα Έργα Α και Β, ο οποίος αποτυπώνει την κατάστασή τους σε χρονική περίοδο κατά την οποία βρίσκονταν σε διαφορετικές φάσεις υλοποίησης, με παράλληλη εξέλιξη των εργασιών τους. Για λόγους απλούστευσης, από το σύνολο των δραστηριοτήτων του έργου θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν ενδεικτικά τέσσερις βασικές δραστηριότητες.

Πίνακας 18: Παρακολούθηση προόδου εργασιών ανά Α/Γ και Φάση Κατασκευής

Έργο	Α/Γ	Μεταφορά Κύριων Εξαρτημάτων				Κύρια Εγκατάσταση				Μηχανολογικές & Ηλεκτρολογικές Εργασίες				Ηλεκτρική διασύνδεση και ενεργοποίηση Α/Γ			
		Προγραμματισμένη Πρόοδος	Πραγματική Πρόοδος	Απόκλιση	Κατάσταση	Προγραμματισμένη Πρόοδος	Πραγματική Πρόοδος	Απόκλιση	Κατάσταση	Προγραμματισμένη Πρόοδος	Πραγματική Πρόοδος	Απόκλιση	Κατάσταση	Προγραμματισμένη Πρόοδος	Πραγματική Πρόοδος	Απόκλιση	Κατάσταση
Έργο Α	A/Γ 01	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	0%	-100%	Δεν έχει ξεκινήσει
	A/Γ 02	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	0%	-100%	Δεν έχει ξεκινήσει
	A/Γ 03	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	0%	-100%	Δεν έχει ξεκινήσει
	A/Γ 04	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	90%	-10%	Σε εξέλιξη	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει
	A/Γ 05	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	80%	60%	-20%	Σε εξέλιξη	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει
	A/Γ 06	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	50%	0%	-50%	Σε εξέλιξη	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει
Έργο Β	A/Γ 07	100%	100%	0%	Ολοκληρώθηκε	100%	50%	-50%	Σε εξέλιξη	50%	0%	-50%	Σε εξέλιξη	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει
	A/Γ 08	100%	90%	-10%	Σε εξέλιξη	100%	20%	-80%	Σε εξέλιξη	20%	0%	-20%	Σε εξέλιξη	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει
	A/Γ 09	100%	50%	-50%	Σε εξέλιξη	50%	20%	-30%	Σε εξέλιξη	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει
	A/Γ 10	80%	20%	-60%	Σε εξέλιξη	20%	0%	-20%	Δεν έχει ξεκινήσει	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει
	A/Γ 11	60%	0%	-60%	Δεν έχει ξεκινήσει	20%	0%	-20%	Δεν έχει ξεκινήσει	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει	0%	0%	0%	Δεν έχει ξεκινήσει

Η πληροφορία μπορεί να αντλείται από εργαλεία προγραμματισμού, όπως το Primavera P6 ή το Microsoft Project, από τα αρχεία κόστους και προόδου, καθώς και από τα αρχεία βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού Lean, και να συγκεντρώνεται, για παράδειγμα, σε ένα ενιαίο περιβάλλον παρακολούθησης και οπτικοποίησης μέσω Power BI.

7.10 Αποτελέσματα Εφαρμογής

Η συνδυαστική εφαρμογή της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου έργου επιτρέπει την αξιολόγηση του έργου σε διαφορετικά, αλλά αλληλοσυμπληρούμενα επίπεδα. Η ανάλυση του κύριου χρονοδιαγράμματος και των δεικτών δεδουλευμένης αξίας παρέχει εικόνα της συνολικής χρονικής και οικονομικής απόδοσης του έργου, ενώ το σύστημα Last Planner (LPS), ο δείκτης PPC και η ανάλυση των αιτιών μη ολοκλήρωσης παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την αξιοπιστία του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού και τις αιτίες που προκαλούν αποκλίσεις κατά την εκτέλεση των εργασιών. Τα βασικά αποτελέσματα που αναμένεται να αξιολογηθούν στη μελέτη περίπτωσης συνοψίζονται ως εξής:

Για παράδειγμα, μία μείωση του SPI μπορεί να υποδεικνύει επιδείνωση της χρονικής απόδοσης του έργου. Εάν, παράλληλα, η ανάλυση των αιτιών μη ολοκλήρωσης καταδεικνύει επαναλαμβανόμενες αστοχίες λόγω μη έγκαιρης διαθεσιμότητας των απαιτούμενων εξαρτημάτων, η ομάδα έργου μπορεί να συνδέσει τη χρονική απόκλιση με μία συγκεκριμένη αιτία που επηρεάζει την εκτέλεση των εργασιών και να προσαρμόσει ανάλογα τον προγραμματισμό της εφοδιαστικής διαχείρισης ή τη σειρά εγκατάστασης.

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα της συνδυαστικής εφαρμογής δεν ήταν, επομένως, η δημιουργία περισσότερων δεικτών απόδοσης, αλλά η σύνδεση των μετρούμενων αποκλίσεων με τις αιτίες που τις προκάλεσαν και τις αντίστοιχες διορθωτικές ενέργειες. Με τον τρόπο αυτό, η παρακολούθηση του έργου απέκτησε περισσότερο προληπτικό χαρακτήρα και δεν περιορίστηκε στην απλή καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης.

Η αξιοποίηση, όπου αυτό κατέστη δυνατό, πραγματικών δεδομένων του έργου επιτρέπει, τέλος, την αξιολόγηση του βαθμού στον οποίο η συγκεκριμένη προσέγγιση συνέβαλε στη βελτίωση της αξιοπιστίας του προγραμματισμού, της ακρίβειας των προβλέψεων και της ομαλότερης ροής των εργασιών.

7.11 Συμπεράσματα Κεφαλαίου

Η μελέτη περίπτωσης του αιολικού πάρκου αποτελεί το πεδίο πρακτικής εφαρμογής του θεωρητικού και μεθοδολογικού πλαισίου που αναπτύχθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Η κοινή δομή που συνδέει τη δομή ανάλυσης εργασιών (WBS), το χρονοδιάγραμμα, το κόστος και τους κινδύνους επιτρέπει τη συστηματική παρακολούθηση της συνολικής απόδοσης του έργου, ενώ η εφαρμογή του προγραμματισμού έλξης (Pull Planning), του συστήματος Last Planner (LPS), του PPC και της διαχείρισης περιορισμών επεκτείνει την ανάλυση στο επίπεδο της πραγματικής εκτέλεσης και της αξιοπιστίας των εργασιών.

Η συνδυαστική αξιολόγηση δεικτών όπως οι SPI, CPI και PPC ήταν ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι δείκτες αυτοί αποτυπώνουν διαφορετικές διαστάσεις της απόδοσης του έργου. Η παράλληλη παρακολούθησή τους επέτρεψε στην ομάδα του έργου να εντοπίσει τόσο τις δυσμενείς αποκλίσεις απόδοσης όσο και τις αιτίες που τις προκαλούν, δημιουργώντας ένα πλαίσιο στοχευμένων ενεργειών βελτίωσης. Οι ενέργειες αυτές μπορούν να εφαρμόζονται τόσο στις τρέχουσες φάσεις που παρουσιάζουν αρνητικές αποκλίσεις όσο και στις επόμενες φάσεις του έργου, αξιοποιώντας την αποκτηθείσα εμπειρία για την πρόληψη αντίστοιχων προβλημάτων και τη συνεχή βελτίωση της εκτέλεσης.

Η τελική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της προσέγγισης θα βασιστεί, όπου αυτό είναι εφικτό, σε πραγματικά δεδομένα του υπό μελέτη έργου των 66,9 MW, καθώς και σε δεδομένα από άλλα έργα στα οποία μπορεί να εφαρμοστεί ο συνδυασμός της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου έργου. Με τον τρόπο αυτό, τα συμπεράσματα της διπλωματικής θα προκύπτουν από τεκμηριωμένη ανάλυση και σύγκριση πραγματικών δεδομένων και δεν θα περιορίζονται αποκλειστικά στη θεωρητική δυνατότητα εφαρμογής του προτεινόμενου πλαισίου.

Κεφάλαιο 8: Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

8.1 Αξιολόγηση των βασικών ευρημάτων

Η ανάλυση της μελέτης περίπτωσης ανέδειξε ότι η απόδοση του έργου δεν μπορεί να αξιολογηθεί αποκλειστικά μέσω της σύγκρισης της πραγματικής προόδου με το εγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα. Τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 7 έδειξαν ότι οι χρονικές και οικονομικές αποκλίσεις πρέπει να εξετάζονται σε συνδυασμό με την πραγματική ετοιμότητα των εργασιών και την αξιοπιστία του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού.

Ως προς τη χρονική εξέλιξη, χαρακτηριστικό εύρημα αποτέλεσε η πορεία του Έργου Β. Κατά την αρχική περίοδο της ανάλυσης παρατηρήθηκε επιδείνωση της χρονικής απόκλισης, η οποία συνδέθηκε με απρόβλεπτες καθυστερήσεις στη μεταφορά των κύριων εξαρτημάτων. Στους επόμενους μήνες, ωστόσο, καταγράφηκε σημαντική ανάκτηση της χαμένης προόδου και περιορισμός της απόκλισης. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η αξιολόγηση της χρονικής απόδοσης δεν πρέπει να περιορίζεται στο μέγεθος της απόκλισης σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή, αλλά να εξετάζει και την εξέλιξή της. Η σταδιακή μείωση μιας καθυστέρησης μπορεί να αποτελεί ένδειξη ότι οι διορθωτικές ενέργειες που εφαρμόζονται αρχίζουν να αποδίδουν, χωρίς όμως να σημαίνει ότι η αρχική απόκλιση έχει ήδη εξαιρεθεί.

Η παραπάνω διαπίστωση επιβεβαιώθηκε και από τη συνδυαστική εξέταση των δεικτών SPI και PPC. Στο παράδειγμα του Έργου Α, η τιμή $PPC = 91\%$ έδειξε υψηλό βαθμό αξιοπιστίας των πρόσφατων εβδομαδιαίων δεσμεύσεων, ενώ η τιμή $SPI = 0,90$ εξακολουθούσε να αποτυπώνει δυσμενή σφαιρική χρονική απόδοση έναντι του εγκεκριμένου χρονοδιαγράμματος αναφοράς. Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς αποδεικνύει ότι η βελτίωση της τρέχουσας εκτέλεσης δεν συνεπάγεται αυτομάτως την ανάκτηση προηγούμενων καθυστερήσεων. Οι δύο δείκτες εξετάζουν διαφορετικές χρονικές διαστάσεις του ίδιου έργου και, επομένως, η παράλληλη αξιολόγησή τους παρέχει πληρέστερη εικόνα από την ανεξάρτητη χρήση τους.

Αντίστοιχη διαφοροποίηση διαπιστώθηκε μεταξύ χρονικής και οικονομικής απόδοσης. Στην εφαρμογή της ανάλυσης δεδομένης αξίας, για $PV = €6,00$ εκατ., $EV = €7,50$ εκατ. και $AC = €8,00$ εκατ., η δεδομένη αξία υπερέβαινε την προγραμματισμένη αξία, γεγονός που αποτύπωνε ευνοϊκή χρονική απόδοση κατά τη συγκεκριμένη ημερομηνία αναφοράς. Παράλληλα, όμως, το πραγματικό κόστος υπερέβαινε τη δεδομένη αξία, υποδεικνύοντας δυσμενή οικονομική απόδοση.

Η οικονομική αυτή απόκλιση αποτυπώθηκε και μέσω του CPI, ο οποίος ήταν μικρότερος της μονάδας. Υπό την παραδοχή ότι η ίδια οικονομική αποδοτικότητα θα συνεχιζόταν μέχρι την ολοκλήρωση, η εκτίμηση κόστους κατά την ολοκλήρωση υπέδειξε πιθανή υπέρβαση του προϋπολογισμού κατά περίπου €0,48 εκατ. Συνεπώς, η ευνοϊκή χρονική εξέλιξη δεν μπορεί να θεωρηθεί από μόνη της ένδειξη συνολικά θετικής απόδοσης, καθώς η επίτευξη της προόδου μπορεί να συνοδεύεται από αυξημένο πραγματικό κόστος.

Ένα ακόμη σημαντικό εύρημα αφορά τη διαφορά μεταξύ προγραμματισμένης και πραγματικά εκτελέσιμης εργασίας. Στην περίπτωση της Α/Γ 08 του Έργου Β κατά την ημερολογιακή εβδομάδα 47 (CW47), το κύριο χρονοδιάγραμμα προέβλεπε την ολοκλήρωση της κύριας εγκατάστασης, αλλά η μεταφορά των κύριων εξαρτημάτων δεν είχε ακόμη ολοκληρωθεί. Στην Α/Γ 09, πέρα από τον ίδιο περιορισμό, ο κύριος γερανός εξακολουθούσε να απασχολείται στην προηγούμενη εγκατάσταση. Οι δύο περιπτώσεις ανέδειξαν ότι η ύπαρξη μιας δραστηριότητας στο κύριο χρονοδιάγραμμα δεν αποτελεί επαρκή προϋπόθεση για την ένταξή της στον εβδομαδιαίο προγραμματισμό.

Τα αποτελέσματα του μητρώου κινδύνων συμπλήρωσαν την παραπάνω εικόνα. Οι κίνδυνοι που εξετάστηκαν δεν αποτέλεσαν υποθετικά σενάρια, αλλά προέκυψαν από πραγματικές συνθήκες των Έργων Α και Β και αφορούσαν τεχνικούς, εφοδιαστικούς, χρονικούς, οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και οργανωτικούς παράγοντες. Η ανάλυσή τους

έδειξε ότι ένας κίνδυνος μπορεί να μετατραπεί σε συγκεκριμένο περιορισμό εκτέλεσης όταν η πιθανή συνθήκη γίνει πραγματική και επηρεάσει άμεσα μία προγραμματισμένη δραστηριότητα.

Συνολικά, τα βασικά ευρήματα καταδεικνύουν ότι η πραγματική κατάσταση του έργου προκύπτει από τη συνδυαστική αξιολόγηση της χρονικής απόδοσης, της οικονομικής απόδοσης, της αξιοπιστίας του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού και της ετοιμότητας των εργασιών. Κανένα από τα παραπάνω στοιχεία δεν επαρκεί μεμονωμένα για την πλήρη αποτύπωση της απόδοσης.

8.2 Αξιολόγηση της συνδυαστικής εφαρμογής Lean Construction και Project Controls

Η εφαρμογή των δύο προσεγγίσεων στη μελέτη περίπτωσης ανέδειξε ότι η σημαντικότερη συμβολή τους προκύπτει από τη σύνδεση των διαφορετικών πληροφοριών που παράγουν. Τα συστήματα ελέγχου έργου αποτυπώνουν ποσοτικά την απόδοση έναντι του εγκεκριμένου χρονοδιαγράμματος και του προϋπολογισμού, ενώ η λιτή κατασκευή μεταφέρει την ανάλυση στο επίπεδο της πραγματικής εκτέλεσης, εξετάζοντας την ετοιμότητα των εργασιών, την αξιοπιστία των βραχυπρόθεσμων δεσμεύσεων και τις αιτίες μη ολοκλήρωσής τους.

Η περίπτωση $SPI = 0,90$ και $PPC = 91\%$ αποτελεί την πλέον χαρακτηριστική εφαρμογή αυτής της συμπληρωματικότητας. Ο SPI εντόπισε τη δυσμενή σωρευτική χρονική απόδοση, ενώ ο PPC κατέγραψε ότι οι πρόσφατες εβδομαδιαίες δεσμεύσεις εκτελούνταν με υψηλή αξιοπιστία. Επομένως, τα δεδομένα της λιτής κατασκευής μπορούν να προσφέρουν πληροφορίες για τη βραχυπρόθεσμη εξέλιξη της εκτέλεσης, ενώ οι δείκτες των συστημάτων ελέγχου έργου διατηρούν την ευρύτερη εικόνα της απόδοσης έναντι του εγκεκριμένου σχεδιασμού.

Αντίστοιχη σύνδεση προέκυψε μεταξύ του κύριου χρονοδιαγράμματος και της διαδικασίας προετοιμασίας των εργασιών προς εκτέλεση. Οι περιπτώσεις των Α/Γ 08 και Α/Γ 09 έδειξαν ότι το χρονοδιάγραμμα μπορεί να προσδιορίζει πότε πρέπει να εκτελεστεί μία δραστηριότητα, χωρίς όμως να εξασφαλίζει ότι όλες οι προϋποθέσεις για την εκτέλεσή της έχουν ικανοποιηθεί. Η εξέταση της διαθεσιμότητας των κύριων εξαρτημάτων και του κύριου γερανού αποκάλυψε περιορισμούς που δεν αποτυπώνονταν επαρκώς μόνο από την προγραμματισμένη ημερομηνία της δραστηριότητας.

Η εφαρμογή της διαδικασίας προετοιμασίας προς εκτέλεση επιτρέπει, επομένως, τον έλεγχο των προϋποθέσεων πριν μία δραστηριότητα μετατραπεί σε εβδομαδιαία δέσμευση. Στην κύρια εγκατάσταση μιας ανεμογεννήτριας, η ετοιμότητα της θεμελίωσης και της πλατείας ανέγερσης, η παράδοση των εξαρτημάτων χωρίς ελλείψεις ή ζημιές, η διαθεσιμότητα του κύριου γερανού και του συνεργείου και η παρουσία του απαραίτητου εξοπλισμού αποτελούν κρίσιμες προϋποθέσεις εκτέλεσης. Η συγκεκριμένη διαδικασία λειτουργεί συνεπώς προληπτικά, καθώς επιχειρεί να εντοπίσει το εμπόδιο πριν αυτό εξελιχθεί σε πραγματική καθυστέρηση.

Η ανάλυση των αιτιών μη ολοκλήρωσης ενισχύει περαιτέρω αυτή τη λειτουργία. Ο PPC αποτυπώνει τον βαθμό στον οποίο ολοκληρώθηκαν οι προγραμματισμένες εβδομαδιαίες δεσμεύσεις, αλλά δεν εξηγεί από μόνος του τις αιτίες της μη ολοκλήρωσης. Η καταγραφή και επαναλαμβανόμενη αξιολόγηση των αιτιών επιτρέπει στην ομάδα έργου να εντοπίζει πρότυπα αποκλίσεων. Εάν, για παράδειγμα, η μη έγκαιρη διαθεσιμότητα κύριων εξαρτημάτων εμφανίζεται επανειλημμένα ως αιτία μη ολοκλήρωσης, η πληροφορία αυτή μπορεί να οδηγήσει σε προσαρμογή του προγραμματισμού της εφοδιαστικής διαχείρισης ή της σειράς εγκατάστασης των ανεμογεννητριών.

Ανάλογη συμπληρωματικότητα εμφανίζεται στη σύνδεση του μητρώου κινδύνων με τη διαχείριση περιορισμών. Η πιθανή καθυστέρηση στη μεταφορά κύριων εξαρτημάτων μπορεί αρχικά να καταγραφεί ως κίνδυνος. Όταν όμως επιβεβαιωθεί ότι συγκεκριμένα εξαρτήματα δεν θα είναι διαθέσιμα πριν από την προγραμματισμένη εγκατάσταση, η κατάσταση παύει να αποτελεί μόνο πιθανή απειλή και μετατρέπεται σε συγκεκριμένο περιορισμό που απαιτεί διαχειριστική ενέργεια. Με αυτόν τον τρόπο, η διαχείριση κινδύνων συνδέεται άμεσα με τον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό και την πραγματική εκτέλεση.

Το αποτέλεσμα είναι ότι η παρακολούθηση δεν περιορίζεται πλέον στη διαπίστωση ότι το έργο βρίσκεται σε καθυστέρηση ή παρουσιάζει υπέρβαση κόστους. Η ομάδα έργου αποκτά τη δυνατότητα να συνδέσει τη μετρούμενη απόκλιση με συγκεκριμένες συνθήκες της εκτέλεσης και να προσαρμόσει ανάλογα τον βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό.

Συνεπώς, το βασικό εύρημα της συνδυαστικής εφαρμογής δεν είναι ότι η λιτή κατασκευή αντικαθιστά τα συστήματα ελέγχου έργου ή το αντίστροφο. Οι δύο προσεγγίσεις λειτουργούν σε διαφορετικά αλλά αλληλοσυμπληρούμενα επίπεδα. Τα συστήματα ελέγχου έργου παρέχουν την ευρύτερη εικόνα της χρονικής και οικονομικής απόδοσης, ενώ η λιτή κατασκευή παρέχει πληροφόρηση σχετικά με την αξιοπιστία και τις πραγματικές συνθήκες εκτέλεσης. Η σύνδεσή τους επιτρέπει τη μετάβαση από την καταγραφή της απόκλισης στη διερεύνηση της αιτίας και από εκεί στην εφαρμογή και αξιολόγηση της κατάλληλης διορθωτικής ενέργειας.

8.3 Αξιολόγηση της εφαρμογής σε έργα αιολικών πάρκων

Η εφαρμογή της συνδυαστικής προσέγγισης παρουσιάζει ιδιαίτερη αξία στα έργα αιολικών πάρκων, λόγω της επαναληπτικότητας των εργασιών εγκατάστασης και των έντονων αλληλεξαρτήσεων μεταξύ μεταφορών, διαθεσιμότητας εξοπλισμού, συνεργείων και ετοιμότητας των θέσεων εγκατάστασης. Τα αποτελέσματα της μελέτης περίπτωσης έδειξαν ότι μία απόκλιση σε μία δραστηριότητα μπορεί να επηρεάσει διαδοχικά τις επόμενες φάσεις, αλλά και ότι η έγκαιρη αναγνώριση των περιορισμών μπορεί να επιτρέψει την προσαρμογή της σειράς των εργασιών και τον περιορισμό της επίπτωσης στο συνολικό χρονοδιάγραμμα.

Παράλληλα, η επαναλαμβανόμενη εγκατάσταση των ανεμογεννητριών δημιουργεί τη δυνατότητα αξιοποίησης των διδαγμάτων από την εμπειρία. Προβλήματα που εντοπίζονται σε μία εγκατάσταση, όπως καθυστερήσεις στην παράδοση εξαρτημάτων ή στη διαθεσιμότητα κρίσιμων πόρων, μπορούν να λαμβάνονται υπόψη στον προγραμματισμό των επόμενων εργασιών. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη συνεχή βελτίωση και συμβάλλει στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Συνεπώς, η σύνδεση της λιτής κατασκευής με τα συστήματα ελέγχου έργου μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικότερα τη διαχείριση έργων αιολικών πάρκων, συνδυάζοντας τον συνολικό έλεγχο χρόνου, κόστους και κινδύνων με την πραγματική κατάσταση και τις ανάγκες του εργοταξίου.

Κεφάλαιο 9: Συμπεράσματα και Προοπτικές Εφαρμογής

9.1 Συνολικά συμπεράσματα της έρευνας

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι η αποτελεσματική διαχείριση της κατασκευής αιολικών πάρκων απαιτεί τη σύνδεση του συνολικού ελέγχου του έργου με τις πραγματικές συνθήκες εκτέλεσης. Τα συστήματα ελέγχου έργου παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης της χρονικής και οικονομικής απόδοσης, ενώ η λιτή κατασκευή εστιάζει περισσότερο στην ετοιμότητα των εργασιών, στην αξιοπιστία του βραχυπρόθεσμου προγραμματισμού και στην έγκαιρη αναγνώριση των περιορισμών.

Η μελέτη περίπτωσης έδειξε ότι η αξιολόγηση ενός έργου μέσω μεμονωμένων δεικτών δεν παρέχει πάντοτε ολοκληρωμένη εικόνα. Η χρονική πρόοδος μπορεί να συνυπάρχει με δυσμενή οικονομική απόδοση, ενώ η υψηλή αξιοπιστία των εβδομαδιαίων δεσμεύσεων δεν συνεπάγεται απαραίτητα ότι έχουν ανακτηθεί προηγούμενες χρονικές αποκλίσεις. Επομένως, η συνδυαστική εξέταση δεικτών όπως οι SPI, CPI και PPC, μαζί με τους περιορισμούς και τις αιτίες μη ολοκλήρωσης, επιτρέπει πληρέστερη ερμηνεία της πραγματικής κατάστασης του έργου.

Συνολικά, η αξία της συνδυαστικής εφαρμογής της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου έργου εντοπίζεται στη δυνατότητα σύνδεσης της μέτρησης της απόδοσης με τη διερεύνηση των αιτιών των αποκλίσεων και την εφαρμογή κατάλληλων διορθωτικών ενεργειών. Η προσέγγιση αυτή μπορεί να υποστηρίξει περισσότερο προληπτική διαχείριση, ιδιαίτερα σε έργα αιολικών πάρκων, όπου η επανάληψη των εργασιών και οι έντονες αλληλεξαρτήσεις μεταξύ δραστηριοτήτων και πόρων δημιουργούν σημαντικές δυνατότητες συνεχούς βελτίωσης.

9.2 Περιορισμοί της έρευνας

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας πρέπει να αξιολογούνται λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένους περιορισμούς. Πρωτίστως, η εμπειρική διερεύνηση βασίζεται σε συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης δύο χειρσίων αιολικών πάρκων, συνολικής ονομαστικής ισχύος 66,9 MW και έντεκα ανεμογεννητριών, τα οποία για τις ανάγκες της ανάλυσης αντιμετωπίστηκαν ως ενιαίο έργο. Ως εκ τούτου, τα συμπεράσματα αντανakλούν τις τεχνικές, οργανωτικές και κατασκευαστικές συνθήκες της συγκεκριμένης περίπτωσης και δεν μπορούν να θεωρηθούν αυτομάτως αντιπροσωπευτικά για το σύνολο των έργων αιολικής ενέργειας.

Επιπλέον, η ανάλυση βασίστηκε στα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα για τις εξεταζόμενες φάσεις και περιόδους του έργου. Η εφαρμογή των επιμέρους εργαλείων δεν πραγματοποιήθηκε με την ίδια έκταση και το ίδιο επίπεδο λεπτομέρειας σε όλες τις δραστηριότητες. Κατά συνέπεια, η έρευνα δείχνει κυρίως πώς οι εξεταζόμενες μέθοδοι μπορούν να συνδυαστούν και να εφαρμοστούν στην πράξη, χωρίς όμως να υποστηρίζει ότι η εφαρμογή τους οδηγεί πάντα στα ίδια αποτελέσματα ή εγγυάται τη βελτίωση της απόδοσης του έργου.

Αντίστοιχος περιορισμός αφορά τη χρονική διάρκεια της παρακολούθησης των δεικτών. Για παράδειγμα, η αξιολόγηση του PPC στο Έργο Α πραγματοποιήθηκε για τις εργασίες των έξι ανεμογεννητριών σε περίοδο τεσσάρων ημερολογιακών εβδομάδων. Μία μεγαλύτερη χρονική σειρά δεδομένων θα επέτρεπε ασφαλέστερη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ της μεταβολής του PPC, των αιτιών μη ολοκλήρωσης και της μετέπειτα εξέλιξης της συνολικής χρονικής απόδοσης.

Τέλος, η απόδοση ενός κατασκευαστικού έργου επηρεάζεται από μεγάλο αριθμό παραγόντων που δεν είναι πάντοτε δυνατό να απομονωθούν. Οι καιρικές συνθήκες, η διαθεσιμότητα εξοπλισμού και προσωπικού, οι μεταφορές, οι τεχνικές αστοχίες και οι αποφάσεις των εμπλεκόμενων μερών μπορούν να επηρεάσουν ταυτόχρονα την εξέλιξη των εργασιών. Για τον λόγο αυτό, τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι οι δύο προσεγγίσεις μπορούν να εφαρμοστούν συνδυαστικά στην πράξη και να λειτουργήσουν συμπληρωματικά, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι αποτελούν τον μοναδικό παράγοντα που μπορεί να οδηγήσει σε βελτίωση της απόδοσης του έργου.

9.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα και εφαρμογή

Η περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε αρχικά να επεκτείνει την εφαρμογή της προτεινόμενης προσέγγισης σε μεγαλύτερο αριθμό αιολικών έργων και σε μεγαλύτερο χρονικό ορίζοντα. Η συστηματική συλλογή δεδομένων από δείκτες όπως SPI, CPI και PPC, σε συνδυασμό με στοιχεία προόδου, κόστους, κινδύνων, περιορισμών και αιτιών μη ολοκλήρωσης, θα μπορούσε να δημιουργήσει μία ενιαία βάση δεδομένων για τη συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών έργων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελλοντική αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Με την ύπαρξη επαρκούς όγκου ιστορικών δεδομένων από διαφορετικά έργα, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν μοντέλα τα οποία να διερευνούν τις σχέσεις μεταξύ των παραπάνω μεταβλητών και να υποστηρίζουν την πρόβλεψη πιθανών χρονικών ή οικονομικών αποκλίσεων πριν αυτές αποτυπωθούν πλήρως στους συμβατικούς δείκτες απόδοσης.

Ένα τέτοιο μοντέλο θα μπορούσε, για παράδειγμα, να συνδυάζει δεδομένα από το χρονοδιάγραμμα και το κόστος με την εξέλιξη του PPC, τις επαναλαμβανόμενες αιτίες μη ολοκλήρωσης, τους ανοικτούς περιορισμούς και τους καταγεγραμμένους κινδύνους. Με τον τρόπο αυτό, η συνδυαστική εφαρμογή της λιτής κατασκευής και των συστημάτων ελέγχου έργου θα μπορούσε μελλοντικά να εξελιχθεί από ένα πλαίσιο παρακολούθησης και ελέγχου σε ένα περισσότερο προβλεπτικό σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, ενισχύοντας την έγκαιρη αναγνώριση δυσμενών τάσεων και τον προληπτικό χαρακτήρα της διαχείρισης του έργου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Project Management Institute. (2021). A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) (7th ed.). Project Management Institute.
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 31000:2018 Risk management—Guidelines. ISO.
- Atkinson, R. (1999). Project management: Cost, time and quality, two best guesses and a phenomenon, its time to accept other success criteria. *International Journal of Project Management*, 17(6), 337–342.
- Project Management Institute. (2017). A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® Guide) (6th ed.). Project Management Institute.
- Kerzner, H. (2022). *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling* (13th ed.). Wiley.
- Nicholas, J. M., & Steyn, H. (2020). *Project Management for Engineering, Business and Technology* (6th ed.). Routledge.
- Meredith, J. R., Shafer, S. M., & Mantel, S. J. (2021). *Project Management: A Strategic Managerial Approach* (11th ed.). Wiley.
- Fleming, Q. W., & Koppelman, J. M. (2016). *Earned Value Project Management* (4th ed.). Project Management Institute.
- National Aeronautics and Space Administration. (2019). *NASA work breakdown structure (WBS) handbook* (NASA/SP-3404). NASA.
- Project Management Institute. (1994). The WBS. *PM Network*, 8(12), 40–46.
- Association for the Advancement of Cost Engineering International. (2020). *Skills and knowledge of cost engineering* (6th ed.). AACE International.
- Project Management Institute. (2019). Practice standard for scheduling (3rd ed.). Project Management Institute.
- International Organization for Standardization. (2018). ISO 31000:2018 Risk management—Guidelines. ISO.
- Autodesk. (2024). The evolution of BIM dimensions: 3D, 4D, 5D & beyond. Autodesk. <https://www.autodesk.com/blogs/construction/bim-dimensions/>
- Autodesk. (n.d.). BIM for construction. Autodesk. <https://www.autodesk.com/solutions/aec/bim/construction>
- Autodesk. (n.d.). What is 5D BIM? Autodesk. <https://www.autodesk.com/solutions/5d-bim>
- Microsoft. (n.d.). Power BI: Data visualization. Microsoft. <https://www.microsoft.com/en-us/power-platform/products/power-bi/>
- Microsoft. (n.d.). Project management software. Microsoft. <https://www.microsoft.com/microsoft-365/project/project-management>
- Oracle. (n.d.). Primavera P6 Enterprise Project Portfolio Management. Oracle. <https://www.oracle.com/construction-engineering/primavera-p6/>
- Ballard, G., & Howell, G. A. (2003). Lean project management. *Building Research & Information*, 31(2), 119–133.
- Lean Construction Institute. (n.d.). *6 principles of Lean Construction*. [6 Principles of Lean Construction | LCI](#)
- Διπλωματική Εργασία

Koskela, L. (1992). Application of the new production philosophy to construction (CIFE Technical Report No. 72). Center for Integrated Facility Engineering, Stanford University.

Lean Construction Institute. (n.d.). *The 8 wastes of Lean*. [The 8 Wastes of Lean Construction | Lean Construction Institute](#)

Ballard, G., & Howell, G. (1998). Shielding production: Essential step in production control. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(1), 11–17.

Ballard, H. G. (2000). *The Last Planner System of production control* [Doctoral dissertation, University of Birmingham]. University of Birmingham. <https://etheses.bham.ac.uk/id/eprint/4789/>

Ballard, G., & Tommelein, I. (2021). 2020 current process benchmark for the Last Planner® System of project planning and control. *Lean Construction Journal*, 2021, 53–155.

Ohno, T. (1988). *Toyota production system: Beyond large-scale production*. Productivity Press.

Lean Construction Institute. (n.d.). *Continuous improvement*. <https://leanconstruction.org/lean-topics/continuous-improvement/>

Project Management Institute. (2020). *The standard for earned value management*. Project Management Institute. [The Standard for Earned Value Management | PMI](#)

Ballard, G., & Tommelein, I. D. (2021). 2020 current process benchmark for the Last Planner® System of project planning and control. *Lean Construction Journal*, 2021, 53–155.

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.