



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ
ΠΟΡΩΝ ΣΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΕΡΓΩΝ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΤΩΝΙΟΥ Θ. ΠΑΝΑ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π., M.Sc.

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Π. ΠΑΝΤΟΥΒΑΚΗΣ

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΚΑΙ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ
ΠΟΡΩΝ ΣΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΕΡΓΩΝ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΑΝΤΩΝΙΟΥ Θ. ΠΑΝΑ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού Ε.Μ.Π., M.Sc.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Π. ΠΑΝΤΟΥΒΑΚΗΣ,
Καθηγητής Ε.Μ.Π.
2. Σ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ,
Ομοτ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. Α. ΛΟΪΖΟΣ,
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ
ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Π. ΠΑΝΤΟΥΒΑΚΗΣ,
Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)
2. Σ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ,
Ομοτ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.
3. Α. ΛΟΪΖΟΣ,
Καθηγητής Ε.Μ.Π.
4. Κ. ΣΠΥΡΑΚΟΣ,
Καθηγητής Ε.Μ.Π.
5. Α. ΜΟΥΡΑΤΙΔΗΣ,
Καθηγητής Α.Π.Θ.
6. Α. ΧΑΣΙΑΚΟΣ,
Αναπλ. Καθηγητής Παν. Πατρών
7. Ν. ΛΑΓΑΡΟΣ,
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Μάιος 2016

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

Ευχαριστίες

Η διδακτορική διατριβή διεξήχθη κατά την περίοδο 2007-2016 στο Κέντρο Καινοτομίας Κατασκευών του Τομέα Προγραμματισμού και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της Διατριβής, κ. Π. Παντουβάκη, Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την αμέριστη υποστήριξη, τη διαρκή και εποικοδομητική κριτική αξιολόγηση της έρευνας, καθώς και το προσωπικό ενδιαφέρον που επέδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής, τους κ.κ. Λαμπρόπουλο, Ομοτ. Καθηγητή Ε.Μ.Π. και Α. Λοΐζο, Καθηγητή Ε.Μ.Π. για τα χρήσιμα σχόλια και τις παρατηρήσεις τους.

Ακόμη, ευχαριστίες εκφράζονται προς όλους τους μηχανικούς και τα στελέχη των εταιρειών που συνέδραμαν στην συλλογή των πρωτογενών δεδομένων πεδίου συμβάλλοντας με αυτόν τον τρόπο στην περαιτέρω βελτίωση της έρευνας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την ουσιαστική και διαρκή ενθάρρυνση όσον αφορά στην εκπλήρωση των ακαδημαϊκών μου επιδιώξεων.

στην Ελένη
στην Μαρίλια

Πίνακας Περιεχομένων

| | |
|---|-------|
| Ευχαριστίες..... | i |
| Πίνακας Περιεχομένων | v |
| Πίνακας Συμβόλων..... | ix |
| Γλωσσάριο ελληνικών & αγγλικών όρων | xi |
| Κατάλογος Σχημάτων..... | xv |
| Κατάλογος Πινάκων..... | xix |
| Περίληψη..... | xxi |
| Εκτεταμένη Περίληψη..... | xxiii |
| Extended Abstract | xxvii |
| Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή..... | 31 |
| 1.1. Σκοπός..... | 31 |
| 1.2. Εισαγωγή..... | 31 |
| 1.3. Η αναγκαιότητα της έρευνας..... | 32 |
| 1.4. Στόχοι της διατριβής..... | 34 |
| 1.5. Βασικοί ορισμοί..... | 34 |
| 1.6. Ευνοϊκές συνθήκες και περιορισμοί διεξαγωγής της έρευνας..... | 35 |
| 1.6.1. Ευνοϊκές συνθήκες..... | 35 |
| 1.6.2. Περιορισμοί..... | 35 |
| 1.7. Δομή της διατριβής..... | 37 |
| Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση | 39 |
| 2.1. Σκοπός..... | 39 |
| 2.2. Εισαγωγή..... | 39 |
| 2.3. Βασικοί ορισμοί και μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας..... | 40 |
| 2.3.1. Μαθηματικά μοντέλα εκτίμησης παραγωγικότητας..... | 41 |
| 2.3.2. Αξιολόγηση και επιλογή μοντέλου παραγωγικότητας..... | 43 |
| 2.4. Παραγοντικό μοντέλο παραγωγικότητας..... | 45 |
| 2.4.1. Παραγοντικό μοντέλο έντασης εργασίας..... | 45 |
| 2.4.2. Παραγοντικό μοντέλο έντασης εξοπλισμού..... | 47 |
| 2.4.3. Μηχανικός εξοπλισμός τεχνικών έργων..... | 47 |
| 2.5. Λειτουργική ανάλυση δομικών μηχανών..... | 49 |
| 2.5.1. Συντελεστής επιπλήσματος (f_s)..... | 51 |
| 2.5.2. Ονομαστική χωρητικότητα κάδου χωματουργικού μηχανήματος (V_{rated})..... | 53 |
| 2.5.3. Συντελεστής πλήρωσης κάδου (f_{fill})..... | 56 |
| 2.5.4. Χρόνος κύκλου (t_{th})..... | 58 |
| 2.5.5. Συντελεστής παραγωγικότητας (f_x)..... | 79 |
| 2.5.6. Μέθοδοι ταχείας εκτίμησης παραγωγικότητας..... | 93 |
| 2.5.7. Παραγωγικότητα δομικών μηχανών..... | 99 |
| 2.5.8. Μέτρηση της παραγωγικότητας..... | 100 |
| 2.6. Συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα και το φαινόμενο της μάθησης..... | 102 |
| 2.6.1. Μαθηματικά μοντέλα καμπύλων μάθησης..... | 105 |
| 2.7. Αναλυτικές μέθοδοι εκτίμησης παραγωγικότητας..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| 2.7.1. Στατιστικά μοντέλα..... | 106 |
| 2.7.2. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα..... | 108 |
| 2.8. Προσομοίωση..... | 112 |
| 2.8.1. Βασικές έννοιες της προσομοίωσης..... | 112 |
| 2.8.2. Το μοντέλο προσομοίωσης EZStrobe..... | 116 |
| 2.9. Σύνοψη κεφαλαίου..... | 121 |
| Κεφάλαιο 3 Ερευνητική μεθοδολογία..... | 123 |
| 3.1. Σκοπός..... | 123 |
| 3.2. Φάσεις της έρευνας..... | 123 |
| 3.2.1. Φάση 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση..... | 123 |
| 3.2.2. Φάση 2: Προσδιορισμός συντελεστών παραγωγικότητας..... | 124 |
| 3.2.3. Φάση 3: Συλλογή δεδομένων..... | 125 |
| 3.2.4. Φάση 4: Ανάλυση δεδομένων..... | 125 |
| 3.2.5. Φάσεις 5, 6 και 7: Σχεδιασμός της έρευνας..... | 125 |
| 3.3. Σύνοψη κεφαλαίου..... | 133 |
| Κεφάλαιο 4 Εκτίμηση και συγκριτική αξιολόγηση της παραγωγικότητας..... | 134 |
| 4.1. Σκοπός..... | 134 |
| 4.2. Εισαγωγή..... | 134 |
| 4.3. Μεθοδολογία για την συγκριτική αξιολόγηση γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας..... | 135 |
| 4.4. Μεθοδολογία για την μέτρηση και συγκριτική αξιολόγηση άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας..... | 138 |
| 4.4.1. Συλλογή δεδομένων..... | 140 |
| 4.4.2 Κατασκευή στατιστικού μοντέλου..... | 140 |
| 4.4.3 Κατασκευή μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων..... | 141 |
| 4.4.4. Προσδιορισμός διορθωτικών πολλαπλασιαστών..... | 142 |
| 4.5. Σύνοψη κεφαλαίου..... | 145 |
| Κεφάλαιο 5 Ανάπτυξη στοχαστικού μοντέλου και πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης..... | 146 |
| 5.1. Σκοπός..... | 146 |
| 5.2. Εισαγωγή..... | 146 |
| 5.3. Κατασκευή κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson)..... | 147 |
| 5.3.1. Κατασκευή caisson και προσομοίωση..... | 147 |
| 5.3.2. Περιγραφή της μεθόδου κατασκευής caisson..... | 148 |
| 5.4. Διατύπωση του στοχαστικού μοντέλου και λογισμικού προσομοίωσης <i>CaissonSim</i> | 150 |
| 5.4.1. Βιβλιοθήκη μοντέλων προσομοίωσης..... | 154 |
| 5.4.2. Γεννήτορας συνδυασμών εφαρμογής..... | 159 |
| 5.4.3. Λειτουργική μονάδα προσομοίωσης..... | 160 |
| 5.4.4. Λειτουργική μονάδα αναφορών..... | 160 |
| 5.5. Ενσωμάτωση του συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα στην προσομοίωση..... | 164 |
| 5.6. Σύνοψη του κεφαλαίου..... | 167 |
| Κεφάλαιο 6 Αξιολόγηση της έρευνας..... | 168 |
| 6.1. Σκοπός..... | 168 |
| 6.2. Εισαγωγή..... | 168 |
| 6.3. Μεθοδολογία συγκριτικής αξιολόγησης γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας..... | 168 |
| 6.3.1. Ποιοτική σύγκριση των εκτιμητικών μεθόδων και των συντελεστών παραγωγικότητας..... | 169 |
| 6.3.2. Παράδειγμα εφαρμογής για χωματουργικές εργασίες..... | 170 |
| 6.3.3. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα..... | 176 |
| 6.4. Μεθοδολογία μέτρησης και συγκριτικής αξιολόγησης άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας..... | 177 |

| | |
|---|-----|
| 6.4.1. Μελέτη περίπτωσης για δραστηριότητες κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου | 177 |
| 6.4.2. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων στατιστικού μοντέλου και μοντέλου ΤΝΔ | 191 |
| 6.4.3. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα | 193 |
| 6.5. Στοχαστικό μοντέλο παραγωγικότητας και πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης <i>CaissonSim</i> | 194 |
| 6.5.1. Μελέτη περίπτωσης για την εφαρμογή του στοχαστικού μοντέλου παραγωγικότητας..... | 194 |
| 6.5.2. Δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης | 195 |
| 6.5.3. Εκτέλεση του πειράματος της προσομοίωσης | 195 |
| 6.5.4. Αποτελέσματα πειράματος προσομοίωσης | 198 |
| 6.5.5. Επιρροή της αλληλουχίας εκτέλεσης των δραστηριοτήτων | 198 |
| 6.5.6. Επιρροή του ρυθμού ολίσθησης..... | 199 |
| 6.5.7. Επιρροή των τεχνικών χαρακτηριστικών της πλωτής αυτοβυθιζόμενης δεξαμενής | 200 |
| 6.5.8. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα..... | 200 |
| 6.6. Αξιολόγηση στοχαστικού μοντέλου με καμπύλη μάθησης..... | 201 |
| 6.6.1. Βαθμός μάθησης και ιστορικά δεδομένα παραγωγικότητας..... | 201 |
| 6.6.2. Εκτίμηση παραγωγικότητας για μελλοντικές εργασίες | 205 |
| 6.6.3. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα..... | 208 |
| 6.7. Σύνοψη κεφαλαίου | 209 |
| Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα..... | 212 |
| 7.1. Σκοπός..... | 212 |
| 7.2. Σύνοψη της ερευνητικής προσπάθειας..... | 212 |
| 7.3. Παρουσίαση συμπερασμάτων | 213 |
| 7.3.1. Μεθοδολογία για την συγκριτική αξιολόγηση γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας | 214 |
| 7.3.2. Μεθοδολογία για τη μέτρηση και συγκριτική αξιολόγηση άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας | 215 |
| 7.3.3. Ανάπτυξη στοχαστικού μοντέλου και πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης <i>CaissonSim</i> | 216 |
| 7.3.4. Ενσωμάτωση του συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα στην προσομοίωση | 217 |
| 7.4. Η ερευνητική συμβολή της διατριβής | 218 |
| 7.4.1. Μεθοδολογία για την συγκριτική αξιολόγηση της παραγωγικότητας..... | 218 |
| 7.4.2. Στοχαστικό μοντέλο και πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης | 219 |
| 7.5. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση..... | 219 |
| Βιβλιογραφία..... | 222 |
| Παράρτημα Α: Εκτίμηση παραγωγικότητας δομικών μηχανών | 246 |
| Α.1. Εκσκαφέας | 246 |
| Α.2. Φορτωτής | 249 |
| Α.3. Φορητό αυτοκίνητο οπίσθιας ανατροπής | 252 |
| Α.4. Προωθητής..... | 255 |
| Α.5. Αποξεστικό όχημα..... | 258 |
| Α.6. Ισοπεδωτής..... | 260 |
| Α.7. Δομικός πυργογερανός..... | 262 |
| Α.8. Αντλία σκυροδέματος | 263 |
| Παράρτημα Β: Ευρετήριο βασικών όρων | 266 |

Πίνακας Συμβόλων

| Συμβολισμός | Περιγραφή |
|----------------------------|---|
| α | Γωνία στροφής μπούμα εκσκαφέα / οικοδομικού γερανού |
| γ_{bank} | Ειδικό ή φαινόμενο βάρος του εδάφους στη φυσική του θέση |
| γ_{loose} | Ειδικό ή φαινόμενο βάρος του εδάφους μετά την εκσκαφή |
| ε_i | Σφάλμα πρόβλεψης στατιστικού μοντέλου |
| η | Συντελεστής μηχανικής απόδοσης |
| φ | Γωνία που σχηματίζει το φτερό του κοπτήρα σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο |
| ω | Γωνία ισορροπίας γαιών μπροστά από τον κοπτήρα του προωθητή |
| A | Χρονική διάρκεια κατασκευής πρώτου caisson |
| b_0 | Συντελεστής παρεμβολής στατιστικού μοντέλου |
| b_1, b_2, \dots, b_{p-1} | Συντελεστής παλινδρόμησης στατιστικού μοντέλου |
| BRC | Συνθήκες βάσης αναφοράς |
| BRM | Δείκτες βάσης αναφοράς |
| d | Βάθος εκσκαφής |
| Di | Σύνολο δεδομένων |
| DP | Στοιχείο δεδομένων |
| E_f | Ακρίβεια πρόβλεψης μοντέλου μάθησης σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) |
| \underline{F} | Μητρώο διορθωτικών πολλαπλασιαστών |
| $f(y)$ | Συνολική επίδραση των συντελεστών παραγωγικότητας που αποτιμάται ως σταθερός όρος στο παραγοντικό μοντέλο παραγωγικότητας |
| f_{alt} | Συντελεστής υψομέτρου εργασίας |
| f_{avail} | Συντελεστής διαθεσιμότητας μηχανήματος |
| f_{blade} | Συντελεστής τύπου κοπτήρα |
| $f_{concrete}$ | Συντελεστής ακρίβειας σκυροδέτησης |
| $f_{condition}$ | Συντελεστής κατάστασης χώρου εργασίας |
| f_{depth} | Συντελεστής βάθους εκσκαφής |
| $f_{depth,norm}^{BML}$ | Κανονικοποιημένος συντελεστής βάθους εκσκαφής κατά BML |
| $f_{depth,norm}^{KOM}$ | Κανονικοποιημένος συντελεστής βάθους εκσκαφής κατά Komatsu |
| f_{dump} | Συντελεστής εκκένωσης του κάδου |
| f_E | Συντελεστής εκμετάλλευσης του μηχανήματος |
| f_{fill} | Συντελεστής πλήρωσης πτύου υδραυλικού εκσκαφέα |
| f_{grade} | Συντελεστής κλίσης εδάφους |
| f_{height} | Συντελεστής ύψους φόρτωσης εκσκαφέα / φορτωτή |
| f_{hose} | Συντελεστής πλήρωσης σωλήνα αντλίας σκυροδέματος |
| f_{length} | Συντελεστής πλάτους εργασίας για την σκυροδέτηση δαπέδων βαρέως τύπου |
| f_{match} | Συντελεστής συναρμογής χρόνου κύκλου |
| f_{method} | Συντελεστής μεθόδου εργασίας |
| f_{norm} | Κανονικοποιημένος διορθωτικός πολλαπλασιαστής |
| f_s | Συντελεστής επιπλήσματος |
| f_{skill} | Συντελεστής ικανότητας χειριστή |
| f_{speed} | Συντελεστής ταχύτητας |
| f_{swing} | Συντελεστής γωνίας στροφής |
| $f_{swing,norm}^{BML}$ | Κανονικοποιημένος συντελεστής στροφής κατά BML |
| $f_{swing,norm}^{KOM}$ | Κανονικοποιημένος συντελεστής στροφής κατά Komatsu |

| | |
|--|--|
| $f_{swing-depth}$ | Συντελεστής γωνίας στροφής – βάθους εκσκαφής |
| f_x | Πολλαπλασιαστές που εκφράζουν την επιρροή των συντελεστών παραγωγικότητας |
| f_{vol} | Συντελεστής συναρμογής όγκων φορτωτικού μέσου – μεταφορικού οχήματος |
| f_{wear} | Συντελεστής φθοράς δοντιών κάδου εκσκαφέα |
| f_{width} | Συντελεστής μήκους εργασίας για την σκυροδέτηση διαπέδων βαρέως τύπου |
| G | Βάρος ή φορτίο φορτηγού οχήματος |
| h_d / h_h | Βάθος ή ύψος εκσκαφής |
| h_{d-opt} | Βέλτιστο βάθος εκσκαφής |
| h_{max} | Μέγιστο βάθος ή ύψος εκσκαφής |
| k | Αριθμός των caisson των οποίων η παραγωγικότητα πρέπει να προβλεφθεί |
| l | Τμήμα διαδρομής μετάβασης / επιστροφής φορτηγού αυτοκινήτου |
| L | Ρυθμός μάθησης μετρούμενος σε ποσοστό επί τοις εκατό (%) |
| m | Αριθμητικός δείκτης που υποδηλώνει πλήθος (caisson, μοντέλων) |
| m_{max} | Μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος φορτίου οικοδομικού γερανού |
| m_0 | Βάρος εξοπλισμού ανύψωσης οικοδομικού γερανού |
| n | Αριθμητικός δείκτης που υποδηλώνει πλήθος (ημερήσιες μετρήσεις, αριθμός συντελεστών παραγωγικότητας) |
| n_c | Κλίση της λογαριθμικής γραμμής στο ευθύγραμμο μοντέλο μάθησης |
| n_e | Αριθμός μεθόδων εκτίμησης παραγωγικότητας |
| n_{exc} | Αριθμός εκσκαφών |
| n_{iv} | Αριθμός ανεξάρτητων μεταβλητών μοντέλου παραγωγικότητας |
| n_{NN} | Αριθμός νευρώνων στο επίπεδο εξόδου ενός ΤΝΔ |
| n_{norm} | Αριθμός κανονικοποιημένων συντελεστών παραγωγικότητας |
| n_p | Αριθμός παραμέτρων του συστήματος |
| n_{truck} | Αριθμός φορτηγών οχημάτων |
| m_{NN} | Αριθμός νευρώνων στο επίπεδο εισόδου ενός ΤΝΔ |
| P | Ισχύς αντλίας σκυροδέματος |
| p | Πίεση σκυροδέματος στον σωλήνα της αντλίας σκυροδέματος |
| PR | Δείκτης απόδοσης |
| Q_{th} | Θεωρητική παραγωγικότητα |
| Q_{eff} | Αναμενόμενη παραγωγικότητα |
| q | Ποσότητα που έχει παραχθεί |
| R^2 | Συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού |
| r | Συντελεστής συσχέτισης |
| s | Επίπλησμα |
| s_i | Αριθμός υπο-εργασιών |
| T | Δραστηριότητα |
| t_{net} | Καθαρός χρόνος εργασίας μέσα σε μία ώρα (60') |
| t_{th} | Θεωρητικός χρόνος κύκλου για ένα συνεργείο ή μηχάνημα |
| v | Ταχύτητα κίνησης οχήματος |
| V_{bank} | Όγκος του εδαφικού υλικού στη φυσική αδιατάρακτη θέση του |
| V_{loose} | Όγκος του εδαφικού υλικού που έχει εξορυχθεί από την αδιατάρακτη θέση του |
| $V_{SAE/CECE/JIS/PCSA}$ V_{rated} | Ονομαστική χωρητικότητα πτύου εκσκαφέα σύμφωνα με συγκεκριμένο πρότυπο (π.χ. SAE, CECE, JIS, PCSA) |
| V_{th} | Θεωρητική παραγωγή συνεργείου ή μηχανήματος |
| w | Αντίσταση κίνησης / κλίσης |
| X | Συνολικός αριθμός caisson |
| $X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,p-1}$ | Ανεξάρτητη μεταβλητή στατιστικού μοντέλου |
| Y_i | Εξαρτημένη μεταβλητή στατιστικού μοντέλου |
| y_{m+i} | Πραγματικές τιμές παραγωγικότητας |
| y_{m+i} | Εκτιμώμενες τιμές παραγωγικότητας |
| Y_x | Αθροιστική μέση τιμή της χρονικής διάρκειας (εργατοώρες) που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της κατασκευής X caisson |

Γλωσσάριο ελληνικών & αγγλικών όρων

| ΕΛΛΗΝΙΚΑ | ΑΓΓΛΙΚΑ |
|--|-----------------------------------|
| αθροιστικά δεδομένα | cumulative data |
| αθροιστικός ή απολογιστικός ρυθμός παραγωγής | cumulative production rate |
| ακρίβεια πρόβλεψης | prediction accuracy |
| αλγόριθμος της οπισθοδιάδοσης του λάθους | back-propagation algorithm |
| ανάκληση | recall |
| αναμενόμενη παραγωγικότητα | effective productivity |
| ανάστροφο υπολογισμό του σφάλματος | backward error calculation |
| ανεξαρτησία στατιστικού δείγματος | sample independence |
| ανεξάρτητες επαναλήψεις | independent replications |
| ανεξάρτητες μεταβλητές | independent variables |
| απευθείας παρατήρηση | direct observation |
| απλή παλινδρόμηση | simple regression |
| αποδοτικότητα | effectiveness |
| αφηρημένο μοντέλο | abstract model |
| βαθμός μάθησης δικτύου | learning efficiency |
| βαθμωτό μοντέλο | piecewise / stepwise model |
| βασικός βοηθητικός χρόνος | basic ancillary time |
| βασικός επιπρόσθετος χρόνος | basic excess time |
| βασικός χρόνος | basic element time |
| βέλτιστη εκτίμηση | best guess |
| βιντεοσκόπηση στοπ καρέ | time lapse |
| βραχυπρόθεσμη διακύμανση παραγωγικότητας | short-term productivity variation |
| βραχυπρόθεσμη παραγωγικότητα | short-term productivity |
| γεγονότα | events / event times |
| γραφικό περιβάλλον χρήστη | graphical user interface |
| δεδομένα μελέτης εργασίας | work study data |
| δειγματοληπτική μελέτη του χρόνου | work sampling |
| δειγματοληπτική μελέτη χρόνου | work sampling |
| δείκτης R^2 | R-square |
| δείκτης απόδοσης | performance ratio |
| δείκτης μέτρησης πεδίου | field rating |
| δεσμευμένη δραστηριότητα | bound activity |
| διάγραμμα μόχλευσης | leverage plot |
| διαγράμματα διασποράς | scatter diagrams |
| διαγράμματα επικύρωσης | validation charts |
| διαγράμματα κύκλου δραστηριοτήτων | activity cycle diagrams |
| διαδικασία κατάταξης | ranking process |
| διακλαδωτής | fork |
| διακριτή προσομοίωση | discrete simulation |
| διακύμανση | variance |
| διαστρωτής σκυροδέματος | slipform paver |

| | |
|--|-----------------------------------|
| διεπιφάνεια εισαγωγής δεδομένων | input interface |
| δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης πολλών επιπέδων | multi-layer feed-forward network |
| διορθωτικοί πολλαπλασιαστές | correction coefficients |
| δοκιμαστικές εκτελέσεις της προσομοίωσης | pilot simulation runs |
| δραστηριότητα υπό αίρεση | conditional activity |
| ειδική αρπάγη μεταλλότυπου | yoke |
| ειδική βούρτσα διαμόρφωσης δαπέδου | float/texturing brush |
| ειδικό μηχάνημα με ακτίνες laser | laser screed |
| εκθετικό μοντέλο | exponential model |
| εκπαίδευση νευρωνικού δικτύου | ANN training |
| εκτελεστική συνέχεια | executorial continuity |
| εκτιμητική ικανότητα | prediction capability |
| ελάχιστο απόλυτο σφάλμα | minimum absolute error |
| έλεγχοι καλής προσαρμογής | goodness of fit |
| ελεγχόμενοι παράγοντες παραγωγικότητας | controllable productivity factors |
| έλεγχος δραστηριοτήτων | activity scanning |
| έλεγχος δραστηριοτήτων τριών φάσεων | three-phase activity scanning |
| έλεγχος νευρωνικού δικτύου | ANN testing |
| ελικοπτεράκι | power trowel |
| ενδιάμεσο ή κρυφό επίπεδο | middle / hidden layer |
| εξαρτημένες μεταβλητές | dependent variables |
| εξωτερική σταλία | external delay |
| επαλήθευση | verification |
| επικύρωση | validation |
| επίπεδο νευρωνικού δικτύου | neural network layer |
| επίπεδο αφαίρεσης | abstraction level |
| επίπεδο εισόδου | input layer |
| επίπεδο εξόδου | output layer |
| επίσημα διαλείμματα | official breaks |
| επόπτης | observer |
| εσωτερική σταλία | internal delay |
| ευθύγραμμο μοντέλο | straight-line model |
| εύρεση εκτόπων | outliers detection |
| ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας | daily site report |
| ημι-παραγωγική κατάσταση | semi-productive state |
| θεωρητική παραγωγικότητα | theoretical productivity |
| θεωρία καμπύλης μάθησης | learning curve theory |
| καθαρή εργασία | direct work |
| καμπύλη εμπιστοσύνης | confidence curve |
| κατηγορίες ή ομάδες δεδομένων | data clusters |
| κρίσιμο μέσο παραγωγής | leading resource |
| κυβικό μοντέλο | cubic model |
| κύκλος παραγωγής | production cycle |
| λειτουργικά σενάρια | operational scenarios |
| λειτουργική διάταξη | operational setting |
| λειτουργική συσχέτιση | functional relation |
| λογαριθμική κλίμακα | log-log scale |
| μάθηση | learning |

| | |
|--|-------------------------------------|
| μάθηση υπό επίβλεψη | supervised learning |
| μάθηση χωρίς επίβλεψη | unsupervised learning |
| μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα | long-term productivity |
| μακροσκοπικό επίπεδο | macro level |
| μέγιστο απόλυτο σφάλμα | maximum absolute error |
| μέθοδοι προσανατολισμένες στα δεδομένα | data-oriented methods |
| μέθοδοι προσανατολισμένες στη διαδικασία υπολογισμού | process-oriented methods |
| μέθοδος εργασίας | method statement |
| μέθοδος πεντάλεπτης μέτρησης | five minute rating |
| μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων | least mean square method |
| μελέτη για την μέτρηση της εργασίας | work measurement study |
| μελέτη μεθόδων εργασίας | methods study |
| μελέτη περίπτωσης | case study |
| μελέτη χρόνου και κίνησης ή κινησιομετρική μελέτη | time and motion study |
| μέσο απόλυτο σφάλμα | mean absolute error |
| μέσο τετραγωνικό σφάλμα | root mean square error |
| μεταβλητές δείκτες | indicator variables |
| μεταβλητή εισόδου | input variable |
| μεταβλητή εξόδου | output variable |
| μεταβλητή παραγωγικότητας | productivity variable |
| μη ελεγχόμενοι παράγοντες παραγωγικότητας | uncontrollable productivity factors |
| μη-παραγωγική κατάσταση | non-productive state |
| μικροσκοπικό επίπεδο | micro level |
| μοναδιαία δεδομένα | unit data |
| μοναδιαίος ρυθμός παραγωγής | unit production rate ή unit rate |
| μοντέλο δραστηριότητας | activity model |
| μοντέλο έντασης εξοπλισμού | equipment intensive model |
| μοντέλο έντασης εργασίας | labour intensive model |
| μοντέλο εργασίας | task model |
| μοντέλο σταλίας | delay model |
| μοντέλα μελέτης εργασίας | work study models |
| μοντέλα παλινδρόμησης | regression models |
| μοντέλο παραγωγικότητας και σταλίας | method productivity delay model |
| μοντέλου παραγωγικότητας | productivity model |
| νευρώνες | neurons |
| ντετερμινιστική προσομοίωση | deterministic simulation |
| ολισθαίνων μεταλλότυπος | slipform equipment |
| ομοιογένεια στατιστικού δείγματος | sample homogeneity |
| οπτικό μοντέλο | visual model |
| οργανωτική συνέχεια | organizational continuity |
| όριο μάθησης | learning development threshold |
| ουρά αναμονής | queue |
| παράγοντες πρώτου επιπέδου | micro-level / first order factors |
| παραγοντικά μοντέλα | factor-based models |
| παραγωγική κατάσταση | productive state |
| παραγωγική μονάδα | production unit |
| παρατηρηθείσα πιθανότητα σημαντικότητας | observed significance probability |
| πηγαία δεδομένα | raw data |

| | |
|---|---------------------------------------|
| πίνακας ανάλυσης της διακύμανσης | analysis of variance table |
| πίνακας προσαρμογής μοντέλου | fit table |
| πλάκα θεμελίωσης | foundation slab |
| πλωτά κιβώτια σκυροδέματος | floating box caissons |
| πλωτή αυτοβυθιζόμενη δεξαμενή | submersible floating dock |
| πολλαπλή παλινδρόμηση | multiple regression |
| προσαρμοσμένος δείκτης R^2 | adjusted R-square |
| πρόσθετα διαλείμματα | extra breaks |
| πρόσθιο υπολογισμό της εξόδου | forward output calculation |
| προσομοίωση διακριτών γεγονότων | discrete-event simulation |
| πρότυπα μοντέλα προσομοίωσης | simulation model templates |
| ρυθμός εργασίας | work rate |
| ρυθμός μάθησης | learning rate |
| ρυθμός ολίσθησης | sliding rate |
| σημείο τυπικής παραγωγικότητας | standard production point |
| σταθμός εμπορευματοκιβωτίων | container terminal |
| στατιστική συσχέτιση | statistical relation |
| στοιχεία υπολογισμού | processing elements |
| στοιχείο δεδομένων | datapoint |
| στοχαστική προσομοίωση | stochastic simulation |
| στρατηγική ροής της εργασίας | workflow strategy |
| συγκεντρωτική ουρά | bin queue |
| συμπαγής όγκος | bank volume |
| συνάρτηση ενεργοποίησης | activation function |
| συνάρτηση μετατροπής | scaling function |
| συνάρτηση μεταφοράς | transfer function |
| συνάψεις | synapses |
| σύνδεσμος αποδέσμευσης | release link |
| σύνδεσμος δέσμευσης | draw link |
| σύνδεσμος διακλάδωσης | branch link |
| συνεδρία | workshop |
| συνεχής προσομοίωση | continuous simulation |
| συνθήκες βάσης αναφοράς | baseline reference conditions |
| σύνολο δεδομένων | dataset |
| συνοπτικά στατιστικά στοιχεία | summary statistics |
| συντελεστές παλινδρόμησης | regression coefficients |
| συντελεστές παραγωγικότητας | productivity factors |
| συντελεστές προσαρμογής | adjustment coefficients / efficiency |
| | multipliers |
| συντελεστής απόδοσης | performance factor |
| συντελεστής επιπλήσματος | swell factor |
| συντελεστής παρεμβολής | intercept |
| συντελεστής πλήρωσης πτύου | fill factor |
| συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού | coefficient of multiple determination |
| σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων ή απλά υπόλοιπο | residual |
| σφάλμα πρόβλεψης | prediction error |
| τεχνική της οπίσθιας σταδιακής επιλογής | backward stepwise selection technique |
| υπόδειγμα εκπαίδευσης | training set |

φαινομενική εγκυρότητα
φαινόμενο μάθησης
χαλαρός όγκος
χρόνος ανάπαυσης

face validity
learning phenomenon
loose volume
relaxation

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 1.1: Σχηματική απεικόνιση της δομής της Διδακτορικής Διατριβής..... | 38 |
| Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της δομής της βιβλιογραφικής ανασκόπησης..... | 39 |
| Σχήμα 2.2: Γραφική απεικόνιση του παραγοντικού μοντέλου παραγωγικότητας (Thomas et. al, 1990)..... | 47 |
| Σχήμα 2.3: Μηχανήματα που εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο..... | 49 |
| Σχήμα 2.4: Όγκος ανεστραμμένου κάδου εκσκαφέα σύμφωνα με το πρότυπο SAE J296-JUN293 (SAE, 1993)..... | 54 |
| Σχήμα 2.5: Όγκος ανεστραμμένου κάδου εκσκαφέα σύμφωνα με το πρότυπο CECE (1973)..... | 54 |
| Σχήμα 2.6: Όγκος κάδου φορτωτή σύμφωνα με τα πρότυπα SAE και CECE..... | 55 |
| Σχήμα 2.7: Όγκος κάδου φορτηγού οχήματος σύμφωνα με το πρότυπο SAE..... | 55 |
| Σχήμα 2.8: Τύποι κοπήρα προωθητή..... | 56 |
| Σχήμα 2.9: Χρόνος κύκλου εκσκαφέα σε σχέση με τη χωρητικότητα του κάδου κατά BML (1983; σελ. 3) και Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 246)..... | 60 |
| Σχήμα 2.10: Χρόνος κύκλου εκσκαφέα σε σχέση με την κατηγορία εδαφικού υλικού κατά Hüster (2005; σελ. 43); Liebherr (1986; σελ. 361); Nunally (2007; σελ. 49)..... | 60 |
| Σχήμα 2.11: Χρόνος κύκλου εκσκαφέα σε σχέση με την ισχύ του μηχανήματος..... | 61 |
| Σχήμα 2.12: Χρόνος πλήρωσης κάδου φορτωτή σε σχέση με την κατηγορία του εδαφικού υλικού..... | 63 |
| Σχήμα 2.13: Χρόνος εκκένωσης κάδου φορτωτή σε σχέση με τον τρόπο απόθεσης του υλικού..... | 64 |
| Σχήμα 2.14: Χρόνος μετάβασης έμφορτου φορτωτή (CAT 972M & KOMATSU WA500-3)..... | 64 |
| Σχήμα 2.15: Χρόνος μετάβασης άδειου φορτωτή (CAT 972M & KOMATSU WA500-3)..... | 64 |
| Σχήμα 2.16: Χρόνος μετάβασης / επιστροφής φορτωτή..... | 65 |
| Σχήμα 2.17: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης μέγιστης ταχύτητας φορτηγού αυτοκινήτου..... | 69 |
| Σχήμα 2.18: Συντελεστής ταχύτητας (f_{speed}) για όχημα σε κίνηση (προσαρμοσμένο από Kühn (1984; σελ. 182))..... | 70 |
| Σχήμα 2.19: Συντελεστής ταχύτητας (f_{speed}) για όχημα που εκκινεί από στάση (προσαρμοσμένο από Kühn (1984; σελ. 182))..... | 70 |
| Σχήμα 2.20: Συντελεστής ταχύτητας (f_{speed}) σε συνάρτηση με τη μορφολογία της οδού κυκλοφορίας (προσαρμοσμένο από BML, 1983; σελ. 55)..... | 71 |
| Σχήμα 2.21: Εκτίμηση μέγιστης ταχύτητας φορτηγού οχήματος σε ανώμαλο δρόμο (προσαρμοσμένο από Kühn (1984; σελ. 183))..... | 71 |
| Σχήμα 2.22: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης ταχύτητας του προωθητή Caterpillar 814F2 (Caterpillar 2016; σελ. 22-4)..... | 73 |
| Σχήμα 2.23: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης χρόνου κύκλου προωθητή κατά Hüster (2005)..... | 75 |
| Σχήμα 2.24: Οικονομικά βέλτιστος χρόνος φόρτωσης αποξεστικού οχήματος (προσαρμοσμένο από Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 220))..... | 75 |
| Σχήμα 2.25: Γωνία στροφής εκσκαφέα / φορτωτή σύμφωνα με τον Girmscheidt (2010)..... | 79 |
| Σχήμα 2.26: Συντελεστής γωνίας στροφής (f_{swing}) εκσκαφέα ή φορτωτή κατά BML (1983; σ. 6/17/26)..... | 82 |
| Σχήμα 2.27: Συντελεστής βάθους εκσκαφής (f_{depth}) υδραυλικού εκσκαφέα κατά BML (1983; σελ. 6)..... | 83 |
| Σχήμα 2.28: Βέλτιστο ύψος φόρτωσης (h_{h-opt}) κατά Kühn (1984; σελ. 177)..... | 83 |
| Σχήμα 2.29: Συντελεστής ύψους φόρτωσης (f_{height}) φορτωτή κατά Kühn (1984; σελ. 177)..... | 84 |
| Σχήμα 2.30: Συντελεστής γωνίας στροφής – βάθους εκσκαφής ($f_{swing-depth}$) ή γωνίας στροφής – ύψους εκσκαφής ($f_{swing-height}$)..... | 84 |
| Σχήμα 2.31: Συντελεστής συναρμογής όγκων εκσκαφέα – μεταφορικού οχήματος (f_{vol}^{BML}) (προσαρμοσμένο από BML, 1983; σελ 7.)..... | 86 |

| | |
|--|-----|
| Σχήμα 2.32: Συντελεστής κλίσης εδάφους εργασίας προωθητή | 88 |
| Σχήμα 2.33: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας υδραυλικού εκσκαφέα με ανεστραμμένο κάδο φόρτωσης (προσαρμοσμένο από Fritz, 1970)..... | 95 |
| Σχήμα 2.34: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας υδραυλικού εκσκαφέα με μετωπικό κάδο φόρτωσης (προσαρμοσμένο από Hüster, 2005; σελ. 150)..... | 96 |
| Σχήμα 2.35: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας ελαστικοφόρου φορτωτή (προσαρμοσμένο από Hoffmann, 2006; σελ. 620)..... | 96 |
| Σχήμα 2.36: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας ερπυστριοφόρου φορτωτή (προσαρμοσμένο από Hoffmann, 2006; σελ. 620)..... | 97 |
| Σχήμα 2.37: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας αποξεστικού και φορτωτή (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 79)..... | 97 |
| Σχήμα 2.38: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας μηχανημάτων ισοπέδωσης (προσαρμοσμένο από BML, 1983; σελ. 83) | 98 |
| Σχήμα 2.39: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας ερπυστριοφόρου προωθητή (προσαρμοσμένο από Caterpillar 39 ^η έκδοση, σελ. 1-49)..... | 98 |
| Σχήμα 2.40: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης παραγωγικότητας αντλίας σκυροδέματος (προσαρμοσμένο από Hoffmann (2006; σελ. 593)) | 99 |
| Σχήμα 2.41: Συστημική θεώρηση της κατασκευαστικής διαδικασίας (προσαρμοσμένο από Steinmetzger, 2005) | 103 |
| Σχήμα 2.42: Βασικοί τύποι μοντέλων μάθησης (προσαρμοσμένο από Thomas et. al, 1986)..... | 106 |
| Σχήμα 2.43: Τυπική δομή ενός νευρωνικού δικτύου | 110 |
| Σχήμα 2.44: Χρονική εξέλιξη της ανάπτυξης μοντέλων προσομοίωσης στις κατασκευές..... | 114 |
| Σχήμα 2.45: Συμβατική απεικόνιση ΔΚΔ για μία χωματουργική εργασία (προσαρμοσμένο από Martinez, 2001) | 118 |
| Σχήμα 2.46: Απεικόνιση της διαδικασίας της Σχήματος 2.12 με χρήση στοιχείων μοντελοποίησης EZStrobe (προσαρμοσμένο από Martinez, 2001) | 118 |
| Σχήμα 3.1: Φάσεις της ερευνητικής μεθοδολογίας | 123 |
| Σχήμα 3.2: Ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας για την κατασκευή δαπέδων | 127 |
| Σχήμα 3.3: Ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας για την κατασκευή caisson | 128 |
| Σχήμα 3.4: Δελτίο ημερήσιας καταγραφής παραγωγικότητας για την ολίσθηση του μεταλλότυπου των caisson | 129 |
| Σχήμα 3.5: Ερευνητική μεθοδολογία για την κατάστρωση του στατιστικού μοντέλου..... | 130 |
| Σχήμα 3.6: Ερευνητική μεθοδολογία για την κατάστρωση του μοντέλου νευρωνικών δικτύων..... | 131 |
| Σχήμα 3.7: Ερευνητική μεθοδολογία για την κατάστρωση του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης..... | 133 |
| Σχήμα 4.1: Προτεινόμενη μεθοδολογία για τη συγκριτική αξιολόγηση γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας | 137 |
| Σχήμα 4.2: Προτεινόμενη μεθοδολογία για τη μέτρηση και συγκριτική αξιολόγηση άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας..... | 139 |
| Σχήμα 5.1: Τοποθέτηση caisson για την κατασκευή κρηπιδότοιχου | 148 |
| Σχήμα 5.2: Κύκλος παραγωγής των caisson | 150 |
| Σχήμα 5.3: Διάγραμμα στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης κατασκευής caisson | 153 |
| Σχήμα 5.4: Βασικά συστατικά μέρη του συστήματος <i>CaissonSim</i> | 154 |
| Σχήμα 5.5: Διεπιφάνεια χρήστη στο <i>CaissonSim</i> για τον καθορισμό του μοντέλου..... | 156 |
| Σχήμα 5.6: Καθορισμός μέσων παραγωγής στο <i>CaissonSim</i> | 156 |
| Σχήμα 5.7: Καθορισμός χρονικής διάρκειας δραστηριοτήτων στο <i>CaissonSim</i> | 157 |
| Σχήμα 5.8: Καθορισμός αριθμού συνεργείων στο <i>CaissonSim</i> | 157 |
| Σχήμα 5.9: Καθορισμός κοστολογικών δεδομένων στο <i>CaissonSim</i> | 158 |
| Σχήμα 5.10: Επεξεργαστής μαθηματικών παραστάσεων στο <i>CaissonSim</i> | 158 |
| Σχήμα 5.11: Μενού για τη δημιουργία, το άνοιγμα και την αποθήκευση μοντέλων προσομοίωσης | 159 |
| Σχήμα 5.12: Διεπιφάνεια χρήστη στο <i>CaissonSim</i> για τη δημιουργία συνδυασμών εφαρμογής..... | 160 |
| Σχήμα 5.13: Επιλογή φιλτραρίσματος για τον προσδιορισμό υποσυνόλου συνδυασμών..... | 160 |
| Σχήμα 5.14: Καθορισμός τύπου αναφοράς αποτελεσμάτων προσομοίωσης..... | 162 |
| Σχήμα 5.15: Η βασική αναφορά του <i>CaissonSim</i> | 162 |
| Σχήμα 5.16: Αναλυτικά δεδομένα εξόδου για κάθε επανάληψη της προσομοίωσης..... | 163 |
| Σχήμα 5.17: Η αναφορά πηγαίων δεδομένων του <i>CaissonSim</i> | 163 |

| | |
|---|-----|
| Σχήμα 5.18: Μεθοδολογικό πλαίσιο για την προσομοίωση του φαινομένου της μάθησης | 165 |
| Σχήμα 5.19: Διεπιφάνεια χρήστη για την εισαγωγή δεδομένων μάθησης στο <i>CaissonSim</i> | 166 |
| Σχήμα 6.1: Κανονικοποιημένοι συντελεστές γωνίας στροφής για την BML ($f_{swing,norm}^{BML}$) και την Komatsu ($f_{swing,norm}^{KOM}$) | 171 |
| Σχήμα 6.2: Κανονικοποιημένος συντελεστής βάθους εκσκαφής για την BML ($f_{depth,norm}^{BML}$)..... | 172 |
| Σχήμα 6.3: Παραγωγικότητα ως προς το βάθος εκσκαφής για γωνία στροφής 90°..... | 174 |
| Σχήμα 6.4: Μοναδιαίο κόστος ως προς το βάθος εκσκαφής για γωνία στροφής 90°..... | 174 |
| Σχήμα 6.5: Παραγωγικότητα ως προς την γωνία στροφής για βάθος εκσκαφής 5m..... | 175 |
| Σχήμα 6.6: Μοναδιαίο κόστος ως προς την γωνία στροφής για βάθος εκσκαφής 5m..... | 175 |
| Σχήμα 6.7: Εργασίες και μέσα παραγωγής κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου..... | 178 |
| Σχήμα 6.8: Διαδικασία κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου από οπλισμένο σκυρόδεμα..... | 178 |
| Σχήμα 6.9: Δεδομένα προσαρμογής στατιστικού μοντέλου παραγωγικότητας διάστρωσης σκυροδέματος..... | 182 |
| Σχήμα 6.10: Διάγραμμα εκτίμησης παραγωγικότητας διάστρωσης σκυροδέματος..... | 182 |
| Σχήμα 6.11: Διάγραμμα επικύρωσης στατιστικού μοντέλου | 183 |
| Σχήμα 6.12: Η δομή του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου | 189 |
| Σχήμα 6.13: Διάγραμμα επικύρωσης μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων | 189 |
| Σχήμα 6.14: Συγκριτική αξιολόγηση παραγωγικότητας διάστρωσης σκυροδέματος με χρήση νευρωνικών δικτύων και στατιστικών μοντέλων | 193 |
| Σχήμα 6.15: Παραγωγή caisson σε πλωτή αυτοβυθιζόμενη δεξαμενή με χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου.. | 195 |
| Σχήμα 6.16: Δεδομένα πεδίου για την κατασκευή των caisson | 196 |
| Σχήμα 6.17: Προσδιορισμός παραμέτρων στατιστικής κατανομής μοντέλου προσομοίωσης | 197 |
| Σχήμα 6.18: Πραγματικές εργατοώρες ολίσθησης και αποτελέσματα προσομοίωσης..... | 198 |
| Σχήμα 6.19: Γραφική απεικόνιση ρυθμού ολίσθησης – εργατωρών ολίσθησης..... | 200 |
| Σχήμα 6.20: Προσδιορισμός του 26 ^{ου} caisson ως σημείου τυπικής παραγωγικότητας..... | 204 |
| Σχήμα 6.21:Συσχέτιση ιστορικών δεδομένων παραγωγικότητας για την κατασκευή των caisson..... | 205 |
| Σχήμα 6.22: Μεταβαλλόμενος ρυθμός μάθησης για τη δραστηριότητα «Ολίσθηση – Φάση Α»..... | 206 |
| Σχήμα 6.23: Εκτίμηση της παραγωγικότητας των caisson με χρήση τεχνικών προσομοίωσης..... | 207 |
| Σχήμα 6.24: Εκτίμηση της παραγωγικότητας των caisson με εφαρμογή της στατιστικής ανάλυσης..... | 208 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 2.1: Συγκριτικός πίνακας μοντέλων παραγωγικότητας | 43 |
| Πίνακας 2.2: Κατηγοριοποίηση μηχανικού εξοπλισμού κατά Euroliste (2015) | 48 |
| Πίνακας 2.3: Συντελεστής επιπλήσματος f_s σύμφωνα με το πρότυπο κατάταξης DIN 18300:2012 | 52 |
| Πίνακας 2.4: Συγκριτικός πίνακας μοντέλων παραγωγικότητας | 54 |
| Πίνακας 2.5: Τιμές συντελεστή πλήρωσης (f_{fill}) χωματουργικών μηχανημάτων ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους κατά DIN 18300:2012 | 57 |
| Πίνακας 2.6: Τιμές συντελεστή πλήρωσης (f_{fill}) χωματουργικών μηχανημάτων ανάλογα με τις συνθήκες εργασίας και τον τύπο μηχανήματος | 58 |
| Πίνακας 2.7: Τιμές πρόσθετου χρόνου (Δt) φορτωτή | 65 |
| Πίνακας 2.8: Τιμές χρόνου κύκλου ελαστικοφόρου και ερπυστριοφόρου φορτωτή (σε παρένθεση) κατά Komatsu (2013; σελ. 14A-7) για στατική φόρτωση [min]..... | 66 |
| Πίνακας 2.9: Τιμές μέσης ταχύτητας κίνησης φορτωτή κατά Komatsu (2013; σελ. 14A-8) [min]..... | 66 |
| Πίνακας 2.10: Τιμές μέσης ταχύτητας ($v_{i,full/empty}$) έμφορτου ή άδειου φορτηγού οχήματος (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 93) | 68 |
| Πίνακας 2.11: Χρόνος απόθεσης υλικού (t_{dump}) φορτηγού αυτοκινήτου | 72 |
| Πίνακας 2.12: Χρόνος εναλλαγής φορτηγών στον χώρο φόρτωσης (t_{change})..... | 72 |
| Πίνακας 2.13: Τιμές συντελεστή ταχύτητας προωθητή (f_{speed}) κατά Kühn (1984; σελ. 185) | 74 |
| Πίνακας 2.14: Τιμές χρόνου φόρτωσης σκάφης και απόρριψης υλικού / ελιγμών αποξεστικού κατά Caterpillar (2016; σελ. 24-17)..... | 76 |
| Πίνακας 2.15: Χρόνος απόθεσης υλικού (t_{dump}) αποξεστικού οχήματος (Peurifoy and Schexnayder, 2002; σελ. 221)..... | 77 |
| Πίνακας 2.16: Τιμές ταχύτητας ισοπεδωτή (v_{grader})..... | 78 |
| Πίνακας 2.17: Ενεργό μήκος λεπίδας (L_e)..... | 78 |
| Πίνακας 2.18: Ανάλυση του χρόνου κύκλου ($t_{th,crane}$) [s] οικοδομικού γερανού (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 229)..... | 79 |
| Πίνακας 2.19: Συγκριτική απεικόνιση των συντελεστών παραγωγικότητας (α) ανά μηχανήμα και (β) μέθοδο εκτίμησης παραγωγικότητας..... | 80 |
| Πίνακας 2.20: Τιμές του συντελεστή βάθους εκσκαφής (f_{depth}) υδραυλικού εκσκαφέα κατά Komatsu (2013; σελ. 14A-10)..... | 83 |
| Πίνακας 2.21: Συγκριτική απεικόνιση του συντελεστή εκκένωσης κάδου..... | 85 |
| Πίνακας 2.22: Τιμές συντελεστή φθοράς δοντιών κάδου (f_{wear}^{KT}) (προσαρμοσμένο από Kotte, 1997)..... | 86 |
| Πίνακας 2.23: Τιμές συντελεστή υψομέτρου εργασίας (f_{alt}^{KT}) (προσαρμοσμένο από Kotte, 1997)..... | 86 |
| Πίνακας 2.24: Συντελεστής τύπου κοπτήρα προωθητή (f_{blade})..... | 87 |
| Πίνακας 2.25: Συντελεστής τύπου κοπτήρα προωθητή (f_{blade}) σε σχέση με συνθήκες εργασίας..... | 87 |
| Πίνακας 2.26: Συντελεστής μεθόδου εργασίας (f_{method}) προωθητή (Caterpillar, 2016; σ. 19-55) | 88 |
| Πίνακας 2.27: Συντελεστής κατάστασης χώρου εργασίας ($f_{condition}$) | 89 |
| Πίνακας 2.28: Συντελεστής κατάστασης χώρου εργασίας ($f_{condition}$) (Hoffmann, 2006; σελ. 631)..... | 89 |
| Πίνακας 2.29: Συντελεστής διαθεσιμότητας μηχανήματος (f_{avail}) (Kotte, 1997) | 89 |
| Πίνακας 2.30: Συντελεστής ικανότητας χειριστή (f_{skill}) | 90 |
| Πίνακας 2.31: Συντελεστής ικανότητας χειριστή (f_{skill}) (προσαρμοσμένο από Kühn, 1984)..... | 90 |
| Πίνακας 2.32: Συντελεστής συναρμογής χρόνου κύκλου (f_{match}) (προσαρμοσμένο από BML, 1983; σελ. 57) | 91 |
| Πίνακας 2.33: Συντελεστής πλήρωσης σωλήνα αντλίας (f_{hose}) σκυροδέματος (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 233) | 91 |
| Πίνακας 2.34: Συντελεστής ακρίβειας σκυροδέτησης ($f_{concrete}$) σκυροδέματος (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 234) | 91 |
| Πίνακας 2.35: Συντελεστής εκμετάλλευσης μηχανήματος (f_E) σε συνάρτηση με τις συνθήκες εργασίας | 92 |
| Πίνακας 2.36: Εκτίμηση θεωρητικής παραγωγικότητας προωθητή/αποξεστικού με βάση το εδαφικό υλικό (προσαρμοσμένο από Kühn, 1984; σελ. 186)..... | 98 |

| | |
|---|-----|
| Πίνακας 2.37: Εκτίμηση ωριαίας παραγωγικότητας ισοπεδωτή κατά Girmscheidt (2010; σελ. 80)..... | 99 |
| Πίνακας 2.38: Δραστηριότητες, συνθήκες εκτέλεσης και αποτέλεσμα δραστηριοτήτων του μοντέλου προσομοίωσης χωματουργικών εργασιών (προσαρμοσμένο από Martinez, 2001)..... | 117 |
| Πίνακας 3.1: Εργασίες, συντελεστές παραγωγικότητας και κεφάλαιο αναφοράς | 124 |
| Πίνακας 4.1: Πίνακας κατανομής δεδομένων | 142 |
| Πίνακας 4.2: Πίνακας προσδιορισμού των Δεικτών Βάσης Αναφοράς (ΔΒΑ) | 143 |
| Πίνακας 5.1: Στοιχεία μοντελοποίησης και ερμηνεία τους για το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης κατασκευής caisson | 151 |
| Πίνακας 6.1: Δεδομένα παραγωγικότητας για την εργασία της διάστρωσης σκυροδέματος | 181 |
| Πίνακας 6.2: Πίνακας κατανομής δεδομένων για την παραγωγικότητα διάστρωσης σκυροδέματος..... | 183 |
| Πίνακας 6.3: Εκπαίδευση και έλεγχος νευρωνικού δικτύου για διάστρωση σκυροδέματος | 189 |
| Πίνακας 6.4: Επικύρωση νευρωνικού δικτύου διάστρωσης σκυροδέματος | 191 |
| Πίνακας 6.5: Συγκριτική απεικόνιση των διορθωτικών πολλαπλασιαστών με χρήση νευρωνικού δικτύου και στατιστικού μοντέλου και των απόλυτων τιμών των σφαλμάτων υπολογισμού..... | 192 |
| Πίνακας 6.6: Κατανομές δεδομένων εισόδου για την προσομοίωση κατασκευαστικών δραστηριοτήτων για τα caissons 15 και 16 | 197 |
| Πίνακας 6.7: Προσδιορισμός ρυθμού μάθησης για επί μέρους δραστηριότητες κατασκευής caisson | 202 |
| Πίνακας 6.8: Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο προσομοίωσης φαινομένου μάθησης..... | 202 |
| Πίνακας 6.9: Τιμές του δείκτη E_f για την ανάλυση προσομοίωσης και την στατιστική προσέγγιση | 208 |

Περίληψη

Το αντικείμενο της διατριβής αφορά στη διερεύνηση της παραγωγικότητας για τον προγραμματισμό των έργων πολιτικού μηχανικού με προσδιοριστικές και στοχαστικές μεθόδους. Οι τιμές της παραγωγικότητας προκύπτουν είτε από την προσωπική εμπειρία του κοστολόγου μηχανικού, είτε από εκτιμητικές μεθόδους της σχετικής βιβλιογραφίας, είτε από το ιστορικό αρχείο μίας εταιρείας. Η προσαρμογή της θεωρητικής παραγωγικότητας (Q_{th}) στις συνθήκες του έργου γίνεται μέσα από τη χρήση συντελεστών παραγωγικότητας και των αντίστοιχων διορθωτικών πολλαπλασιαστών τους με σκοπό τον υπολογισμό της αναμενόμενης παραγωγικότητας (Q_{eff}). Οι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές εκφράζουν την επιρροή των λειτουργικών συνθηκών (π.χ. μέθοδος εργασίας) ή άλλων μεταβλητών (π.χ. ρυθμός μάθησης εργασίας) στην παραγωγικότητα που επιτυγχάνεται επί τόπου του έργου και ο ακριβής προσδιορισμός τους έχει απασχολήσει πολλές ερευνητικές προσπάθειες στο παρελθόν.

Η διατριβή συμβάλλει στη θεωρία της Λειτουργικής Ανάλυσης με προσδιοριστικές μεθόδους μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης δεκατεσσάρων (14) γνωστών μεθόδων εκτίμησης παραγωγικότητας, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η αξιοπιστία τους και το πεδίο εφαρμογής των αποτελεσμάτων τους. Ακόμη, διατυπώνεται η έννοια των «συνθηκών βάσης αναφοράς» (ΣΒΑ) που επιτρέπει την στατιστικά έγκυρη «απομόνωση» των συντελεστών παραγωγικότητας που δεν επηρεάζουν την ανάλυση, έτσι ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας. Επιπρόσθετα διατυπώνεται μεθοδολογία για την μέτρηση επί τόπου του έργου των διορθωτικών πολλαπλασιαστών της παραγωγικότητας ανεξάρτητα από τον τύπο των δραστηριοτήτων, το πλήθος των συντελεστών παραγωγικότητας και τη φύση των εργασιών.

Η συμβολή της διατριβής όσον αφορά στη διερεύνηση της παραγωγικότητας με στοχαστικές μεθόδους αφορά στη μελέτη και στην προσομοίωση βασικών κοστολογικών και χρονικών παραμέτρων της διαδικασίας κατασκευής κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson). Αναπτύχθηκε πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης (*CaissonSim*), ενώ αντίστοιχο πλαίσιο προσομοίωσης δεν έχει παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία μέχρι σήμερα. Ακόμη, διερευνήθηκε ο συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα μέσω της εξέλιξης του φαινομένου της μάθησης για την κατασκευή κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα και εφαρμογή της προσομοίωσης για την εκτίμηση της αναμενόμενης παραγωγικότητας. Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε μεταξύ της στατιστικής μεθόδου και της προσομοίωσης. Είναι η πρώτη φορά που πραγματοποιείται μία τέτοια ερευνητική προσπάθεια.

Συμπερασματικά, απότερος σκοπός είναι η δημιουργία ενός ενοποιημένου συστήματος εκτίμησης, παρακολούθησης και αποτίμησης της παραγωγικότητας με τη χρήση όλων των διαθέσιμων τεχνικών ανάλυσης (προσδιοριστικές, στοχαστικές) και με ενσωμάτωση των αλγορίθμων υπολογισμού των μεθόδων παραγωγικότητας, όπως αυτές διατυπώθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής.

Εκτεταμένη Περίληψη

Το αντικείμενο της διατριβής αφορά στη διερεύνηση της παραγωγικότητας για τον προγραμματισμό των έργων πολιτικού μηχανικού με προσδιοριστικές και στοχαστικές μεθόδους. Οι τιμές της παραγωγικότητας προκύπτουν είτε από την προσωπική εμπειρία του κοστολόγου μηχανικού, είτε από εκτιμητικές μεθόδους της σχετικής βιβλιογραφίας, είτε από το ιστορικό αρχείο μίας εταιρείας. Η προσαρμογή της θεωρητικής παραγωγικότητας (Q_{th}) στις συνθήκες του έργου γίνεται μέσα από τη χρήση συντελεστών παραγωγικότητας και των αντίστοιχων διορθωτικών πολλαπλασιαστών τους με σκοπό τον υπολογισμό της αναμενόμενης παραγωγικότητας (Q_{eff}). Οι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές εκφράζουν την επιρροή των λειτουργικών συνθηκών (π.χ. μέθοδος εργασίας) ή άλλων μεταβλητών (π.χ. ρυθμός μάθησης εργασίας) στην παραγωγικότητα που επιτυγχάνεται επί τόπου του έργου και ο ακριβής προσδιορισμός τους έχει απασχολήσει πολλές ερευνητικές προσπάθειες στο παρελθόν.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις καθιστούν την αξιόπιστη εκτίμηση της παραγωγικότητας και των αντίστοιχων συντελεστών παραγωγικότητας ως ένα ανοικτό, ερευνητικά, θέμα για τέσσερις κυρίως λόγους: Πρώτον, δεν έχει διατυπωθεί ένα δομημένο μεθοδολογικό πλαίσιο για την στατιστικά έγκυρη μέτρησή τους. Συνήθως, οι μελέτες παραγωγικότητας γίνονται «ad hoc», δηλ. εξυπηρετούν συγκεκριμένες ανάγκες και η ερευνητική μεθοδολογία που εφαρμόζεται εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του έργου. Ο δεύτερος λόγος αφορά την απουσία ενός μεθοδολογικού πλαισίου για την συγκριτική αξιολόγηση των μετρηθέντων συντελεστών παραγωγικότητας ή συντελεστών παραγωγικότητας γνωστών εκτιμητικών μεθόδων. Το αποτέλεσμα αυτής της έλλειψης είναι η παροχή αποσπασματικών αποτελεσμάτων και ο υπολογισμός τιμών παραγωγικότητας χωρίς να είναι δυνατή η αποτίμηση του εύρους εφαρμογής τους. Ο τρίτος λόγος σχετίζεται με την επιφυλακτικότητα του κλάδου στην υιοθέτηση πιο προχωρημένων αναλυτικών μεθόδων για τον υπολογισμό της παραγωγικότητας, όπως η στοχαστική ανάλυση με τη χρήση προσομοίωσης, παρόλη την γενική παραδοχή πως η προσδιοριστική (ντετερμινιστική) ανάλυση δεν αποτυπώνει τον δυναμικά μεταβαλλόμενο ρυθμό παραγωγικότητας στα σύγχρονα και πολύπλοκα έργα πολιτικού μηχανικού. Ο τέταρτος λόγος αφορά την αδυναμία ενσωμάτωσης σύνθετων συντελεστών παραγωγικότητας στον χρονικό και οικονομικό προγραμματισμό των έργων, με βάση το δυναμικά μεταβαλλόμενο εύρος τιμών τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα, όπως αυτός εκφράζεται μέσω της ικανότητας και της επάρκειας των συνεργείων που απασχολούνται σε δεδομένη δραστηριότητα.

Μέσα σε αυτό το πλαίσιο η διατριβή στοχεύει (α) στην ανάλυση δεκατεσσάρων (14) δημοσιευμένων μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας με σκοπό τη συγκριτική τους αξιολόγηση, (β) στη μέτρηση των συντελεστών παραγωγικότητας με στατιστικά έγκυρο τρόπο σε εργοταξιακές συνθήκες για μετέπειτα χρήση τους στις μεθόδους εκτίμησης της παραγωγικότητας, (γ) στη διατύπωση στοχαστικού μοντέλου για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της επιρροής των συντελεστών παραγωγικότητας με χρήση πρωτότυπου λογισμικού

προσομοίωσης και (δ) στην ενσωμάτωση του ρυθμού μάθησης στο στοχαστικό μοντέλο για την καλύτερη απεικόνιση της επιρροής του ανθρώπινου παράγοντα.

Η ερευνητική συμβολή της διατριβής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο βασικές ερευνητικές περιοχές του χρονικού και οικονομικού προγραμματισμού των τεχνικών έργων:

(α) Η διατύπωση μίας μεθοδολογίας που συσχετίζει με στατιστικά έγκυρο τρόπο διαφορετικές μεθόδους εκτίμησης παραγωγικότητας με βάση τους γνωστούς συντελεστές παραγωγικότητας και συμβάλει στη μέτρηση και τη συγκριτική αξιολόγηση των άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας με χρήση προσδιοριστικών μεθόδων και

(β) Η εφαρμογή της προσομοίωσης, ως στοχαστικής μεθόδου και του αντίστοιχου πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης, σε κατασκευαστικές δραστηριότητες με σκοπό τόσο την αποτίμηση, όσο και την πρόβλεψη της παραγωγικότητας. Για αυτόν τον σκοπό, σχεδιάστηκε, υλοποιήθηκε και αξιολογήθηκε στοχαστικό μοντέλο παραγωγικότητας και αντίστοιχο πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης (*CaissonSim*) που επιτρέπει την στοχαστική ανάλυση της παραγωγικότητας και του κόστους κατασκευής κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson) με τη χρήση προσομοίωσης διακριτών γεγονότων.

Η συμβολή της διατριβής όσον αφορά στην πρώτη ερευνητική περιοχή είναι:

1. Συμβολή στη θεωρία της Λειτουργικής Ανάλυσης μέσω της διατύπωσης μεθοδολογίας για την ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση δεκατεσσάρων (14) γνωστών μεθόδων εκτίμησης παραγωγικότητας, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία τους και το πεδίο εφαρμογής των αποτελεσμάτων τους.
2. Διατύπωση της έννοιας των «συνθηκών βάσης αναφοράς» (ΣΒΑ) που επιτρέπει την στατιστικά έγκυρη «απομόνωση» των συντελεστών παραγωγικότητας που δεν επηρεάζουν την ανάλυση, έτσι ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας.
3. Διατύπωση μεθοδολογίας για την μέτρηση επί τόπου του έργου των διορθωτικών πολλαπλασιαστών της παραγωγικότητας ανεξάρτητα από τον τύπο των δραστηριοτήτων, το πλήθος των συντελεστών παραγωγικότητας και τη φύση των εργασιών.

Η συμβολή της διατριβής όσον αφορά στη δεύτερη ερευνητική περιοχή είναι:

1. Το στοχαστικό μοντέλο απευθύνεται στη μελέτη και στην προσομοίωση βασικών κοστολογικών και χρονικών παραμέτρων της διαδικασίας κατασκευής κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson). Αντίστοιχο πλαίσιο προσομοίωσης δεν έχει παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία μέχρι σήμερα.
2. Οι λειτουργικές μονάδες του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim*, με ιδιαίτερη έμφαση στον γεννήτορα συνδυασμών εφαρμογής, επιτρέπουν την ταυτόχρονη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων υλοποίησης μίας δεδομένης κατασκευαστικής δραστηριότητας.
3. Το σύστημα αναφοράς του *CaissonSim* επιτρέπει την πρόσβαση στο κατώτερο επίπεδο των δεδομένων εξόδου όχι μόνο για ένα πείραμα προσομοίωσης, αλλά για κάθε επανάληψη ξεχωριστά. Με αυτόν τον

τρόπο, ο χρήστης έχει πλήρη έλεγχο της διαδικασίας μοντελοποίησης και μπορεί να αξιολογήσει όλες τις βασικές παραμέτρους που εμπεριέχονται στα μοντέλα της βιβλιοθήκης του *CaissonSim*.

4. Διερεύνηση του συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα μέσω της εξέλιξης του φαινομένου της μάθησης για την κατασκευή κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα και εφαρμογή της προσομοίωσης για την εκτίμηση της αναμενόμενης παραγωγικότητας. Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνεται μεταξύ της στατιστικής μεθόδου και της προσομοίωσης. Είναι η πρώτη φορά που πραγματοποιείται μία τέτοια ερευνητική προσπάθεια.

Συμπερασματικά, απώτερος σκοπός είναι η δημιουργία ενός ενοποιημένου συστήματος εκτίμησης, παρακολούθησης και αποτίμησης της παραγωγικότητας με τη χρήση όλων των διαθέσιμων τεχνικών ανάλυσης (προσδιοριστικές, στοχαστικές) και με ενσωμάτωση των αλγορίθμων υπολογισμού των μεθόδων παραγωγικότητας, όπως αυτές διατυπώθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής. Μία τέτοια προσπάθεια, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μίας πληροφοριακής υποδομής που θα είναι σε θέση να παρέχει πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο και να επικουρεί τα στελέχη διοίκησης ενός έργου στη έγκαιρη και έγκυρη λήψη αποφάσεων.

Extended Abstract

The scheduling and cost management of civil engineering projects requires the realistic determination of the expected productivity for the deployed resources. The productivity values can be derived from the estimator's personal experience, published estimation methods and handbooks or a company's historical record. The transformation of theoretical or expected productivity is accomplished through the use of specific adjustment coefficients or "efficiency multipliers". These adjustment coefficients represent the direct effect of operational conditions (e.g. working method) or specific productivity factors (e.g. learning rate) on the actual or effective productivity achieved on-site and have been the focus of many research efforts in the past. However, the estimation process becomes even more complicated when the activities under study are not associated with any known estimation method. The latter may be the case when activities are executed for the first time or known activities are executed under a new operational framework which diverges from the standard method statement. In these situations the major challenge is for the estimation process to be based on a valid procedural framework that will enable the incorporation of new operational factors which are not known a priori, but rather determined by the estimator.

In view of the aforementioned findings, the reliable estimation of productivity and its respective efficiency multipliers is still an open research area, due to four main reasons: First, there is no structured approach for their estimation. Productivity is often estimated on an ad-hoc basis, depending on the project characteristics and the unique estimation objectives. As a result, the quantitative relationship between the affecting factors and productivity is not well understood. Furthermore, the type and values' range of the efficiency multipliers is associated with the adopted estimation method. However, it has been concluded that many known estimation methods, such as those prescribed by equipment manufacturers (e.g. Caterpillar, Komatsu, Liebherr) are not easily modifiable, since they comprise computational difficulties, while, quite often, the theoretical assumptions of one method contradict the theoretical assumptions of another similar method for a given activity type and resources. In addition, it should be noted that the efficiency multipliers of these productivity estimation methods have been openly criticized for yielding unrealistically optimistic results.

The second challenge relates to the lack of a contextual framework for the comparative evaluation of the derived efficiency multipliers. This has led to the provision of fragmented results and the establishment of production rates which are based on an unknown scope and, hence, are of questionable practical value. Due to their limited reliability, the yielded productivity values are hardly applicable for accurate construction time estimation. In addition, the comparative evaluation of the efficiency multipliers for a specific activity and also across different activities or even projects is hindered, since the estimator is not able to evaluate whether the contextual framework, which the multipliers stem from, is the same. Moreover, exact contextual information is needed by

the estimators, so as to comprehend the conditions under which specific production rates were achieved, and consequently, decide which production data would represent the estimated activities in the most realistic way.

The third challenge reflects the reluctance of the construction industry to adopt more advanced analytical methods for productivity estimation, such as the stochastic analysis with the use of simulation techniques, despite the general consensus indicating that the deterministic analysis fails to grasp the dynamically changing production rate of the contemporary, complex civil engineering projects. This is to be attributed to the fact that, despite its obvious advantages, simulation has been often criticized for being more of a “black art”, which yields misleading or non-applicable results. As such, construction practitioners and the industry at large seem to remain unconvinced of the merits stemming from the application of simulation for modeling and analyzing construction operations. It has been argued that some of the key reasons for doubting the effectiveness of simulation as a decision tool are the failure to adequately demonstrate the effect of critical physical factors that directly affect the system’s performance in a clear and understandable manner, the reporting of simulation models that lack basic information which would enable the repeatability of the experiments for verification purposes and the interpretation of simulation results without delineating the contextual framework within which the study was conducted. The latter is especially important in the project planning phase, since the contextual background of key productivity or cost data determines the scope of their applicability in the estimating process. Understanding and interpreting statistical simulation results which are not explicitly associated with a specific operational setting, especially when the system under study is a complex one, can be a very difficult task.

The fourth reason regards the inability of integrating complex productivity factors in the scheduling and cost management of projects, based on their dynamically changing values range. A characteristic example is the human factor, which expresses the ability and competence of the crews that are deployed for a specific activity. It has been proven that, in the case of complex activities, the human factor reflects the learning rate. However, the learning curves theory is limited to the retrospective evaluation of productivity through the study of historical data for completed activities. Therefore, there is a need to implement stochastic methods, such as simulation, in order to both evaluate historical data, as well as predict the expected on-site productivity.

This thesis’ response to the aforementioned research problems is threefold: First, a methodological framework is introduced that enables the comparative evaluation of fourteen (14) known productivity estimation methods and their respective adjustment coefficients. The suggested framework builds upon the classic operations analysis theory and extends its theoretical fundamentals. It introduces the concept of “baseline reference conditions” for the determination of the operational conditions under which the effect of a specific productivity factor can be neglected. Thus, it allows the transformation of the computational process of a specific productivity estimation method into mathematically equivalent operational scenarios irrespective of the estimation method type. The methodological framework is implemented for the comparative evaluation of earthworks productivity, with a particular focus on the hydraulic excavator.

Secondly, an additional methodological framework is formulated for the comparative evaluation of unknown or not explicitly defined productivity estimation methods, as well as its respective productivity factors, so as to determine the adjustment coefficients and define the baseline reference conditions for each parameter. The suggested framework is implemented for the creation of statistical models and artificial neural network models, whereas its applicability has been evaluated through a case study for the construction of heavy-type, reinforced concrete pavements in a major infrastructure project.

Thirdly, this thesis describes the design, implementation and evaluation of a stochastic productivity model and a respective prototype simulation system named *CaissonSim*, which allows the stochastic analysis of construction productivity and cost for the production of floating caissons through the use of discrete-event simulation techniques. The stochastic model's structure, its main functional characteristics, as well as the results of its case-study implementation in a large-scale marine project are analytically described. The main innovative elements of the stochastic model and the simulation platform is the integrated library of simulation model templates that have not been published before, the ability of simultaneous statistical processing for every possible combination of productivity factors for the operational scenarios under study, as well as the creation of dynamic reports for the simulation experiments providing access to the statistical data of every iteration and system parameter. Finally, *CaissonSim* has been extended, so as to include the integration of the learning rate of every activity contained in the simulation model. *CaissonSim* enables not only the simulation-based assessment but also the prediction of construction productivity as well, which has not been attempted in published literature before.

The research findings are categorized in two main research areas:

- (a) The formulation of a methodological framework which associates, in a statistically valid manner, different productivity estimation methods based on known productivity factors and contributes in the measurement and comparative evaluation of unknown productivity factors with the use of deterministic methods and
- (b) The implementation of discrete-event simulation, as a stochastic method and a prototype simulation platform for the analysis of construction activities which have not been scrutinized before for the assessment and prediction of construction productivity.

The contribution of the thesis in the first research area is summarized below:

1. Contribution to the theory of Operations Analysis through the formulation of a methodology for the analysis and comparative evaluation of known productivity estimation methods, which enables the evaluation of the reliability and applicability scope for the yielded results.
2. The concept of the “baseline reference conditions” has been introduced, which enables the conceptual transformation of any construction scenario to equivalent mathematical models, so as to enable the comparative evaluation of different productivity estimation methods in a statistically valid way.

3. Formulation of a methodology for the on-site measurement of productivity adjustment coefficients irrespective from the activity type, the number of productivity factors and the nature of the works. The only prerequisite is the mathematical formulation of the modeled construction method through the adoption of the factor model.

The contribution of the thesis in the second research area is summarized below:

1. *CaissonSim* simulation system aims at studying and simulating key cost and time parameters for the caissons production process. There has not been any similar simulation framework published in literature.
2. The system's functional modules allow for the concurrent elaboration of alternative construction operations of a given activity by the use of the scenario implementation generator.
3. *CaissonSim*'s reporting modules allow dynamic access to all simulation iterations at the lowest abstraction level. Thus, the user gains full control of the modeling process and may evaluate all basic parameters contained in the simulation models library.
4. The thesis has examined the development of the learning phenomenon for the construction of caissons by assessing and predicting the expected productivity through the implementation of simulation-based analysis. There has not been any similar approach in the past. The comparative evaluation of the research is based both on the statistical and the simulation-based approach.

Conclusively, the overall research purpose is the creation of a unified system for the estimation, monitoring and assessment of construction productivity by the use of all available analysis techniques (deterministic, stochastic) in order to integrate the productivity estimation algorithms, as they were formulated within the framework of the thesis. Such an approach would result in the creation of an information systems infrastructure which will provide real time information and aid construction operatives in the establishment of a reliable and valid decision making environment.

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

1.1. Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η διατύπωση της αναγκαιότητας και των στόχων της διδακτορικής διατριβής. Αναφέρονται οι ορισμοί των βασικών εννοιών που χρησιμοποιούνται, καθώς και οι περιορισμοί αλλά και οι ευνοϊκές συνθήκες της έρευνας. Τέλος, περιγράφεται η δομή των επόμενων κεφαλαίων.

1.2. Εισαγωγή

Ο χρονικός και οικονομικός προγραμματισμός των έργων πολιτικού μηχανικού προϋποθέτει την χρήση αξιόπιστης πληροφορίας όσον αφορά στους ρυθμούς παραγωγικότητας των απασχολούμενων μέσω παραγωγής. Αν και η μελέτη της παραγωγικότητας εντοπίζεται ιστορικά ήδη από το τέλος του 19^{ου} αιώνα, η συστηματική μελέτη της παραγωγικότητας παρουσίασε ραγδαία αύξηση από την δεκαετία του 1970 και μετά. Η τεχνολογική πρόοδος επέτρεψε την εφαρμογή εξειδικευμένων αναλυτικών μεθόδων για την εκτίμηση ή την αποτίμηση της παραγωγικότητας, όπως στατιστικές αναλύσεις, τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης (π.χ. τεχνητά νευρωνικά δίκτυα) και στοχαστικές προσεγγίσεις, όπως η προσομοίωση. Η εκτίμηση της παραγωγικότητας σε κατασκευαστικές δραστηριότητες γίνεται με δύο τρόπους:

1. Με τη χρήση δημοσιευμένων προσδιοριστικών (ντετερμινιστικών) μεθόδων, οι οποίες χρησιμοποιούν εμπειρικά νομογραφήματα και βασίζονται είτε σε κλαδικές μελέτες εθνικών φορέων (π.χ. η μέθοδος BML (1983) στη Γερμανία), είτε στα εγχειρίδια των κατασκευαστών μηχανικού εξοπλισμού (π.χ. Komatsu, Caterpillar, Liebherr), είτε σε επιστημονικές εκδόσεις βιβλίων (π.χ. Bauer, 2007; Garbotz 1966; Girmscheidt, 2010; Hoffmann, 2006; Hüster 2005; Kotte, 1997; Kühn 1984; Nunally 2007; Peurifoy and Schexnayder, 2002).
2. Με τη χρήση αναλυτικών μεθόδων που στηρίζονται στη στοχαστική προσέγγιση (π.χ. προσομοίωση). Βασική προϋπόθεση για τη χρήση αυτών των μεθόδων είναι η ανάπτυξη κατάλληλων μοντέλων, τόσο για την απολογιστική εκτίμηση, όσο και για την πρόβλεψη της παραγωγικότητας.

Οι δημοσιευμένες μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας παρουσιάζουν, όμως, διαφορές όσον αφορά στις θεωρητικές παραδοχές τους. Κάθε μέθοδος καθορίζει έναν συγκεκριμένο αριθμό συντελεστών παραγωγικότητας, δηλ. λειτουργικών παραμέτρων που θεωρείται ότι επηρεάζουν την παραγωγικότητα. Οι συντελεστές έχουν τη μορφή διορθωτικών πολλαπλασιαστών, οι οποίοι προσαρμόζουν την θεωρητική παραγωγικότητα λαμβάνοντας υπόψη τις αναμενόμενες συνθήκες εργασίας σε κάθε περίπτωση. Οι διαφορές εντοπίζονται, τόσο στον τύπο, όσο και στον αριθμό των συντελεστών παραγωγικότητας. Ενδεικτικά, για την εκτίμηση της ωριαίας παραγωγικότητας του υδραυλικού εκσκαφέα, η μέθοδος Kotte (1997) ορίζει εννέα (9) συντελεστές παραγωγικότητας, όπου ένας εκ των οποίων εκφράζει την επιρροή της φθοράς του μηχανήματος

στην ωριαία παραγωγικότητα. Αντίθετα, η μέθοδος Komatsu (2013) καθορίζει δύο συντελεστές παραγωγικότητας, αγνοώντας τη φθορά του μηχανήματος στους υπολογισμούς. Όμως, ακόμη κι αν δύο ή περισσότερες μέθοδοι ταυτίζονται ως προς τον τύπο του συντελεστή παραγωγικότητας (π.χ. οι μέθοδοι Caterpillar, Komatsu και Liebherr θεωρούν από κοινού την ικανότητα του χειριστή βασικό συντελεστή παραγωγικότητας), καθορίζουν διαφορετικό πεδίο τιμών για τους πολλαπλασιαστές που εφαρμόζονται στον υπολογισμό της παραγωγικότητας. Συνεπώς, οι αντικρουόμενες παραδοχές των εμπειρικών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας έχουν ως αποτέλεσμα να μην εξάγονται συγκρίσιμα αποτελέσματα.

Ακόμη, οι δημοσιευμένες μέθοδοι εκτίμησης παραγωγικότητας δεν καθορίζουν το μεθοδολογικό και πειραματικό πλαίσιο που επιτρέπει τον προσδιορισμό των πραγματικών τιμών για κάθε συντελεστή παραγωγικότητας επί τόπου του έργου, οδηγώντας έτσι σε υπερ-αισιόδοξα αποτελέσματα σε σχέση με την πραγματικότητα (Lambropoulos et al., 1996). Επιπρόσθετα, οι γνωστές μέθοδοι καλύπτουν μόνο ένα τμήμα των έργων πολιτικού μηχανικού, με έμφαση στις δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού (π.χ. χωματουργικές εργασίες). Συνεπώς, σε περιπτώσεις όπου εφαρμόζονται προηγμένες κατασκευαστικές μέθοδοι (π.χ. σκυροδέτηση με χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου) οι υπάρχουσες εκτιμητικές μέθοδοι δεν μπορούν να ανταποκριθούν, αφού δεν προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο είναι δυνατή η επέκταση ή η τροποποίησή τους ως προς τον αριθμό και τον τύπο των συντελεστών παραγωγικότητας.

Εξάλλου, η βασική παραδοχή της προσδιοριστικής ανάλυσης πως οι συντελεστές παραγωγικότητας λαμβάνουν συγκεκριμένη και σταθερή τιμή οδηγεί σε αποκλίσεις των εκτιμώμενων τιμών παραγωγικότητας σε σχέση με την πραγματικότητα (O'Connor and Huh, 2006). Άμεσο αποτέλεσμα είναι η αδυναμία εκτίμησης της επιρροής των συντελεστών παραγωγικότητας, οι οποίοι έχουν μεταβαλλόμενη τιμή σε σχέση με τον χρόνο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός τέτοιου συντελεστή είναι ο ανθρώπινος παράγοντας, όπως εκφράζεται μέσω του ρυθμού μάθησης. Γι' αυτό τον λόγο είναι σκόπιμο να διερευνηθεί η ενσωμάτωση του δυναμικά μεταβαλλόμενου συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα σε στοχαστικά μοντέλα εκτίμησης παραγωγικότητας.

Σε αυτό το πλαίσιο, η διατριβή συμβάλει στην ακριβέστερη εκτίμηση της παραγωγικότητας κατασκευαστικών δραστηριοτήτων μέσω της διερεύνησης της σημασίας των συντελεστών (πολλαπλασιαστών) που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της.

1.3. Η αναγκαιότητα της έρευνας

Σε συνέχεια των εισαγωγικών παρατηρήσεων της προηγούμενης παραγράφου, η αναγκαιότητα της έρευνας τεκμηριώνεται από τους λόγους που συνοψίζονται παρακάτω:

1. Η αδυναμία προσδιορισμού αξιόπιστων εκτιμήσεων της παραγωγικότητας λόγω της ανακολουθίας και των αντικρουόμενων παραδοχών των δημοσιευμένων προσδιοριστικών μεθόδων. Ως αποτέλεσμα, ο

- μηχανικός στηρίζεται στην προσωπική του εμπειρία για τον χρονικό και οικονομικό προγραμματισμό μίας δεδομένης δραστηριότητας.
2. Η απουσία μεθοδολογίας ή τεκμηρίωσης για τον τρόπο προσδιορισμού των τιμών των συντελεστών παραγωγικότητας με μετρήσεις επί τόπου του έργου. Οι δημοσιευμένες μέθοδοι δεν αναφέρουν πώς προκύπτουν οι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές των συντελεστών παραγωγικότητας, καθιστώντας μη δυνατή την κριτική αξιολόγησή τους.
 3. Η επιμονή των μηχανικών και της κατασκευαστικής βιομηχανίας στην εφαρμογή προσδιοριστικών μεθόδων για τη Λειτουργική Ανάλυση κατασκευαστικών δραστηριοτήτων. Αν και η προσδιοριστική μέθοδος είναι εύχρηστη, καθώς δίνει άμεσα και γρήγορα εκτιμήσεις για την παραγωγικότητα, εντούτοις παρουσιάζει αδυναμία στην εκτίμηση δυναμικά μεταβαλλόμενων συντελεστών παραγωγικότητας. Η στοχαστική προσέγγιση, με ιδιαίτερη έμφαση στην προσομοίωση, επιτρέπει την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος.
 4. Η παράβλεψη του ανθρώπινου παράγοντα στην εκτίμηση της παραγωγικότητας. Η συμβολή της εμπειρίας του συνεργείου ή του ρυθμού εκμάθησης της εργασίας στην βελτίωση της παραγωγικότητας πολλές φορές αγνοείται με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται σοβαρές αποκλίσεις μεταξύ της εκτιμηθείσας και της πραγματικής παραγωγικότητας.
 5. Η ανάγκη αναθεώρησης των συντελεστών παραγωγικότητας. Η κλασική Λειτουργική Ανάλυση στηρίζεται σε μεθόδους εργασίας που αναφέρονται χρονικά στις δεκαετίες του 1960, 1970 και 1980. Αν και οι βασικές μέθοδοι εκτέλεσης της εργασίας παραμένουν οι ίδιες, δεν μπορεί κάποιος να αγνοεί το γεγονός πως η τεχνολογική εξέλιξη και η εισαγωγή του αυτοματισμού στα μηχανήματα έργων έχουν δημιουργήσει ανάγκες τόσο για καινούριους συντελεστές παραγωγικότητας, όσο και για ριζική αναθεώρηση των ήδη υπαρχόντων, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στα επίπεδα παραγωγικότητας των σύγχρονων εργοταξίων.
 6. Η ανάγκη επέκτασης της χρήσης λογισμικού στην ανάλυση κατασκευαστικών δραστηριοτήτων. Παρόλη την ραγδαία εξέλιξη των Η/Υ τα τελευταία χρόνια, παρατηρείται δυστοκία στην εκμετάλλευση των υπολογιστικών δυνατοτήτων προηγμένων λογισμικών (εμπορικών ή πρωτότυπων) για τον χρονικό και οικονομικό προγραμματισμό των τεχνικών έργων. Ιδιαίτερα για την περίπτωση της προσομοίωσης, έχει ειπωθεί ότι αποτελεί πηγή πολυπλοκότητας, λόγω της χρονοβόρας διαδικασίας κατάστρωσης και επικύρωσης των μοντέλων προσομοίωσης για μία δεδομένη κατασκευαστική δραστηριότητα. Σκοπός της διατριβής είναι να αναδείξει τα οφέλη της προσομοίωσης, τόσο ως μεθόδου ανάλυσης, όσο και ως λογισμικού με φιλικό προς το χρήστη σχεδιασμό για την ακριβέστερη αποτύπωση της παραγωγικότητας σύνθετων δραστηριοτήτων.
 7. Η ανάγκη δημιουργίας συνεργειών μεταξύ της ακαδημαϊκής έρευνας και της κατασκευαστικής βιομηχανίας. Η συνηθέστερη κριτική που ασκείται στην ακαδημαϊκή κοινότητα είναι πως παράγει ερευνητικά αποτελέσματα με αμφισβητήσιμη πρακτική αξία και εφαρμοσιμότητα σε πραγματικά έργα. Γι'αυτό τον λόγο, σκοπός της διατριβής είναι η επικύρωση των ευρημάτων της έρευνας μέσα από

μελέτες περίπτωσης σε πραγματικά τεχνικά έργα μεγάλης κλίμακας και σύνθετου βαθμού πολυπλοκότητας.

1.4. Στόχοι της διατριβής

Οι στόχοι της διατριβής συνοψίζονται ως:

1. Ανάλυση των δημοσιευμένων μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας με σκοπό τη συγκριτική τους αξιολόγηση.
2. Μέτρηση των συντελεστών παραγωγικότητας με στατιστικά έγκυρο τρόπο σε εργοταξιακές συνθήκες για μετέπειτα χρήση τους στις μεθόδους εκτίμησης της παραγωγικότητας.
3. Διατύπωση στοχαστικού μοντέλου για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της επιρροής των συντελεστών παραγωγικότητας με χρήση πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης.
4. Ενσωμάτωση του ρυθμού μάθησης στο στοχαστικό μοντέλο για την καλύτερη απεικόνιση της επιρροής του ανθρώπινου παράγοντα.

1.5. Βασικοί ορισμοί

Σε αυτή την παράγραφο παρατίθενται ορισμοί βασικών εννοιών που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της διατριβής.

| | |
|---|---|
| Σύστημα (system): | Μία συλλογή οντοτήτων (π.χ. ανθρώπων, μηχανημάτων, εξοπλισμού) που δρουν συλλογικά και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με στόχο την επίτευξη ενός κοινού σκοπού. |
| Μοντέλο (model): | Η αναπαράσταση ενός συστήματος. |
| Ομάδα εργασίας (work group): | Το πλήθος και ο τύπος των μέσων παραγωγής (π.χ. μηχανικός εξοπλισμός) που απασχολούνται για την εκτέλεση μίας δραστηριότητας. |
| Παραγωγικότητα (productivity): | Το πηλίκο της παραγωγής (π.χ. κυβικά μέτρα γαιών που μετακινήθηκαν, κυβικά μέτρα σκυροδέματος που διαστρώθηκαν) ανά μονάδα χρόνου εργασίας (π.χ. εργατοώρα) που επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός ή περισσότερων μέσων παραγωγής (π.χ. συνεργείο ή μηχανήμα ή συνδυασμός συνεργείων/μηχανημάτων ή ομάδα εργασίας). |
| Συντελεστής παραγωγικότητας (productivity factor): | Ένας πολλαπλασιαστής που εκφράζει την επιρροή ενός φυσικού μεγέθους (π.χ. βάθος εκσκαφής) ή άλλης παραμέτρου (π.χ. ικανότητα χειριστή μηχανήματος, καιρικές συνθήκες) στην παραγωγικότητα. |
| Προσομοίωση (simulation): | Η διαδικασία σχεδιασμού ενός μοντέλου (σε Η/Υ) που απεικονίζει τη λειτουργία ενός πραγματικού συστήματος. |
| Καμπύλη μάθησης | Η γραφική απεικόνιση του απαιτούμενου αθροιστικού χρόνου (π.χ. |

| | |
|--|---|
| (learning curve): | εργατοώρες) για την παραγωγή μίας ή περισσότερων δομικών μονάδων (π.χ. όροφος) σε συνάρτηση με τον αριθμό των δομικών μονάδων που κατασκευάζονται. |
| Ρυθμός μάθησης (learning rate): | Το ποσοστό μείωσης του απαιτούμενου χρόνου παραγωγής μίας επόμενης δομικής μονάδας σε σχέση με τον χρόνο που απαιτήθηκε για την παραγωγή της αμέσως προηγούμενης δομικής μονάδας. |

1.6. Ευνοϊκές συνθήκες και περιορισμοί διεξαγωγής της έρευνας

Οι βασικότερες ευκαιρίες και οι περιορισμοί της έρευνας αναφέρονται στις επόμενες παραγράφους.

1.6.1. Ευνοϊκές συνθήκες

Οι ευκαιρίες της έρευνας συνοψίζονται παρακάτω:

- ✓ Διαθεσιμότητα συστημάτων προσομοίωσης: Η ανάπτυξη του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης βασίστηκε στη γλώσσα προσομοίωσης STROBOSCOPE και το αντίστοιχο σύστημα προσομοίωσης EZStrobe (Martinez, 2001). Η δομή του ως λογισμικό ανοιχτού κώδικα διευκόλυνε την κατανόηση, αλλά και τον εμπλουτισμό των λειτουργιών και των δυνατοτήτων του στο πλαίσιο της διατριβής.
- ✓ Πλουραλισμός βιβλιογραφικών αναφορών και σχετικών πηγών: Η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η αναζήτηση πληροφοριών δεν περιορίστηκε στη μελέτη αποκλειστικά ακαδημαϊκών πηγών (επιστημονικά άρθρα, πρακτικά συνεδρίων, διατριβές), αλλά επεκτάθηκε στη μελέτη σχετικού ερευνητικού έργου από αναγνωρισμένα ερευνητικά κέντρα ανά τον κόσμο (π.χ. Πανεπιστήμιο Purdue Η.Π.Α., Πανεπιστήμιο Michigan Η.Π.Α., Πανεπιστήμιο Alberta Καναδάς) καθώς και σχετικές αναφορές από μεγάλες εταιρείες του κλάδου (π.χ. Stevens Construction Institute, Η.Π.Α.) και κρατικούς οργανισμούς (π.χ. Zentralverband Dt. Baugewerbe, Γερμανία).
- ✓ Δυνατότητα εφαρμογής και επικύρωσης των ερευνητικών αποτελεσμάτων σε δραστηριότητες τεχνικών έργων μεγάλης κλίμακας: Βασικός συντελεστής της επιτυχούς ολοκλήρωσης της έρευνας αποτέλεσε η δυνατότητα εφαρμογής των αποτελεσμάτων της, σε κάθε στάδιο εξέλιξής της, σε μεγάλο τεχνικό έργο υποδομής προϋπολογισμού άνω των 300.000.000€. Το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του έργου, καθώς και το πλήθος των συνεργείων και του μηχανικού εξοπλισμού αποτέλεσαν ευκαιρία για την επιβεβαίωση, επικύρωση και πρακτική αξιολόγηση, τόσο της μεθοδολογίας εκτίμησης της παραγωγικότητας που αναπτύχθηκε, όσο και του πρωτότυπου συστήματος προσομοίωσης.

1.6.2. Περιορισμοί

Οι περιορισμοί της έρευνας χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες: (α) περιορισμοί που σχετίζονται με την επαγγελματική πρακτική και (β) περιορισμοί που αφορούν στους διαθέσιμους πόρους για την διεξαγωγή της έρευνας.

1.6.2.1. Περιορισμοί που σχετίζονται με την επαγγελματική πρακτική

- Απουσία σαφούς πλαισίου υπολογισμού παραγωγικότητας: Ο χρονικός και οικονομικός προγραμματισμός των τεχνικών έργων πολύ συχνά στηρίζεται σε εμπειρικούς κανόνες υπολογισμού της παραγωγικότητας με βάση την επαγγελματική εμπειρία του κοστολόγου μηχανικού και τους κανόνες της «πράξης», όπως αυτοί έχουν εμπεδωθεί με την πάροδο του χρόνου.
- Διστακτικότητα στην παροχή ιστορικών δεδομένων παραγωγικότητας από τεχνικές εταιρείες: Διοθέντος ότι ο υπολογισμός της παραγωγικότητας αποτελεί βασική παράμετρο για τον προγραμματισμό ενός έργου, η πρόσβαση στη βάση δεδομένων των ιστορικών στοιχείων παραγωγικότητας των τεχνικών εταιρειών ήταν δύσκολη, καθώς αποτελούν ευαίσθητα εταιρικά δεδομένα. Σε όλες τις συμμετέχουσες εταιρείες διασφαλίστηκε η εμπιστευτική διαχείριση των πληροφοριών που παρασχέθηκαν για αποκλειστικά ακαδημαϊκούς σκοπούς.
- Περιορισμός της εμπέδωσης της προσομοίωσης ως εργαλείο χρονικού και οικονομικού προγραμματισμού τεχνικών έργων: Η συνήθης πρακτική για τον προγραμματισμό τεχνικών έργων περιλαμβάνει τη χρήση απλοποιημένων αναλυτικών μεθόδων, όπως η προσδιοριστική λειτουργική ανάλυση. Προχωρημένες τεχνικές όπως η προσομοίωση, αντιμετωπίζονται με επιφυλακτικότητα για δύο λόγους: (α) η διαδικασία ανάπτυξης και επικύρωσης των μοντέλων της προσομοίωσης μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρονοβόρος και (β) απαιτείται ειδική εκπαίδευση του προσωπικού στη χρήση συστημάτων προσομοίωσης και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους. Συνεπώς, έγινε συνειδητή προσπάθεια, για την ανάπτυξη ενός πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης, το οποίο θα περιόριζε στον ελάχιστο δυνατό βαθμό την απαιτούμενη χρονική διάρκεια εξοικείωσης του χρήστη με το σύστημα και τις λειτουργίες του.

1.6.2.2. Περιορισμοί που αφορούν στους διαθέσιμους πόρους

- Περιορισμένο πλήθος δεδομένων πεδίου και στατιστικού δείγματος: Το πλήθος των δεδομένων πεδίου περιορίστηκε από τον χρονικό προγραμματισμό και την αλληλουχία των δραστηριοτήτων του έργου υποδομής που αποτέλεσε την βασική πηγή για τη συλλογή των ιστορικών δεδομένων παραγωγικότητας. Η μελέτη και συλλογή δεδομένων διήρκεσε συνολικά τρία χρόνια (2010-2013) και αφορούσε σε δραστηριότητες που παρουσίαζαν ικανοποιητικό βαθμό πολυπλοκότητας, άρα και ερευνητικό ενδιαφέρον για την εξέτασή τους.
- Βιβλιοθήκη μοντέλων προσομοίωσης: Η βιβλιοθήκη των μοντέλων προσομοίωσης που ενσωματώθηκε στο πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης αφορούσε διαφορετικά σενάρια εκτέλεσης της ίδιας δραστηριότητας. Η βιβλιοθήκη είναι επεκτάσιμη και μπορεί να διαμορφωθεί έτσι ώστε να περιλαμβάνει (α) περισσότερα σενάρια για την ίδια δραστηριότητα, (β) διαφορετικές δραστηριότητες, αλλά απαιτεί επαναπρογραμματισμό των αντίστοιχων λειτουργικών μονάδων.
- Πεδίο εφαρμογής των αποτελεσμάτων: Το πεδίο εφαρμογής των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα μοντέλα παραγωγικότητας που αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο της διατριβής (στατιστική ανάλυση, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης), περιορίζεται από το αντίστοιχο πεδίο τιμών των

δεδομένων εισόδου. Συνεπώς, όσο αυξάνεται το στατιστικό δείγμα, τόσο θα διευρύνεται το αντίστοιχο πεδίο εφαρμογής.

1.7. Δομή της διατριβής

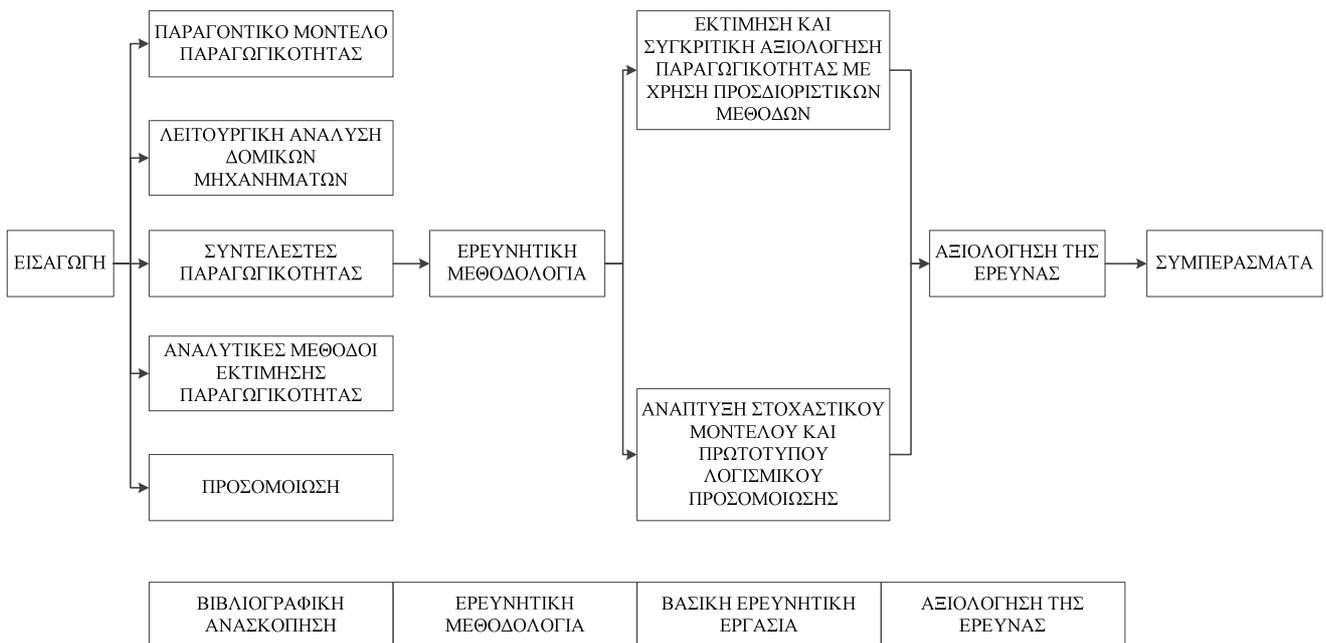
Η δομή της διατριβής αποτυπώνει τη λογική αλληλουχία διερεύνησης του θέματος της διατριβής, όπως περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους (Σχήμα 1.1). Οι επί μέρους ενότητες της διατριβής διαρθρώνονται ως εξής:

- **Κεφάλαιο 1 – Εισαγωγή**: Αποτελεί εισαγωγική ενότητα και περιγράφει τους βασικούς άξονες της διατριβής, όπως το ερευνητικό κίνητρο και τους επί μέρους στόχους που θα επιτευχθούν. Παρατίθενται οι ορισμοί των βασικών εννοιών της διατριβής, προς αποφυγή παρερμηνειών και αναλύονται οι ευκαιρίες, αλλά και οι περιορισμοί της έρευνας.
- **Κεφάλαιο 2 – Βιβλιογραφική ανασκόπηση**: Αποσκοπεί στη διατύπωση του θεωρητικού υπόβαθρου της έρευνας. Συγκρίνονται οι μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας και τεκμηριώνεται η επιλογή του παραγοντικού μοντέλου παραγωγικότητας. Γίνεται επισκόπηση των μεθόδων μέτρησης της παραγωγικότητας και περιγράφονται οι συντελεστές παραγωγικότητας με ιδιαίτερη έμφαση στον συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα, όπως αυτός εκφράζεται από το ρυθμό μάθησης. Τέλος, περιγράφονται οι βασικές αρχές των αναλυτικών μεθόδων που δεν στηρίζονται στην προσδιοριστική προσέγγιση (στατιστικά μοντέλα, μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων), με ιδιαίτερη και αναλυτικότερη αναφορά στην προσομοίωση.
- **Κεφάλαιο 3 – Ερευνητική μεθοδολογία**: Επεξηγεί όλες τις φάσεις της έρευνας και περιγράφει τον σχεδιασμό της έρευνας για την εφαρμογή των μοντέλων παραγωγικότητας.
- **Κεφάλαιο 4 – Εκτίμηση και συγκριτική αξιολόγηση της παραγωγικότητας**: Διατυπώνεται μεθοδολογία για τη συγκριτική αξιολόγηση γνωστών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας και αντίστοιχη μεθοδολογία για την μέτρηση των συντελεστών παραγωγικότητας με στατιστικά έγκυρο τρόπο σε εργοταξιακές συνθήκες με σκοπό τη μετέπειτα χρήση τους στις μεθόδους εκτίμησης της παραγωγικότητας.
- **Κεφάλαιο 5 – Ανάπτυξη στοχαστικού μοντέλου και πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης (CaissonSim)**: Περιγράφει τη διαδικασία ανάπτυξης του στοχαστικού μοντέλου παραγωγικότητας με χρήση τεχνικών προσομοίωσης. Αναλύει τον βασικό αλγόριθμο του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim*, καθώς και τα συστατικά του μέρη: βιβλιοθήκη μοντέλων προσομοίωσης, γεννήτορας των συνδυασμών εφαρμογής, λειτουργική μονάδα προσομοίωσης και λειτουργική μονάδα αναφορών. Τέλος, αναλύει την ενσωμάτωση του ρυθμού μάθησης στο στοχαστικό μοντέλο και στο πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης *CaissonSim*.
- **Κεφάλαιο 6 – Αξιολόγηση της έρευνας**: Η αξιολόγηση της έρευνας αφορά (α) στη μεθοδολογία συγκριτικής ανάλυσης γνωστών μεθόδων παραγωγικότητας με βάση τη προσδιοριστική προσέγγιση μέσα από τη θεωρητική διερεύνηση παραγωγικότητας χωματουργικών εργασιών, (β) στη μεθοδολογία μέτρησης των συντελεστών παραγωγικότητας σε εργοταξιακές συνθήκες μέσα από την ανάπτυξη και σύγκριση ενός

στατιστικού μοντέλου και ενός μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την εκτίμηση της παραγωγικότητας κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου από ινοπλισμένο σκυρόδεμα, (γ) στην αποτίμηση και πρόβλεψη της παραγωγικότητας μέσω της εφαρμογής του στοχαστικού μοντέλου και του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim* για εργασίες κατασκευής κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caissons) με χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου.

- **Κεφάλαιο 7 – Συμπεράσματα:** Συνοψίζει την έρευνα, περιγράφει τα κυριότερα συμπεράσματά της, αναλύει την ερευνητική συμβολή της διατριβής και διατυπώνει προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

Μέρος της εργασίας που παράχθηκε για την ολοκλήρωση της έρευνας είναι, μεν, βασικό για την επίτευξη των στόχων της διατριβής αλλά, ταυτόχρονα, αποτελεί συμπληρωματικό υλικό ως προς το κυρίως ερευνητικό πρόβλημα. Συνεπώς, αυτό το τμήμα της ερευνητικής διαδικασίας κωδικοποιήθηκε και ενσωματώθηκε στα Παραρτήματα της διατριβής. Στο **Παράρτημα Α** παρουσιάζεται ο υπολογισμός της παραγωγικότητας για δεκατέσσερις μεθόδους εκτίμησης παραγωγικότητας και οκτώ (8) μηχανήματα έργου (εκσκαφέας, φορτωτής, φορτηγό αυτοκίνητο οπίσθια ανατροπής, προωθητής, αποξεστικό όχημα (ή χωματοσυλλέκτης), ισοπεδωτής, δομικός πυργογερανός, αντλία σκυροδέματος), ενώ στο **Παράρτημα Β** βρίσκεται το ευρετήριο των βασικότερων όρων της διατριβής.



Σχήμα 1.1: Σχηματική απεικόνιση της δομής της Διδακτορικής Διατριβής

Κεφάλαιο 2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1. Σκοπός

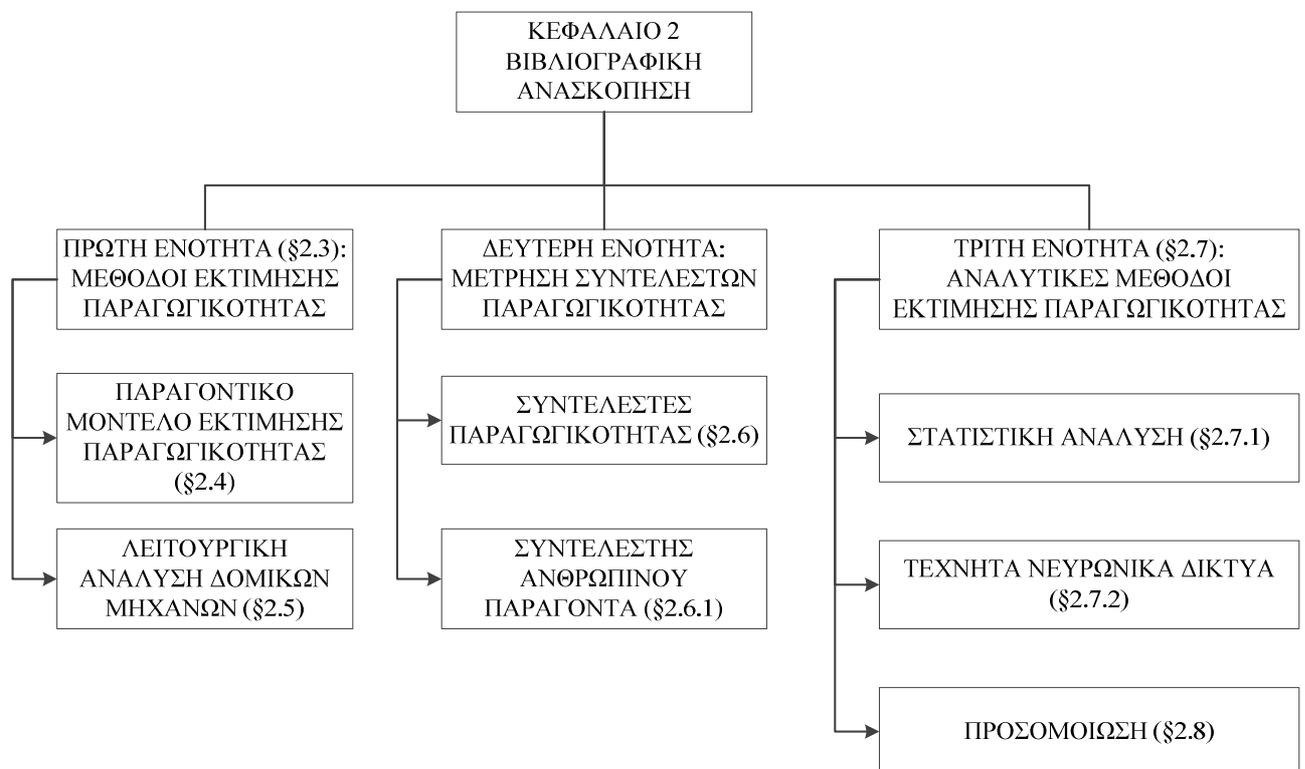
Ο σκοπός του κεφαλαίου είναι η παροχή του θεωρητικού υπόβαθρου της έρευνας και η κριτική μελέτη της βιβλιογραφίας που σχετίζεται με το γνωστικό πεδίο της διδακτορικής διατριβής.

2.2. Εισαγωγή

Η δομή του κεφαλαίου φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Το κεφάλαιο αποτελείται από τρεις κύριες ενότητες:

- i. Η πρώτη εισάγει τις βασικές έννοιες για τον ορισμό της παραγωγικότητας στις κατασκευαστικές δραστηριότητες, περιγράφει το παραγοντικό μοντέλο παραγωγικότητας και αναφέρει τις γνωστές μεθόδους για την μέτρησή της επί τόπου του έργου.
- ii. Η δεύτερη ενότητα εμβαθύνει στους συντελεστές παραγωγικότητας που μελετήθηκαν στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής.
- iii. Τέλος, η τρίτη ενότητα περιγράφει τις αναλυτικές μεθόδους εκτίμησης της παραγωγικότητας που εφαρμόστηκαν στη διατριβή (στατιστική ανάλυση, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, προσομοίωση).

Κάθε ενότητα εμπεριέχει τις αντίστοιχες υπο-ενότητες που καλύπτουν τις θεματικές περιοχές της έρευνας.



Σχήμα 2.1: Σχηματική απεικόνιση της δομής της βιβλιογραφικής ανασκόπησης

2.3. Βασικοί ορισμοί και μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας

Στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής, ως παραγωγικότητα ορίζεται «το πηλίκο της παραγωγής (π.χ. κυβικά μέτρα γαιών που μετακινήθηκαν, κυβικά μέτρα σκυροδέματος που διαστρώθηκαν) ανά μονάδα χρόνου εργασίας (π.χ. εργατοώρα) που επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης ενός ή περισσότερων μέσων παραγωγής (π.χ. συνεργείο ή μηχάνημα ή συνδυασμός συνεργείων / μηχανημάτων)» (§1.4).

Η εκτίμηση της παραγωγικότητας γίνεται μέσω των εξ. 2.1 και 2.2, όπως φαίνεται παρακάτω (AbouRizk et al., 2001; Cottrell, 2006):

$$\text{Παραγωγικότητα} = \frac{\text{Παραγωγή}}{\text{Κόστος μέσων παραγωγής}} \quad (\text{εξ. 2.1})$$

ή εναλλακτικά

$$\text{Παραγωγικότητα} = \frac{\text{Παραγωγή}}{\text{Εργατοώρα}} \quad (\text{εξ. 2.2})$$

Στις παραπάνω σχέσεις η «παραγωγή» αποτιμάται σε συγκεκριμένες, μετρήσιμες μονάδες όπως m^2 , m^3 , kg κ.ο.κ. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο ορισμός της παραγωγικότητας στα έργα πολιτικού μηχανικού δεν είναι μονοσήμαντος, συνεπώς, σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιείται το αντίστροφο κλάσμα της εξ. 2.2 (Hanna et al., 2007; Zhai et al., 2009) (εξ. 2.3):

$$\text{Παραγωγικότητα} = \frac{\text{Κόστος μέσων παραγωγής ή εργατοώρα}}{\text{Παραγωγή}} \quad (\text{εξ. 2.3})$$

Στη διεθνή βιβλιογραφία έχει επικρατήσει η ακόλουθη σύμβαση: σε δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού (equipment-intensive) η παραγωγικότητα ορίζεται σύμφωνα με την εξ. 2.2 (π.χ. παραγωγικότητα εκσκαφέα μετρούμενη σε m^3/h), ενώ σε δραστηριότητες έντασης εργασίας (labour-intensive) εφαρμόζεται η εξ. 2.3 (π.χ. παραγωγικότητα συνεργείου διάστρωσης σκυροδέματος μετρούμενη σε wh/m^3).

Μία σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό της παραγωγικότητας είναι η χρονική περίοδος αναφοράς (Hanna et al., 2008). Πιο συγκεκριμένα, όταν η παραγωγικότητα μετράται σε σχέση με ένα μεγάλο χρονικό διάστημα (π.χ. επίπεδο μήνα, τριμήνου ή και έτους), τότε χαρακτηρίζεται ως «μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα» (long-term productivity). Η μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα ονομάζεται και «αθροιστικός ή απολογιστικός ρυθμός παραγωγής» (cumulative production rate) (Thomas and Zavrski, 1999). Αντίθετα, για μικρότερα χρονικά διαστήματα αναφοράς (π.χ. εβδομάδα, ημέρα, ώρα ή λεπτά) αποκαλείται «βραχυπρόθεσμη παραγωγικότητα» (short-term productivity) (Thomas et al., 1999). Αντίστοιχα, η βραχυπρόθεσμη παραγωγικότητα ονομάζεται εναλλακτικά «μοναδιαίος ρυθμός παραγωγής» (unit production rate ή unit rate).

Συνεπώς, στο πλαίσιο της διατριβής, όταν χρησιμοποιείται ο όρος «παραγωγικότητα» εννοείται η βραχυπρόθεσμη παραγωγικότητα, δηλ. ο μοναδιαίος ρυθμός παραγωγής στο επίπεδο της δραστηριότητας. Σε αυτό το επίπεδο, η παραγωγικότητα μετράται για κάθε μέσο παραγωγής (π.χ. συνεργείο σκυροδέτησης, εκσκαφέας) ή ομάδες μέσων παραγωγής (π.χ. σύστημα εκσκαφέα-φορητού οχήματος για δραστηριότητες μεταφοράς γαιών, συνεργεία τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού-ξύλοτύπου-σκυροδέτησης για δραστηριότητες σκυροδέτησης) με βάση τις ώρες εργασίας του μηχανικού εξοπλισμού ή τις εργατοώρες του εργατικού προσωπικού αντίστοιχα (Cheng et al., 2013; Crawford and Vogl, 2006).

2.3.1. Μαθηματικά μοντέλα εκτίμησης παραγωγικότητας

Μετά τον ορισμό της παραγωγικότητας, θα πρέπει να προσδιοριστεί ο τρόπος με τον οποίο θα μελετηθεί η επίδρασή της στον χρονικό και οικονομικό προγραμματισμό ενός τεχνικού έργου. Οι μελέτες παραγωγικότητας στηρίζονται σε δύο βασικά μεγέθη (ISO 9245:1991, Thomas and Sacarkan, 1994; Thomas and Yiakoumis, 1987; Thomas et al., 1990):

| <i>Ονομασία</i> | <i>Συμβολισμός</i> | <i>Περιγραφή</i> |
|----------------------------|--------------------|---|
| Θεωρητική παραγωγικότητα | Q_{th} | Η μέγιστη τιμή της παραγωγικότητας για μία συγκεκριμένη δραστηριότητα. |
| Αναμενόμενη παραγωγικότητα | Q_{eff} | Η μέση τιμή της παραγωγικότητας που αναμένεται να επιτευχθεί κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της δραστηριότητας στις πραγματικές συνθήκες του έργου. |

Η αναμενόμενη παραγωγικότητα ενσωματώνει την επιρροή των συντελεστών παραγωγικότητας, δηλ. εκφράζει την προσαρμογή της θεωρητικής παραγωγικότητας στις πραγματικές συνθήκες του έργου. Συνεπώς, η βασική μαθηματική σχέση για την εκτίμηση της παραγωγικότητας φαίνεται στην εξ. 2.4:

$$Q_{eff} = Q_{th} \times f_x \quad (\text{εξ. 2.4})$$

όπου f_x = πολλαπλασιαστής που εκφράζει αθροιστικά την επιρροή των συντελεστών παραγωγικότητας, Q_{eff} = η αναμενόμενη παραγωγικότητα, Q_{th} = η θεωρητική ή ιδανική παραγωγικότητα.

Η γενική θεώρηση της βιβλιογραφίας φέρει την θεωρητική παραγωγικότητα ως τη βέλτιστη δυνατή τιμή της παραγωγικότητας. Συνεπώς, ο πολλαπλασιαστής f_x θεωρείται ότι λειτουργεί απομειωτικά, δηλ. χειροτερεύει και δεν βελτιώνει την παραγωγικότητα. Σε αυτό το πλαίσιο η αναμενόμενη παραγωγικότητα είναι μικρότερη από την θεωρητική. Η μαθηματική έκφραση της προηγούμενης διαπίστωσης απεικονίζεται παρακάτω:

| | | |
|--------------------------------------|---|--|
| Δραστηριότητες έντασης εργασίας | $Παραγωγικότητα = \frac{Εργατοώρα}{Παραγωγή}$ | $Q_{eff} > Q_{th} \rightarrow f_x > 1$ |
| Δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού | $Παραγωγικότητα = \frac{Παραγωγή}{Εργατοώρα}$ | $Q_{eff} < Q_{th} \rightarrow f_x < 1$ |

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θεώρηση του πολλαπλασιαστή f_x ως αυστηρά μειωτικού έχει αμφισβητηθεί έντονα σε πρόσφατες μελέτες, όπως αυτή του Park (2006). Υπάρχουν περιπτώσεις όπου ο διορθωτικός πολλαπλασιαστής εκφράζει ποιοτικούς ή ποσοτικούς συντελεστές παραγωγικότητας (π.χ. διοικητική επάρκεια, γωνία στροφής εκσκαφέα μικρότερη από 90° μοίρες), οι οποίοι διαπιστώθηκε ότι βελτίωσαν περαιτέρω την θεωρητική παραγωγικότητα.

Σε κάθε περίπτωση, ο γενικός διορθωτικός πολλαπλασιαστής (correction coefficient) ή συντελεστής προσαρμογής (adjustment coefficient) f_x μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω σε επιμέρους πολλαπλασιαστές, οι οποίοι εκφράζουν την επιρροή συντελεστών παραγωγικότητας, όπως οι καιρικές συνθήκες, οι λειτουργικές συνθήκες, η μέθοδος εκτέλεσης της εργασίας, η ικανότητα του εργατοτεχνικού προσωπικού κ.ά. (AbouRizk et al., 2001). Η ανάλυση γίνεται στη βάση κάποιου μοντέλου παραγωγικότητας (productivity model). Η βιβλιογραφία αναφέρει δύο βασικά μοντέλα παραγωγικότητας: το πολλαπλασιαστικό ή παραγοντικό μοντέλο (factor-based model) και το αθροιστικό μοντέλο (εναλλακτικά ονομάζεται και μοντέλο μελέτης εργασίας – work study model).

Σύμφωνα με το παραγοντικό μοντέλο η εξ. 2.4 τροποποιείται ως εξής (εξ. 2.5):

$$Q_{eff} = Q_{th} \times \prod_{x=1}^n f_x = Q_{th} \times (f_1 \times f_2 \times \dots \times f_n) \quad (\text{εξ. 2.5})$$

όπου n = ο αριθμός των επιμέρους συντελεστών παραγωγικότητας που λαμβάνονται υπόψη στη μελέτη.

Η ονομασία του μοντέλου προέρχεται από το γεγονός πως οι συντελεστές f_x επιδρούν πολλαπλασιαστικά στην παραγωγικότητα. Οι Thomas et al. (1989) ισχυρίζονται ότι με αυτόν τον τρόπο γίνεται μία πιο ρεαλιστική απεικόνιση της πραγματικότητας, αφού λαμβάνεται υπόψη η στοχαστικότητα των συντελεστών παραγωγικότητας. Με άλλα λόγια η παραγωγικότητα μπορεί να επηρεαστεί, είτε από το σύνολο των συντελεστών παραγωγικότητας (δηλ. f_1 ως και f_n), είτε από ένα υπο-σύνολό τους, με τυχαίο τρόπο και συνδυασμούς κάθε φορά.

Σύμφωνα με το αθροιστικό μοντέλο η εξ. 2.4 τροποποιείται ως εξής (εξ. 2.6 και εξ. 2.7):

$$\begin{aligned}
 \text{Δραστηριότητες} & Q_{eff} = Q_{th} \times (I \pm f_1 \pm f_2 \pm \dots \pm f_n) \\
 \text{έντασης εργασίας} & = \frac{t_{th}}{V_{th}} \times (I \pm f_1 \pm f_2 \pm \dots \pm f_n)
 \end{aligned}
 \tag{εξ. 2.6}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Δραστηριότητες} & Q_{eff} = Q_{th} \times (I \pm f_1 \pm f_2 \pm \dots \pm f_n)^{-1} \\
 \text{έντασης εξοπλισμού} & = \frac{V_{th}}{t_{th}} \times (I \pm f_1 \pm f_2 \pm \dots \pm f_n)^{-1}
 \end{aligned}
 \tag{εξ. 2.7}$$

όπου t_{th} = ο χρόνος απασχόλησης μετρούμενος συνήθως σε ώρες ή λεπτά, V_{th} = η παραγωγή μέσα στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα απασχόλησης

Σε αντιστοιχία με πριν, η ονομασία του μοντέλου προέρχεται από το γεγονός πως οι συντελεστές f_x επιδρούν αθροιστικά στην παραγωγικότητα. Η βασική θεωρητική παραδοχή του μοντέλου είναι ότι οι συντελεστές παραγωγικότητας επηρεάζουν (δηλ. «διορθώνουν») τον διαθέσιμο χρόνο απασχόλησης των μέσων παραγωγής (συνεργεία ή μηχανήματα) (Hüster, 2005; Riediger and Steinmetzger, 2000). Με άλλα λόγια, η αυξομείωση των σταλιών ή καθυστερήσεων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των δραστηριοτήτων αυξομειώνει αντίστοιχα τον χρόνο απασχόλησης και, κατά συνέπεια, την αναμενόμενη παραγωγικότητα.

2.3.2. Αξιολόγηση και επιλογή μοντέλου παραγωγικότητας

Η συγκριτική αξιολόγηση των μοντέλων παραγωγικότητας φαίνεται στον Πίνακα 2.1. Τα κριτήρια της σύγκρισης σχετίζονται με τους χρησιμοποιούμενους δείκτες μέτρησης, το επίπεδο της ανάλυσης, την θεώρηση των μέσων παραγωγής, την ενσωμάτωση συντελεστών παραγωγικότητας στην ανάλυση, την μαθηματική τεκμηρίωση και τον τύπο των συστημάτων που μπορούν να μελετηθούν με την εφαρμογή τους.

Πίνακας 2.1: Συγκριτικός πίνακας μοντέλων παραγωγικότητας

| Κριτήρια σύγκρισης | Αθροιστικό μοντέλο | Πολλαπλασιαστικό / Παραγοντικό μοντέλο |
|------------------------------------|--|--|
| Δείκτης μέτρησης | Χρόνος εκτέλεσης εργασίας | Παραγωγικότητα (Εργατοώρες / Παραγωγή) |
| Επίπεδο ανάλυσης | Δραστηριότητα | Δραστηριότητα |
| Μέσα παραγωγής | Μέλος συνεργείου / Εργάτης | Συνεργείο / Ομάδα μηχανημάτων |
| Μελέτη συντελεστών παραγωγικότητας | Όχι | Ναι |
| Μαθηματική τεκμηρίωση | Αναλογική συσχέτιση παραγωγικού χρόνου και σταλίας | Μη αναλογική συσχέτιση παραγωγικότητας και διορθωτικών πολλαπλασιαστών |
| Τύπος συστημάτων | Μη σύνθετα, σταθερά συστήματα | Σύνθετα, δυναμικά μεταβαλλόμενα συστήματα |

Τα αθροιστικό μοντέλο στηρίζεται σε τρεις θεμελιώδεις παραδοχές, οι οποίες συνοψίζονται παρακάτω:

1. Θεωρείται ότι υπάρχει συσχέτιση του παραγωγικού χρόνου και των σταλιών. Συνεπώς, η μείωση του χρόνου σταλίας θα αυξήσει την παραγωγικότητα.
2. Θεωρείται ότι υπάρχει γραμμική συσχέτιση του παραγωγικού χρόνου με την παραγωγή και την παραγωγικότητα. Εάν είναι γνωστός ο παραγωγικός χρόνος, θα είναι δυνατή η εκτίμηση της παραγωγικότητας.
3. Θεωρείται ότι υπάρχει συσχέτιση του χρόνου αναμονής με την παραγωγικότητα. Μείωση του χρόνου αναμονής συνεπάγεται βελτίωση της παραγωγικότητας.

Οι παραπάνω παραδοχές δεν ικανοποιούνται πάντα στη μελέτη των δυναμικά μεταβαλλόμενων κατασκευαστικών συστημάτων, έχοντας ως συνέπεια τον περιορισμό της εφαρμοσιμότητας του αθροιστικού μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα, το αθροιστικό μοντέλο δεν είναι εύκολο να εφαρμοστεί σε δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού ή εργασίας, όπου η ημερήσια ή ωριαία παραγωγικότητα παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις. Ακόμη, το αθροιστικό μοντέλο προϋποθέτει την γραμμική συσχέτιση του παραγωγικού χρόνου με την παραγωγικότητα. Μία τέτοια παραδοχή θα ίσχυε μόνο εάν η παραγωγικότητα παρέμενε σταθερή κατά τη διάρκεια του παραγωγικού χρόνου. Όμως, κάτι τέτοιο διαψεύδεται από σειρά μελετών σε οικοδομικές δραστηριότητες (π.χ. κατασκευή τοιχοποιίας, τοποθέτηση πλακιδίων, εγκατάστασης σωληνώσεων) (Thomas et al., 1990). Άλλωστε, οι σταλίες είναι στοχαστικά μεγέθη και οφείλονται σε πολλούς και μη ελεγχόμενους παράγοντες. Παρομοίως, αν και το αθροιστικό μοντέλο θεωρεί ότι η μείωση των σταλιών θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του διαθέσιμου χρόνου απασχόλησης, οι Thomas et al. (1990) διαπίστωσαν από την μελέτη της κατασκευής τριάντα πυρηνικών σταθμών ότι δεν υπήρχε στατιστικά σημαντική συσχέτιση μεταξύ αυτών των μεγεθών. Ακόμη, το αθροιστικό μοντέλο επικεντρώνεται κυρίως στη μελέτη του εργάτη ως μονάδα εργασίας και όχι του συνεργείου, γεγονός που επηρεάζει την αξιοπιστία της μελέτης.

Γενικότερα, το αθροιστικό μοντέλο αποσκοπά στον προσδιορισμό του τυπικού χρόνου εκτέλεσης μίας δραστηριότητας και στον καθορισμό της πιο αποδοτικής μεθόδου εργασίας. Η αξιοπιστία του στηρίζεται στη συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων και στον υπολογισμό μέσω των τιμών παραγωγικότητας. Όμως, δεν προσδιορίζονται οι αιτίες της διακύμανσης της παραγωγικότητας μεταξύ διαφορετικών δραστηριοτήτων ή ακόμη και της ίδιας δραστηριότητας μετρούμενης σε διακριτές χρονικές περιόδους. Αντίθετα, ο υπολογισμός μέσω των τιμών ουσιαστικά αποσκοπά στην εξομάλυνση τέτοιων διαφοροποιήσεων στην παραγωγικότητα. Ακόμη, το αθροιστικό μοντέλο εφαρμόζεται κυρίως σε δραστηριότητες έντασης εργασίας και όχι έντασης εξοπλισμού, εκτός και αν το σύστημα είναι πάρα πολύ απλό (π.χ. συνδυασμός εκσκαφέα – φορτηγού οχήματος), κάτι το οποίο όμως δεν συναντάται πλέον συχνά στα σύγχρονα εργοτάξια. Επίσης, δοθέντος ότι το αθροιστικό μοντέλο δίνει έμφαση στον εργάτη και όχι στο συνεργείο ως μονάδα αναφοράς για την μέτρηση της παραγωγικότητας, συνεπάγεται ότι η στατιστική εγκυρότητα της μελέτης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υποκειμενική γνώμη και ερμηνευτική ικανότητα του παρατηρητή.

Αντίθετα, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.1, τα βασικά χαρακτηριστικά του παραγοντικού μοντέλου παραγωγικότητας συνοψίζονται παρακάτω:

1. Το παραγοντικό μοντέλο αποτιμά την παραγωγικότητα ως συνάρτηση της παραγωγής και όχι του χρόνου εργασίας, όπως στο αθροιστικό μοντέλο.
2. Το συνεργείο (αποτελούμενο από εργάτες ή μηχανήματα ή συνδυασμό και των δύο) αποτελεί την βάση αναφοράς για την αποτίμηση της παραγωγικότητας.
3. Το παραγοντικό μοντέλο περιλαμβάνει τους κυριότερους συντελεστές που επηρεάζουν την παραγωγικότητα.
4. Η δομή και μαθηματική διατύπωση του παραγοντικού μοντέλου έχει βασιστεί στην μελέτη κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, ενώ το αθροιστικό μοντέλο προέρχεται από την βιομηχανία και εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο των μελετών εργονομίας.
5. Η μη αναλογική συσχέτιση της παραγωγικότητας και των συντελεστών παραγωγικότητας επιτρέπουν τη μελέτη σύνθετων και δυναμικά μεταβαλλόμενων συστημάτων. Επίσης, καθιστούν δυνατή την εφαρμογή σύνθετων αναλυτικών μεθόδων για την ανάλυση μίας δραστηριότητας ή ενός συνόλου δραστηριοτήτων του έργου, όπως θα περιγραφεί λεπτομερώς στην παράγραφο §2.7.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, το παραγοντικό μοντέλο θεωρείται καταλληλότερο για την εξυπηρέτηση του ερευνητικού σκοπού και γι' αυτό αποφασίστηκε να υιοθετηθεί στο πλαίσιο της διατριβής.

2.4. Παραγοντικό μοντέλο παραγωγικότητας

Το παραγοντικό μοντέλο αποτελεί τη βάση ερμηνείας της συντριπτικής πλειοψηφίας των μελετών παραγωγικότητας (Cottrell, 2006; Dunlop and Smith, 2004; Edwards and Holt, 2000; Enshassi et al., 2007; Hanna et al., 1999a/b, 2002, 2005, 2007, 2008) στον κατασκευαστικό κλάδο. Σε συνέχεια της εξ. 2.5, η εφαρμογή του παραγοντικού μοντέλου έχει γίνει σε δύο μορφές: (α) ως μοντέλο έντασης εργασίας (labour-intensive model) και (β) ως μοντέλο έντασης εξοπλισμού (equipment-intensive model). Η πρώτη μορφή αφορά κυρίως σε δραστηριότητες όπου ο ανθρώπινος παράγοντας αποτελεί το κύριο μέσο παραγωγής, δηλ. η δραστηριότητα εκτελείται κυρίως με τη συμμετοχή συνεργείων εργατών (π.χ. τοποθέτηση σιδηρού οπλισμού). Αντίστοιχα, η δεύτερη μορφή σχετίζεται με δραστηριότητες όπου ο μηχανικός εξοπλισμός διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στην εκτέλεση των δραστηριοτήτων (π.χ. εκσκαφή γαιών με χρήση υδραυλικού εκσκαφέα). Οι δύο τύποι παραγοντικών μοντέλων αναλύονται στην επόμενη παράγραφο.

2.4.1. Παραγοντικό μοντέλο έντασης εργασίας

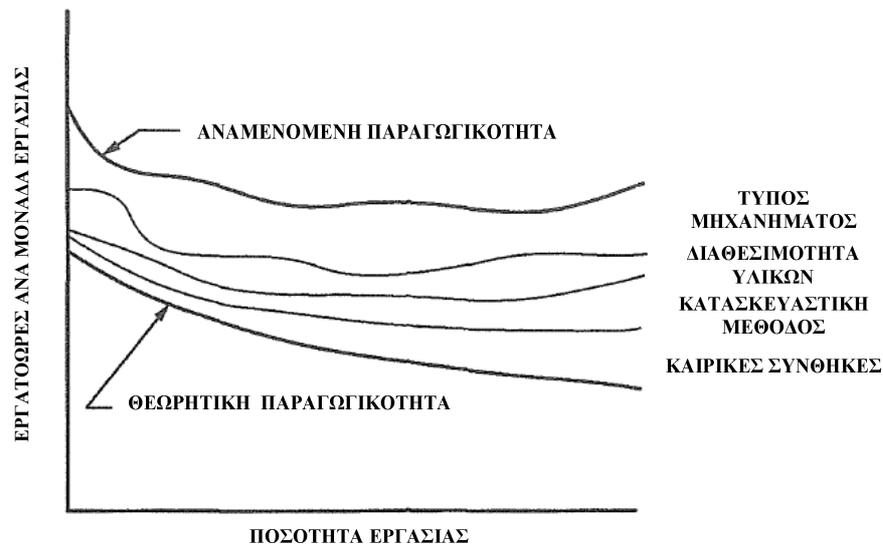
Η γενική μαθηματική διατύπωση του παραγοντικού μοντέλου παραγωγικότητας της εξ. 2.5 εξειδικεύεται για την παραγωγικότητα δραστηριοτήτων έντασης εργασίας μετρούμενη σε εργατοώρες ανά μονάδα παραγωγής, όπως φαίνεται στην εξ. 2.8 (Thomas and Sacarkan, 1994; Thomas et al., 1990):

$$Q_{eff} = Q_{th}(q) \times \prod_{x=1}^n f_x + \sum_{j=1}^m f(y)_j \quad (\text{εξ. 2.8})$$

όπου: Q_{eff} = η αναμενόμενη παραγωγικότητα μετρούμενη σε εργατοώρες ανά μονάδα παραγωγής, $Q_{th}(q)$ = η θεωρητική ή ιδανική παραγωγικότητα μετρούμενη στις ίδιες μονάδες με την αναμενόμενη, q = ποσότητα που έχει παραχθεί, f_x = πολλαπλασιαστής που εκφράζει την επιρροή των συντελεστών παραγωγικότητας, n = πλήθος συντελεστών παραγωγικότητας, $f(y)$ = η συνολική επίδραση των συντελεστών παραγωγικότητας που αποτιμάται ως σταθερός όρος στο μοντέλο, m = πλήθος υπο-μοντέλων λοιπών συντελεστών παραγωγικότητας.

Ουσιαστικά, το παραγοντικό μοντέλο υποδηλώνει ότι η αναμενόμενη παραγωγικότητα προκύπτει από μία θεωρητική τιμή, η οποία εκφράζει την ιδανική παραγωγικότητα, προσθέτοντας στη συνέχεια την διαφορά που προκύπτει από την επιρροή των συντελεστών παραγωγικότητας. Το μοντέλο υποδεικνύει ότι η επιρροή ενός συντελεστή παραγωγικότητας μπορεί να είναι θετική (βελτίωση της παραγωγικότητας και μείωση της αναμενόμενης τιμής), είτε αρνητική (άρα οδηγεί σε αύξηση της αναμενόμενης τιμής της παραγωγικότητας). Επίσης, δεν είναι απαραίτητο να λαμβάνονται υπόψη όλοι οι πιθανοί συντελεστές παραγωγικότητας, αλλά μόνο όσοι πραγματικά ενδιαφέρουν την ανάλυση και είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση της επιρροής τους. Για τους υπόλοιπους συντελεστές αρκεί να ληφθεί υπόψη η επιρροή τους συνολικά, όπως υποδηλώνεται από τον τελευταίο προσθετέο της εξ. 2.8. Τέλος, η μεταβλητή q , υποδηλώνει την επιρροή της επαναληψιμότητας στην βελτίωση της θεωρητικής παραγωγικότητας, ως αποτέλεσμα του φαινομένου της μάθησης (learning phenomenon). Με άλλα λόγια, σε επαναληπτικά έργα η θεωρητική παραγωγικότητα βελτιώνεται (μειώνεται) όσο αυξάνεται η ποσότητα του φυσικού αντικείμενου (π.χ. όροφοι πολυκατοικίας, χιλιόμετρα οδοποιίας κ.ο.κ.), ως αποτέλεσμα της ενεργοποίησης του φαινομένου της μάθησης.

Η γραφική απεικόνιση του παραγοντικού μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Στο κατώτερο μέρος του γραφήματος φαίνεται η θεωρητική παραγωγικότητα, η οποία βαίνει μειούμενη ως συνάρτηση της ποσότητας εργασίας. Η αναμενόμενη παραγωγικότητα προκύπτει από την γραφηματική υπέρθεση της επιρροής των διαφόρων συντελεστών παραγωγικότητας (π.χ. καιρικές συνθήκες, κατασκευαστική μέθοδος, διαθεσιμότητα υλικών, τύπος μηχανήματος).



Σχήμα 2.2: Γραφική απεικόνιση του παραγοντικού μοντέλου παραγωγικότητας (Thomas et. al, 1990)

2.4.2. Παραγοντικό μοντέλο έντασης εξοπλισμού

Το παραγοντικό μοντέλο έντασης εξοπλισμού εφαρμόζεται σε μελέτες Λειτουργικής Ανάλυσης. Στόχος της Λειτουργικής Ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός των μέσων παραγωγής και των αντίστοιχων συντελεστών παραγωγικότητας που μεγιστοποιούν την παραγωγικότητα μέσα στους δεδομένους περιορισμούς κόστους και χρόνου.

Η συνηθέστερη περίπτωση εφαρμογής του παραγοντικού μοντέλου έντασης εξοπλισμού αφορά στις μηχανές κυκλικής λειτουργίας (intermittent cycle equipment) (Coutermarsch, 2007; Graham and Smith, 2004; Hegab and Smith, 2007; Kannan and Vorster, 2000; Hong et al., 2002; Lee et al., 2003, 2007). Ο μηχανικός εξοπλισμός αυτού του τύπου χαρακτηρίζεται από επαναληψιμότητα στην εκτέλεση των δραστηριοτήτων. Συνεπώς, το χαρακτηριστικό μέγεθος υπολογισμού της παραγωγικότητας είναι ο χρόνος κύκλου, δηλ. ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση μίας επανάληψης (Bauer, 2007; BGL, 2015; Edwards and Holt, 2009; Nicholls and Day, 2004). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα μοντέλα έντασης εξοπλισμού η παραγωγικότητα συνήθως μετράται σε ποσότητα παραγωγής ανά μονάδα χρόνου (π.χ. κυβικά μέτρα γαιών ανά ώρα).

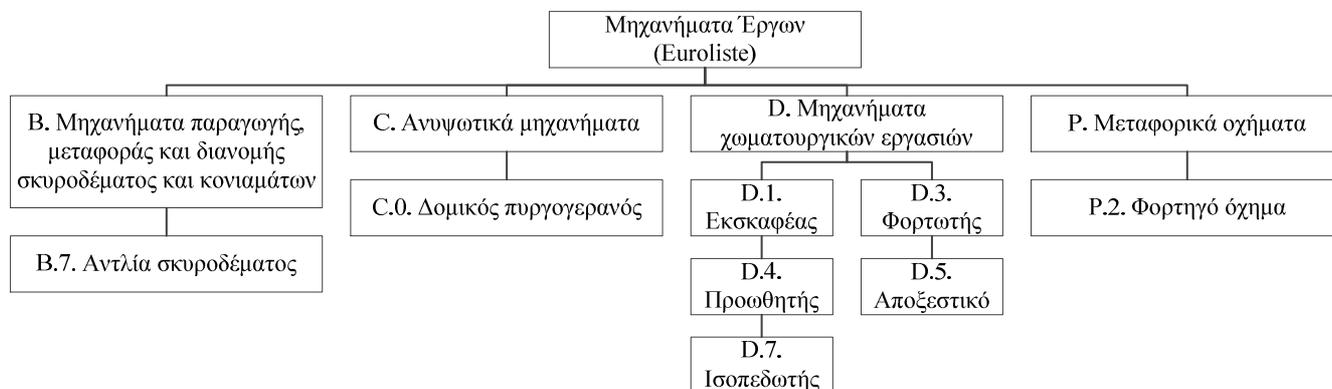
2.4.3. Μηχανικός εξοπλισμός τεχνικών έργων

Ο μηχανικός εξοπλισμός των τεχνικών έργων κατηγοριοποιείται σύμφωνα με την Euroliste (2015), που αποτελεί εξέλιξη της κλασικής Baugeräteliste (BGL, 2015). Η Euroliste (2015) περιλαμβάνει 22 κατηγορίες μηχανημάτων, όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 2.2 παρακάτω.

Πίνακας 2.2: Κατηγοριοποίηση μηχανικού εξοπλισμού κατά Euroliste (2015)

| Κωδικός Euroliste | Περιγραφή κατηγορίας | Περιγραφή κατηγορίας (Γερμανικά) |
|----------------------|--|--|
| A | Μηχανήματα παραγωγής και επεξεργασίας αδρανών υλικών | Geräte zur Materialaufbereitung |
| B | Μηχανήματα παραγωγής, μεταφοράς και διανομής σκυροδέματος και κονιαμάτων | Geräte zur Herstellung, zum Transport und zur Verteilung von Beton, Mörtel und Putz |
| C | Ανυψωτικά μηχανήματα | Hebezeuge |
| D | Μηχανήματα χωματοσυγκολλητών εργασιών (εκσκαφή, μεταφορά, συμπύκνωση) | Geräte für Erdbewegung und Bodenverdichtung |
| E | Μηχανήματα κατασκευής οδοστρωμάτων | Straßenbaugeräte |
| F | Μηχανήματα σιδηροδρομικής επιδομής | Gleisoberbaugeräte |
| G | Πλωτά μηχανήματα | Schwimmende Geräte |
| H | Μηχανήματα σηράγγων και υπογείων έργων | Geräte für Tunnel- und Stollenbau |
| J | Εξοπλισμός έμπηξης – εξόλκωσης πασσάλων – Εξοπλισμός ενεματώσεων | Ramm- und Ziehgeräte, Geräte für Injektionsarbeiten |
| K | Διατρητικά μηχανήματα, μηχανήματα διαφραγματικών τοίχων | Bohrgeräte, Schlitzwandgeräte |
| L | Εξοπλισμός προώθησης σωλήνων (pipe jacking) | Geräte für horizontalen Rohrvortrieb und Pipelinebau |
| M | Εξοπλισμός και μέσα απορρύπανσης και προστασίας περιβάλλοντος | Geräte und Anlagen zur Dekontamination und zum Umweltschutz |
| P | Μεταφορικά οχήματα | Transportfahrzeuge |
| Q | Μηχανήματα και εργαλεία πεπιεσμένου αέρα | Druckluftgeräte, Druckluftwerkzeuge |
| R | Εξοπλισμός παραγωγής, μετασχηματισμού και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας | Geräte zur Energieerzeugung, Energieumwandlung und Energieverteilung |
| S | Υδραυλικά έμβολα και συστήματα | Hydraulikzylinder und Hydraulikaggregate |
| T | Φυγοκεντρικές και εμβολοφόροι αντλίες και σωληνώσεις | Kreisel- und Kolbenpumpen, Rohrleitungen |
| U | Καλούπια και ικριώματα | Schalungen und Rüstungen |
| V | Λοιπά μηχανήματα και εξοπλισμός | Sonstige Geräte und Maschinen |
| W | Μηχανήματα και εξοπλισμός μηχανουργείου | Maschinen und Geräte für Werkstattbetrieb |
| X | Εργοταξιακά οικήματα και αποθήκες | Baustellenunterkünfte, Container |
| Y | Εργαστηριακά και τοπογραφικά όργανα, μηχανές γραφείου, εξοπλισμός επικοινωνιών | Vermessungsgeräte, Laborgeräte, Büromaschinen, Kommunikationsgeräte und Überwachungsgeräte |

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάζονται τα παρακάτω μηχανήματα, ως προς τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά και τον τρόπο εκτίμησης της παραγωγικότητας (Σχήμα 2.3). Αναλυτική περιγραφή των λειτουργικών χαρακτηριστικών κάθε μηχανήματος δίνεται από τον Εφραιμίδη (2002).



Σχήμα 2.3: Μηχανήματα που εξετάζονται στο παρόν κεφάλαιο

2.5. Λειτουργική ανάλυση δομικών μηχανών

Χωματουργικά μηχανήματα: Η παραγωγικότητα των μηχανημάτων έργου που απασχολούνται σε εργασίες μετακίνησης εδαφικού υλικού (π.χ. φόρτωση, μεταφορά και απόθεση προϊόντων εκσκαφής) εξαρτάται από (α) τον **όγκο του εδαφικού υλικού (V)** που δύναται να μετακινήσει το μηχάνημα σε δεδομένο χρόνο, (β) τον **χρόνο κύκλου του μηχανήματος (t_{th})** και (γ) τους **συντελεστές παραγωγικότητας (f_x)** για κάθε μηχάνημα και τύπο δραστηριότητας.

Ο όγκος του εδαφικού υλικού συναρτάται με:

- τα χαρακτηριστικά του εδαφικού υλικού, όπως εκφράζονται από τον **συντελεστή επιπλήσματος (f_s)**,
- την **ονομαστική χωρητικότητα του κάδου του μηχανήματος (V_{rated})** (π.χ. εκσκαφέας, φορτωτής, φορτηγό όχημα, αποξεστικό, προωθητής) και
- τον **συντελεστή πλήρωσης του κάδου (f_{fill})**.

Η γενικευμένη σχέση υπολογισμού της παραγωγικότητας χωματουργικών μηχανημάτων είναι (εξ. 2.9):

$$Q_{eff} = 3600 \times \frac{V}{t_{th}} \times \prod_{x=1}^n f_x, \quad (\text{εξ. 2.9})$$

$$\text{με } V = V_{rated} \times f_s \times f_{fill}$$

Μηχανήματα ανύψωσης: Η παραγωγικότητα του δομικού πυργογερανού εξαρτάται από (α) το **μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος του φορτίου (m_{max})**, (β) το **βάρος του εξοπλισμού ανύψωσης (m_0)**, (γ) τον **χρόνο κύκλου (t_{th})** και (δ) τους **συντελεστές παραγωγικότητας (f_x)**.

Η γενικευμένη σχέση υπολογισμού της παραγωγικότητας του δομικού πυργογερανού είναι (εξ. 2.10):

$$Q_{eff} = 3600 \times \frac{m_{max} - m_0}{t_{th,crane}} \times \prod_{x=1}^n f_x, \quad (\text{εξ. 2.10})$$

Μηχανήματα διανομής σκυροδέματος: Η παραγωγικότητα της αντλίας σκυροδέματος εξαρτάται από (α) την ισχύ της αντλίας (P), (β) την πίεση του σκυροδέματος στον σωλήνα της αντλίας (p) και (γ) τους συντελεστές παραγωγικότητας (f_x).

Η γενικευμένη σχέση υπολογισμού της παραγωγικότητας της αντλίας σκυροδέματος είναι (εξ. 2.11):

$$P = \frac{Q_{eff} \times p}{25} \quad (\text{εξ. 2.11})$$

$$\text{με } Q_{eff} = Q_{th} \times \prod_{x=1}^n f_x$$

Ο καθορισμός των βασικών μεγεθών των εξ. 2.9-2.11 καθώς και ο αριθμός των συντελεστών παραγωγικότητας f_x που λαμβάνονται υπόψη διαφοροποιούνται ανάλογα με τη μέθοδο εκτίμησης της παραγωγικότητας. Συνολικά, μελετήθηκαν δεκατέσσερις (14) μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας μηχανικού εξοπλισμού. Οι μέθοδοι προέρχονται από:

- i. Εγχειρίδια κατασκευαστών μηχανικού εξοπλισμού (Caterpillar, 2016; Komatsu, 2013; Liebherr, 2003),
- ii. Διδακτικά βιβλία (Nunally, 2007; Peurifoy and Schexnayder, 2002),
- iii. Εκδόσεις φορέων του κατασκευαστικού κλάδου στη Γερμανία (BML, 1983), καθώς και από πρωτογενή μελέτη της Γερμανικής βιβλιογραφίας σε θέματα λειτουργικής ανάλυσης (Bauer, 2007; Garbotz, 1966; Girmscheidt, 2010; Hoffmann, 2006; Hüster, 2005; Kotte, 1997; Kühn, 1984),
- iv. Σχετικές δημοσιεύσεις σε επιστημονικά περιοδικά (Edwards and Holt, 2000).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος BML (1983; 3^η έκδοση) είναι η πιο διαδεδομένη, όσον αφορά στη λειτουργική ανάλυση δραστηριοτήτων έντασης εξοπλισμού (Εφραιμίδης, 2002; Κοπανέζου και Λαμπρόπουλος, 1988; Λαμπρόπουλος, 1991; Lambropoulos and Manolopoulos, 1990). Διατυπώθηκε στην Γερμανία από την κοινή επιτροπή του Κεντρικού Συνδέσμου των Γερμανικών Τεχνικών Εταιρειών (“Zentralverband des Deutschen Baugewerbes”) και της Ομοσπονδίας της Γερμανικής Κατασκευαστικής Βιομηχανίας (“Hauptverband der Deutschen Bauindustrie”).

Στις επόμενες παραγράφους επεξηγείται συνοπτικά ο τρόπος προσδιορισμού των παραμέτρων των εξ. 2.9-2.11 για τις κατηγορίες των μηχανημάτων του Σχήματος 2.3 με την εξής σειρά: (i) χωματουργικά μηχανήματα

(κατηγορία D και P), (ii) μηχανήματα ανύψωσης (κατηγορία C) και (iii) μηχανήματα διανομής σκυροδέματος (κατηγορία B).

2.5.1. Συντελεστής επιπλήσματος (f_s)

Ο συντελεστής επιπλήσματος (swell factor – f_s) εκφράζει τη διαφορά ανάμεσα στον συμπαγή και τον χαλαρό όγκο υλικού συγκεκριμένου βάρους. Ο όγκος του υλικού στη φυσική αδιατάρακτη θέση του ονομάζεται συμπαγής όγκος (bank volume – V_{bank}). Ο όγκος του υλικού που έχει εξορυχθεί από την αδιατάρακτη θέση του είναι μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο συμπαγή και ονομάζεται χαλαρός όγκος (loose volume – V_{loose}). Γι' αυτό το λόγο στη Γερμανική βιβλιογραφία ο συντελεστής επιπλήσματος αναφέρεται και ως «συντελεστής χαλάρωσης» (Auflockerungsfaktor / Lösefaktor). Ο όγκος του υλικού εκφράζεται από το ειδικό βάρος ή/και το φαινόμενο βάρος. Το φαινόμενο βάρος εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη και την ομοιομορφία των κόκκων του εδάφους. Για τον υπολογισμό του συντελεστή επιπλήσματος προσδιορίζεται το πηλίκο του ειδικού ή φαινόμενου βάρους του εδάφους αρχικά στη φυσική του θέση (γ_{bank}) και στη συνέχεια μετά από την εκσκαφή (γ_{loose}). Η διαφορά του όγκου εκφράζεται, είτε ως συντελεστής επιπλήσματος, είτε ως «επίπλησμα» (s), όπου μετράται ποσοστιαία.

Ο συντελεστής επιπλήσματος υπολογίζεται, είτε σύμφωνα με το πρότυπο DIN 24095:1983 ($f_s < 1$) (BML, 1983), είτε σύμφωνα με το πρότυπο ISO 9245:1991 ($f_s > 1$) (ISO, 1991), που το έχει αντικαταστήσει (Hüster, 2005; Hoffmann, 2006; Nunally, 2007). Ο προσδιορισμός του επιπλήσματος μπορεί να γίνει εμπειρικά από σχετικούς πίνακες, αλλά θα πρέπει να επαληθεύεται και πειραματικά επί τόπου του έργου. Ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή επιπλήσματος γίνεται με μέτρηση του φαινόμενου βάρους του εδάφους αρχικά στη φυσική του θέση και μετά από την εκσκαφή σύμφωνα με την προδιαγραφή E 105-86/ΦΕΚ 955/31-12-86.

| | DIN ISO 9245:1991 | DIN 24095:1983 |
|-----------------------------|--|--|
| Συντελεστής επιπλήσματος | $f_s = \frac{\gamma_{bank}}{\gamma_{loose}} > 1$ [για m ³ χαλαρού όγκου] | $f_s = \frac{\gamma_{loose}}{\gamma_{bank}} < 1$ [για m ³ συμπαγούς όγκου] |
| Επίπλησμα (%) | $s (\%) = \left(\frac{\gamma_{bank}}{\gamma_{loose}} - 1 \right) \times 100$ | |

Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή επιπλήσματος εμπεριέχονται στον παρακάτω Πίνακα 2.3 και αποτελούν τις προσεγγιστικές τιμές όλων των μεθοδολογιών που εξετάστηκαν για κάθε τύπο εδαφικού υλικού σύμφωνα με το πρότυπο κατάταξης DIN 18300:2012.

Πίνακας 2.3: Συντελεστής επιπλήσματος f_s σύμφωνα με το πρότυπο κατάταξης DIN 18300:2012

| Κατηγορία εκσκαψιμότητας Περιγραφή εδάφους | Ενδεικτική φωτογραφία | Φάση μέτρησης | Φαιν. βάρος γ [kg/m ³] | Συντελεστής επιπλ. f_s |
|--|---|--------------------|--|-----------------------------|
| Ανώτερο στρώμα του εδάφους, το οποίο περιέχει ανόργανα συστατικά (αργιλώδεις χάλικες, άμμους και ιλεις) αλλά και οργανικές προσμίξεις (βλάστηση και ρίζες) |  | Χαλαρό | 950 | 1,00 |
| | | Ημίσκληρο | 1130 | 1,19 |
| | | Συμπαγές | 1370 | 1,45 |
| 2. Υδαρές έδαφος | | | | |
| Εδάφη που είναι ρευστά ή υδαρή και η συμπεριφορά τους προσδιορίζεται από την περιεκτικότητα σε νερό. |  | Δεν ορίζεται | | |
| 3. Εδάφη με μεγάλη εκσκαψιμότητα | | | | |
| Μη συνεκτικές έως ελάχιστα συνεκτικές άμμοι, χάλικες και αμμοχάλικα με περιεκτικότητα έως 15% σε ιλεις και άργιλο (διάμετρος κόκκων <0.06mm) και με περιεκτικότητα έως 30% σε χάλικες (διάμετρος κόκκων > 63mm και όγκος < 0.01 m ³) |  | Χαλαρό / μαλακό | 1510 | 1,00 |
| | | Ημίσκληρο | 1720 | 1,14 |
| | | Συμπαγές | 1860 | 1,23 |
| Οργανικά εδάφη με μικρή περιεκτικότητα σε νερό (π.χ. λασπώδες έδαφος) |  | Χαλαρό | 950 | 1,00 |
| | | Ημίσκληρο | 1130 | 1,19 |
| | | Συμπαγές | 1370 | 1,45 |
| 4. Εδάφη με μεσαία εκσκαψιμότητα | | | | |
| Προσμίξεις από άμμο, χάλικες, ιλεις και άργιλο με περιεκτικότητα μεγαλύτερη από 15% και διάμετρο κόκκων μικρότερη από 0.06mm |  | Χαλαρό | 1340 | 1,00 |
| | | Ημίσκληρο | 1700 | 1,27 |
| | | Συμπαγές | 1920 | 1,43 |
| Συνεκτικά εδάφη με μικρή έως μεσαία πλαστιμότητα, σε πλάστιμη έως ημιστερεή κατάσταση (ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας) και με περιεκτικότητα έως 30% σε χάλικες (διάμετρος > 63mm και όγκος < 0.01 m ³) |  | Χαλαρό | 1470 | 1,00 |
| | | Ημίσκληρο | 1750 | 1,19 |
| | | Συμπαγές | 1840 | 1,25 |
| 5. Εδάφη με μικρή εκσκαψιμότητα | | | | |
| Εδάφη της κατηγορίας 3 & 4, με περιεκτικότητα >30% σε χάλικες διαμέτρου >63mm και όγκου <0.01 m ³ και μη-συνεκτικά ή συνεκτικά εδάφη με <30% περιεκτικότητα σε χάλικες όγκου 0.01 m ³ < V < 0.1 m ³ |  | Χαλαρό | 1450 | 1,00 |
| | | Ημίσκληρο | 1730 | 1,19 |
| | | Συμπαγές | 2110 | 1,45 |
| Άργιλος μεγάλης πλαστιμότητας, σε πλάστιμη ή ημιστερεή κατάσταση (ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας) |  | Χαλαρό | 1660 | 1,00 |
| | | Ημίσκληρο | 1870 | 1,12 |
| | | Συμπαγές | 2020 | 1,22 |
| 6. Βραχώμαζα με μεγάλη εκσκαψιμότητα | | | | |
| Βραχώμαζα, ισχυρά κερματισμένη ή εδάφη συνεκτικά/μη-συνεκτικά ισχυρά συμπυκνωμένα |  | Χαλαρό | 1550 | 1,00 |
| | | Συμπαγές | 2600 | 1,67 |
| Συνεκτικά / μη-συνεκτικά εδάφη με >30% περιεκτικότητα σε χάλικες με όγκο 0.01 m ³ < V < 0.1 m ³ |  | Χαλαρό | 1700 | 1,00 |
| | | Συμπαγές | 2260 | 1,33 |
| 7. Βραχώμαζα με μικρή εκσκαψιμότητα | | | | |
| Βραχώμαζα με ισχυρή συνοχή, ελαφρώς κερματισμένη ή πολύ ισχυρά συμπυκνωμένα εδάφη. Περιεκτικότητα σε χάλικες < 0.1 m ³ |  | Για κάθε κατάσταση | ≥2260 | 1,33 έως 2,00 |

2.5.2. Ονομαστική χωρητικότητα κάδου χωματουργικού μηχανήματος (V_{rated})

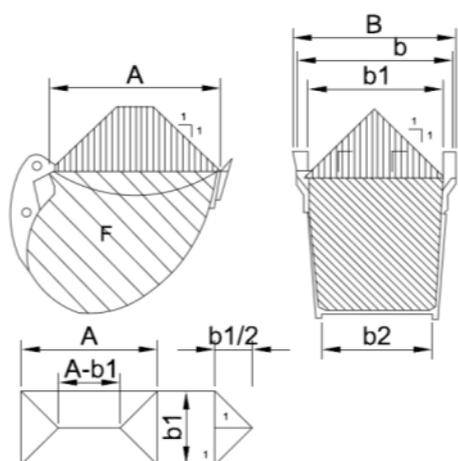
Η ονομαστική χωρητικότητα λαμβάνει υπόψη της μια σώρευση του υλικού με συγκεκριμένη κλίση από τα ανώτατα άκρα των χειλέων του κάδου και εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κάδου και την κοκκομετρική διαβάθμιση του εδαφικού υλικού. Συχνά, η ονομαστική χωρητικότητα (ή χωρητικότητα υπερπλήρωσης – heaped capacity) συγκρίνεται με τη γεωμετρική χωρητικότητα (struck capacity), η οποία εκφράζει τον όγκο που ορίζεται γεωμετρικά από τα χείλη του κάδου και το επίπεδο που ορίζεται από τα άνω άκρα των χειλέων του κάδου (Nunally, 2007). Η μέτρηση της ονομαστικής χωρητικότητας βασίζεται στην απόθεση του υλικού με μία κλίση που καθορίζεται από συγκεκριμένα πρότυπα (CECE, 1973; SAE 1993) και διαφοροποιείται για κάθε έναν από τους πέντε τύπους μηχανήματος (εκσκαφέας, φορτωτής, φορτηγό όχημα, προωθητής, αποξεστικό).

I. Εκσκαφέας

Οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Κατασκευών και Εξοπλισμού (Committee on European Construction and Equipment – CECE) προσδιορίζουν τον όγκο του εκσκαφέα θεωρώντας ότι η απόθεση του υλικού γίνεται υπό κλίση 1:2 (CECE, 1973), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Αν και το πρότυπο CECE θεωρείται ξεπερασμένο (Girmscheidt, 2010), χρησιμοποιείται από συγγραφείς που ανέπτυξαν μεθόδους υπολογισμού της παραγωγικότητας υδραυλικού εκσκαφέα κατά τη δεκαετία του '70 και του '80 κυρίως στη Γερμανία (Kiehl, 1973; BML, 1983; Kühn, 1984; Liebherr, 2003) (εξ. 2.13). Σήμερα, συνήθως χρησιμοποιείται το πρότυπο της Αμερικανικής Κοινότητας Μηχανικών Οχημάτων (Society of Automotive Engineers) (SAE, 1993) που καθορίζει γωνία απόθεσης σε κλίση 1:1 (Σχήμα 2.4) (εξ. 2.12). Παράλληλα με το SAE χρησιμοποιείται και το πρότυπο PCSA (1983) καθώς και τα πρότυπα ISO 7451:2007 / ISO 7546:1983, που καθορίζουν την ίδια γωνία απόθεσης και τρόπο υπολογισμού της ονομαστικής χωρητικότητας. Οι εξισώσεις 2.12. και 2.13 προκύπτουν ως εξής: Ο πρώτος όρος της εξίσωσης υπολογίζει την γεωμετρική χωρητικότητα και είναι κοινός και για τα δύο πρότυπα. Ο δεύτερος και ο τρίτος όρος της εξίσωσης υπολογίζουν την χωρητικότητα υπερπλήρωσης και διαφοροποιούνται με βάση την γωνία απόθεσης του υλικού. Οι μέθοδοι παραγωγικότητας που εξετάστηκαν, είτε χρησιμοποιούν κάποιο συγκεκριμένο πρότυπο, είτε εφαρμόζουν περισσότερα του ενός πρότυπα και αφήνουν την τελική επιλογή στον μηχανικό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.4 παρακάτω. Γενικά ισχύει ότι: $V_{SAE} \approx [1,10 - 1,20] \times V_{CECE} [m^3]$.

II. Φορτωτής

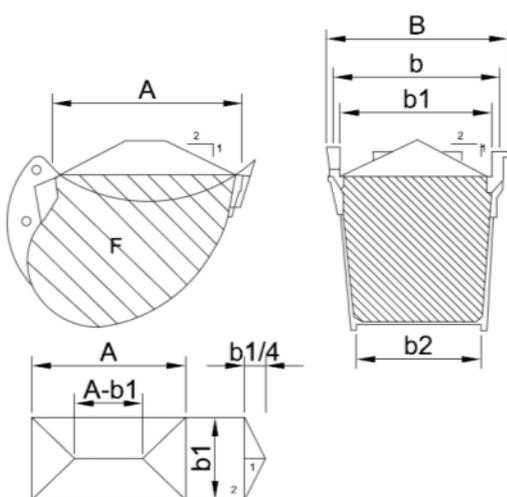
Η ονομαστική χωρητικότητα του κάδου του φορτωτή προσδιορίζεται τόσο από το πρότυπο SAE (1985a), όσο και από το πρότυπο CECE (1972) για κλίση απόθεσης υλικού ίση με 1:2, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.6 (εξ. 2.14). Ο πρώτος όρος της εξίσωσης 2.14 υπολογίζει τη γεωμετρική χωρητικότητα του κάδου και οι υπόλοιποι όροι της εξίσωσης υπολογίζουν την χωρητικότητα υπερπλήρωσης.



- A Μήκος κάδου
- B Πλάτος κοπής
- b Πλάτος κάδου
- b₁ Εσωτερικό πλάτος στο δόντι
- b₂ Εσωτερικό πλάτος στη βάση
- F Επιφάνεια
- V_{SAE} Χωρητικότητα κάδου

$$V_{SAE} = F \times \frac{b_1 + b_2}{2} + \frac{A \times b_1^2}{4} - \frac{b_1^3}{12} \quad (\text{εξ. 2.12})$$

Σχήμα 2.4: Όγκος ανεστραμμένου κάδου εκσκαφέα σύμφωνα με το πρότυπο SAE J296-JUN293 (SAE, 1993)



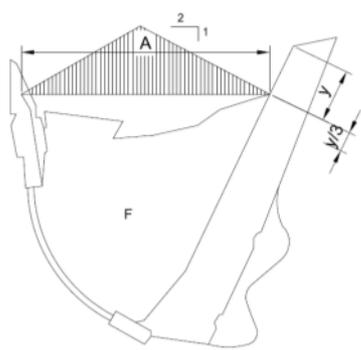
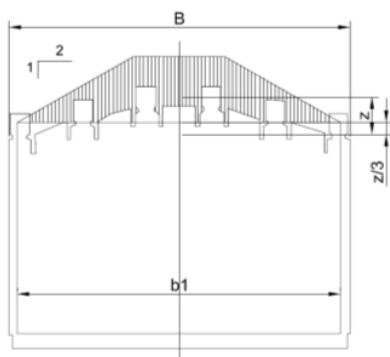
- A Μήκος κάδου
- B Πλάτος κοπής
- b Πλάτος κάδου
- b₁ Εσωτερικό πλάτος στο δόντι
- b₂ Εσωτερικό πλάτος στη βάση
- F Επιφάνεια
- V_{CECE} Χωρητικότητα κάδου

$$V_{CECE} = F \times \frac{b_1 + b_2}{2} + \frac{A \times b_1^2}{8} - \frac{b_1^3}{24} \quad (\text{εξ. 2.13})$$

Σχήμα 2.5: Όγκος ανεστραμμένου κάδου εκσκαφέα σύμφωνα με το πρότυπο CECE (1973)

Πίνακας 2.4: Συγκριτικός πίνακας μοντέλων παραγωγικότητας

| Γωνία απόθεσης | Πρότυπο | Μέθοδος εκτίμησης παραγωγικότητας |
|------------------------------|------------------------------|--|
| 1:1 (εκσκαφέας) | SAE, PCSA, | Bauer (2007), Caterpillar (2016), Girmscheidt |
| 1:2 (φορτωτής, φορητό όχημα) | ISO 7451:2007, ISO 7546:1983 | (2010), Hoffmann (2006), Komatsu (2013), Kotte (1997), Liebherr (2003), Nunally (2007), Peurifoy and Schexnayder (2002), |
| 1:2 | CECE | BML (1983), Hüster (2005), Kühn (1984), Kotte (1997), Liebherr (2003) |



- A Πλάτος κάδου
 - B Μήκος κοπής
 - b_1 Εσωτερικό πλάτος στη βάση
 - F Επιφάνεια όψης
 - y Ύψος υπερχειλίσης
 - z Ύψος δοντιού
 - $V_{SAE/CECE}$ Χωρητικότητα κάδου
- $$V = F \times b_1 + \frac{A \times b_1^2}{8} - \frac{b_1^3}{24} \quad (\text{εξ. 2.14})$$

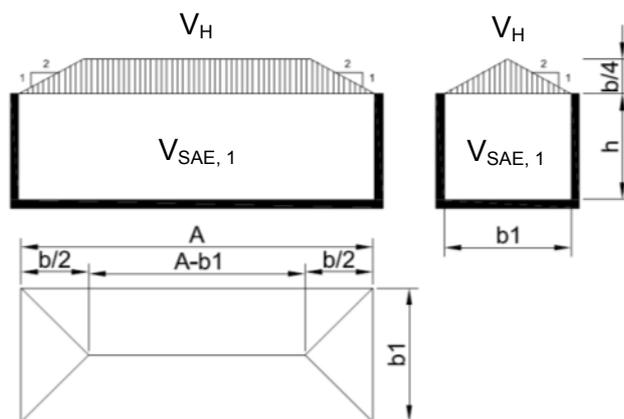
Σχήμα 2.6: Όγκος κάδου φορτωτή σύμφωνα με τα πρότυπα SAE και CECE

III. Φορτηγό όχημα

Η ονομαστική χωρητικότητα της σκάφης του φορτηγού οχήματος προσδιορίζεται τόσο από το πρότυπο SAE (1985b), όσο και από το πρότυπο ISO 6483:1980 (ISO, 1980) για κλίση απόθεσης υλικού ίση με 1:2, όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 2.7 (εξ. 2.16). Ο πρώτος όρος της εξίσωσης 2.16 υπολογίζει τη γεωμετρική χωρητικότητα του κάδου και ο δεύτερος όρος υπολογίζει την χωρητικότητα υπερπλήρωσης. Η χωρητικότητα της σκάφης του φορτηγού οχήματος περιορίζεται από το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος του υλικού σύμφωνα με την εξ. 2.15:

$$V_{rated} \times f_{fill} \leq \frac{G_{max, truck}}{\gamma_{loose}} \quad (\text{εξ. 2.15})$$

όπου $G_{max, truck}$ = μέγιστο ωφέλιμο φορτίο οχήματος [t], γ_{loose} = ειδικό βάρος χαλαρού υλικού [t/m^3].



$$V_{rated} = V_{SAE,1} + V_H = b_1 \times A \times h + \frac{A \times b_1^2}{8 - \left(\frac{b_1^3}{24}\right)} \quad (\text{εξ. 2.16})$$

Σχήμα 2.7: Όγκος κάδου φορτηγού οχήματος σύμφωνα με το πρότυπο SAE

IV. Προωθητής

Η ονομαστική χωρητικότητα του κοπτήρα προωθητή εξαρτάται από τον τύπο. Γενικά, διακρίνονται τρεις τύποι: μετωπικός ή τύπου S, γωνιακός ή τύπου A και προωθητικός ή τύπου U (Σχήμα 2.8). Η ονομαστική χωρητικότητα εκτιμάται σύμφωνα με το πρότυπο SAE J1265 (1988) ή τη σχέση των Garbotz (1966) / Kühn (1984) όπως τροποποιήθηκε από τους Klanfar et al. (2014) (εξ. 2.17α/β/γ):

$$\text{Μετωπικός ή γωνιακός} \quad V_{rated, S/A} = 0,80 \times b \times h^2 \quad (\text{εξ. 2.17α})$$

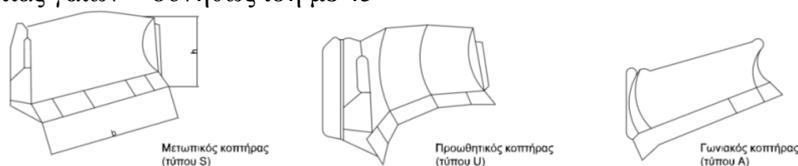
$$\text{Προωθητικός κοπτήρας} \quad V_{rated, U} = V_{rated, S/A} + z \times h \times (b - z) \times \tan \phi \quad (\text{εξ. 2.17 β})$$

$$\text{Γενικός τύπος} \quad V_{rated} = 0,50 \times b \times h^2 \times (\tan \omega)^{-1} \quad (\text{εξ. 2.17 γ})$$

z = μήκος (m) φτερού μετρούμενο παράλληλα με το πλάτος b

ϕ = γωνία ($^\circ$) που σχηματίζει το φτερό σε σχέση με την ευθεία του κοπτήρα

ω = γωνία ($^\circ$) ισορροπίας γαιών – συνήθως ίση με 45°



Σχήμα 2.8: Τύποι κοπτήρα προωθητή

V. Αποξεστικό

Η ονομαστική χωρητικότητα του κάδου του αποξεστικού εξαρτάται από τον τύπο του μηχανήματος και παρέχεται από τα εγχειρίδια των κατασκευαστών (π.χ. Caterpillar 621H 13 / $18,4 \text{ m}^3$). Ο όγκος εκτιμάται για υπερπλήρωση υλικού με κλίση 1:2 (Hoffmann, 2006). Δεν παρέχεται αναλυτικός τρόπος υπολογισμού της χωρητικότητας στη βιβλιογραφία, όπως στην περίπτωση των υπόλοιπων μηχανημάτων που εξετάστηκαν παραπάνω.

2.5.3. Συντελεστής πλήρωσης κάδου (f_{fill})

Η γεωμετρική και η ονομαστική χωρητικότητα εκφράζουν τον όγκο του υλικού στον κάδο του μηχανήματος με βάση τη γεωμετρία και όχι τα πραγματικά εδαφικά χαρακτηριστικά του υλικού που εκσκάπτεται. Γι' αυτό τον λόγο ορίζεται ο συντελεστής πλήρωσης (fill factor) του κάδου που συσχετίζει την πραγματική πλήρωση του κάδου με εδαφικό υλικό ως προς το ποσοστό (%) της ονομαστικής ή γεωμετρικής χωρητικότητας. Ο συντελεστής πλήρωσης εξαρτάται από τον τύπο του εδαφικού υλικού. Για ευκόλως εκσκάσιμα υλικά, όπου το εδαφικό υλικό αφήνει ελάχιστο κενό χώρο στον κάδο του εκσκαφέα, η ονομαστική χωρητικότητα μπορεί και να ξεπεραστεί ($f_{fill} > 1$), ενώ στην περίπτωση βραχώδους υλικού τα κενά είναι πολύ μεγαλύτερα και ο πραγματικός όγκος ενδέχεται να μειωθεί ($f_{fill} < 1$).

Πίνακας 2.5: Τιμές συντελεστή πλήρωσης (f_{fill}) χωματουργικών μηχανημάτων ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους κατά DIN 18300:2012

| Κατηγορία εκσκαψιμότητας | Υδρ. εκσκ. | Φορτωτής | | | Φορητό όχημα | | | Προωθητής | Αποξεστικό |
|--|---------------|----------|-------------------|------|--------------|-------------------|------|-----------|-------------|
| | | στεγνό | νωπό ⁵ | υγρό | στεγνό | νωπό ⁵ | υγρό | | |
| Περιγραφή εδάφους | | | | | | | | | |
| 1 Επιφανειακό έδαφος | | | | | | | | | |
| Επιφανειακό στρώμα εδάφους | 1,20 | | Δεν ορίζεται | | 1,00 | 1,08 | 1,10 | 1,00 | 1,20 |
| 2. Υδαρές έδαφος | | | | | | | | | |
| | | | | | Δεν ορίζεται | | | | |
| 3. Εδάφη με μεγάλη εκσκαψιμότητα | | | | | | | | | |
| Άμμος, Αμμοχάλικο (μη συνεκτικά) | 1,13 | 0,73 | 0,86 | 0,86 | 0,92 | 1,08 | 1,10 | 1,00 | 0,85 – 0,95 |
| Χάλικες, χοντρόκοκκοι | 1,13 | 0,77 | 0,87 | 0,87 | 0,95 | 1,05 | 1,03 | 1,00 | – |
| Αμμοχάλικα (ελαφρώς συνεκτικά) | 1,13 | 0,91 | 0,97 | 0,95 | 0,98 | 1,12 | 1,10 | 1,00 | 0,85 – 0,95 |
| Λάσπη | | | | | Δεν ορίζεται | | | | |
| 4. Εδάφη με μεσαία εκσκαψιμότητα | | | | | | | | | |
| Μίγμα αμμοχάλικων (συνεκτικό) μικρής διαμέτρου ¹ | 1,20 | 0,90 | 0,98 | 1,02 | 1,02 | 1,12 | 1,10 | 0,95 | 1,20 – 1,40 |
| Μαργαϊκό, αργιλώδες, ιλώδες έδαφος με λίθους (πέτρες) μικρής διαμέτρου ¹ | 1,20 | - | 0,93 | 0,99 | - | 1,08 | 1,05 | 0,95 | 1,20 – 1,40 |
| 5. Εδάφη με μικρή εκσκαψιμότητα | | | | | | | | | |
| Θρυμματισμένος βράχος, ογκόλιθοι ² | 1,15 | 0,87 | 0,87 | - | 0,98 | 1,00 | 1,00 | 0,85 | – |
| Ισχυρά συνεκτικό έδαφος με λίθους και αποσπασμένα τεμάχια συμπαγούς βράχου ³ | 1,15 | - | 0,89 | 0,89 | 1,00 | 1,05 | 1,02 | 0,85 | 1,15 – 1,25 |
| 6. Βραχόμαζα με μεγάλη εκσκαψιμότητα | | | | | | | | | |
| Θρυμματισμένος (με ΕΥ) βράχος με λίθους μικρής διαμέτρου ⁴ | 0,95 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 1,00 | 1,06 | 1,06 | 0,80 | – |
| Θρυμματισμένος (με ΕΥ) βράχος με ογκόλιθους μεγάλης διαμέτρου ⁴ | 0,92 | 0,72 | 0,72 | 0,72 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,80 | – |
| 1) έως 30% κ.β. χάλικες όγκου έως 0,01m ³ (DIN 18300) | | | | | | | | | |
| 2) περισσότερο από 30% κ.β. χάλικες όγκου έως 0,01m ³ (DIN 18300) | | | | | | | | | |
| 3) έως 30% κ.β. χάλικες όγκου από 0,01m ³ έως 0,1m ³ (DIN 18300) | | | | | | | | | |
| 4) περισσότερο από 30% κ.β. λίθοι όγκου μεγαλύτερου από 0,1m ³ (DIN 18300) | | | | | | | | | |
| 5) ποσοστό υγρασίας: στεγνό = 0 έως 5%, νωπό = 5 έως 10%, υγρό = 10 έως 15% | | | | | | | | | |

Πίνακας 2.6: Τιμές συντελεστή πλήρωσης (f_{fill}) χωματουργικών μηχανημάτων ανάλογα με τις συνθήκες εργασίας και τον τύπο μηχανήματος

| Συνθήκες εργασίας | Komatsu (2013) | Caterpillar (2016) | Liebherr (2003) | Nunally (2007; σ. 45) |
|---|----------------|--------------------|-----------------|-----------------------|
| Εκσκαφείς με ανεστραμμένο κάδο | | | | |
| Ευνοϊκές ¹ | 1,10 – 1,20 | 1,00 – 1,10 | 1,10 | 0,90 – 1,10 |
| Μέτριες ² | 1,00 – 1,10 | 0,95 – 1,10 | 1,00 – 1,10 | 0,80 – 1,10 |
| Σχετικά δυσμενείς ³ | 0,80 – 0,90 | 0,80 – 0,90 | 0,90 | 0,65 – 0,95 |
| Δυσμενείς ⁴ | 0,70 – 0,80 | 0,40 – 0,75 | 0,50 – 0,85 | 0,40 – 0,90 |
| Εκσκαφείς με μετωπικό κάδο, Φορτωτής | | | | |
| Ευνοϊκές | 1,00 – 1,10 | 1,00 – 1,05 | 1,10 – 1,20 | 0,90 – 1,10 |
| Μέτριες | 0,95 – 1,00 | 1,00 – 1,05 | 1,00 – 1,10 | 0,80 – 1,10 |
| Σχετικά δυσμενείς | 0,90 – 0,95 | 0,85 – 1,00 | 1,00 – 1,10 | 0,65 – 0,95 |
| Δυσμενείς | 0,85 – 0,90 | 0,85 – 1,05 | 0,85 – 1,00 | 0,40 – 0,90 |
| Προωθητής | | | | |
| Ευνοϊκές | 0,90 – 1,10 | 1,00 – 1,20 | 1,20 | - |
| Μέτριες | 0,70 – 0,90 | 0,80 | 0,80 | - |
| Σχετικά δυσμενείς | 0,60 – 0,70 | 0,70 | 0,70 | - |
| Δυσμενείς | 0,40 – 0,60 | 0,60 – 0,80 | 0,60 – 0,80 | - |
| Αποξεστικό | | | | |
| Ευνοϊκές | - | 1,00 – 1,20 | 1,20 | - |
| Μέτριες | - | 0,80 | 0,80 | - |
| Σχετικά δυσμενείς | - | 0,70 | 0,70 | - |
| Δυσμενείς | - | 0,60 – 0,80 | 0,60 – 0,80 | - |

¹Ευνοϊκές: Εκσκαφή φυσικού, αργιλώδους ή μαλακού εδάφους

²Μέτριες: Εκσκαφή φυσικού, αμμώδους ή στεγνού εδάφους, άμμου ή χαλαρού εδάφους με χάλικες μικρής διαμέτρου

³Σχετικά δυσμενείς: Εκσκαφή πολύ κερματισμένου βράχου, σκληρής αργίλου

⁴Δυσμενείς: Εκσκαφή βραχώδους εδάφους ή μέτρια κερματισμένου βράχου

Η Γερμανική βιβλιογραφία ορίζει τον συντελεστή πλήρωσης ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους, όπως αυτή προσδιορίζεται από το πρότυπο DIN 18300:2012 για διαφορετικούς τύπους μηχανημάτων με βάση τις τιμές της BML (1983). Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή πλήρωσης κατά BML (1983) δίνονται στον Πίνακα 2.5. Οι κατασκευαστές μηχανικού εξοπλισμού (Caterpillar, 2016; Komatsu, 2013; Liebherr, 2003), καθώς και ο Nunally (2007; σελ. 45) δίνουν προσεγγιστικές τιμές του συντελεστή πλήρωσης σύμφωνα συγκεκριμένα κριτήρια (π.χ. είδος και κατάσταση εδαφικού υλικού, τύπος μηχανήματος) (Πίνακα 2.6). Οι Peurifoy and Schexnayder (2002) υιοθετούν τις τιμές της Caterpillar (2016).

2.5.4. Χρόνος κύκλου (t_{th})

Ο χρόνος κύκλου υπολογίζεται σε σχέση με τον τύπο του μηχανήματος, το εδαφικό υλικό και τις συνθήκες εργασίας. Ενδεικτικές τιμές του χρόνου κύκλου προκύπτουν, είτε από πίνακες κατασκευαστών μηχανικού εξοπλισμού (Caterpillar, 2016; Komatsu, 2013; Liebherr, 2003), είτε από εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις (BML, 1983).

I. Εκσκαφείς

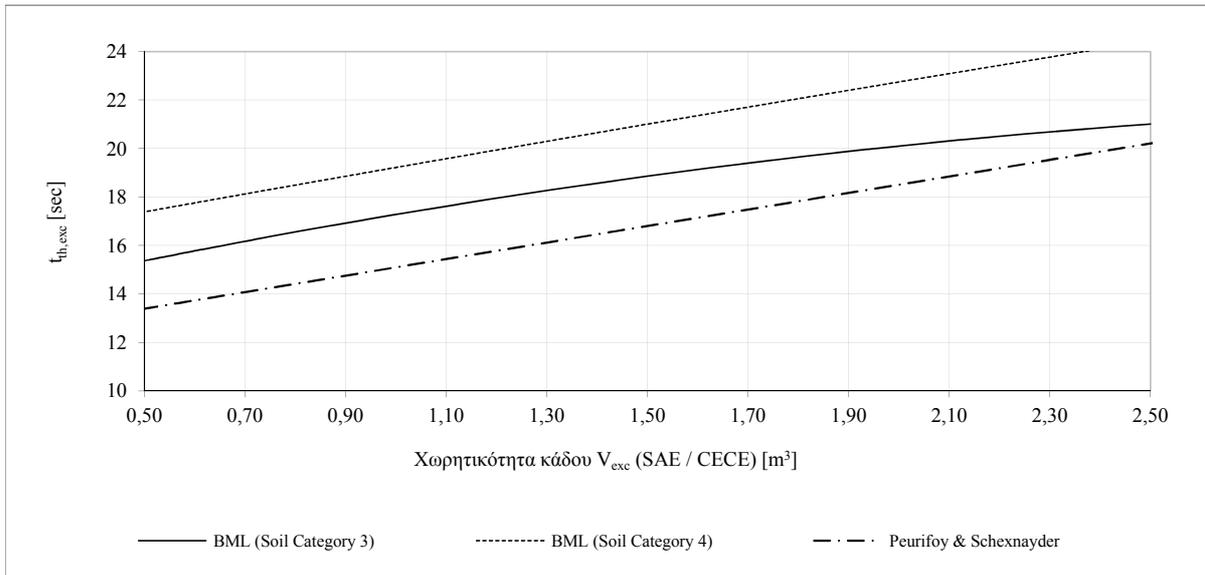
Η εκτίμηση του χρόνου κύκλου του εκσκαφέα (υδραυλικός, λαστιχοφόρος ή ερπυστριοφόρος) γίνεται με βάση τρεις παραμέτρους:

- (i) Χωρητικότητα κάδου (Bauer 2007; BML, 1983; Peurifoy and Schexnayder, 2002; Garbotz 1966, Girmscheidt 2010; Hoffmann 2006; Kotte 1997; Kühn 1984)
- (ii) Εδαφικά χαρακτηριστικά (Hüster 2005; Liebherr, 2003; Nunally, 2007)
- (iii) Ισχύς του μηχανήματος (Caterpillar, 2016; Komatsu, 2013)

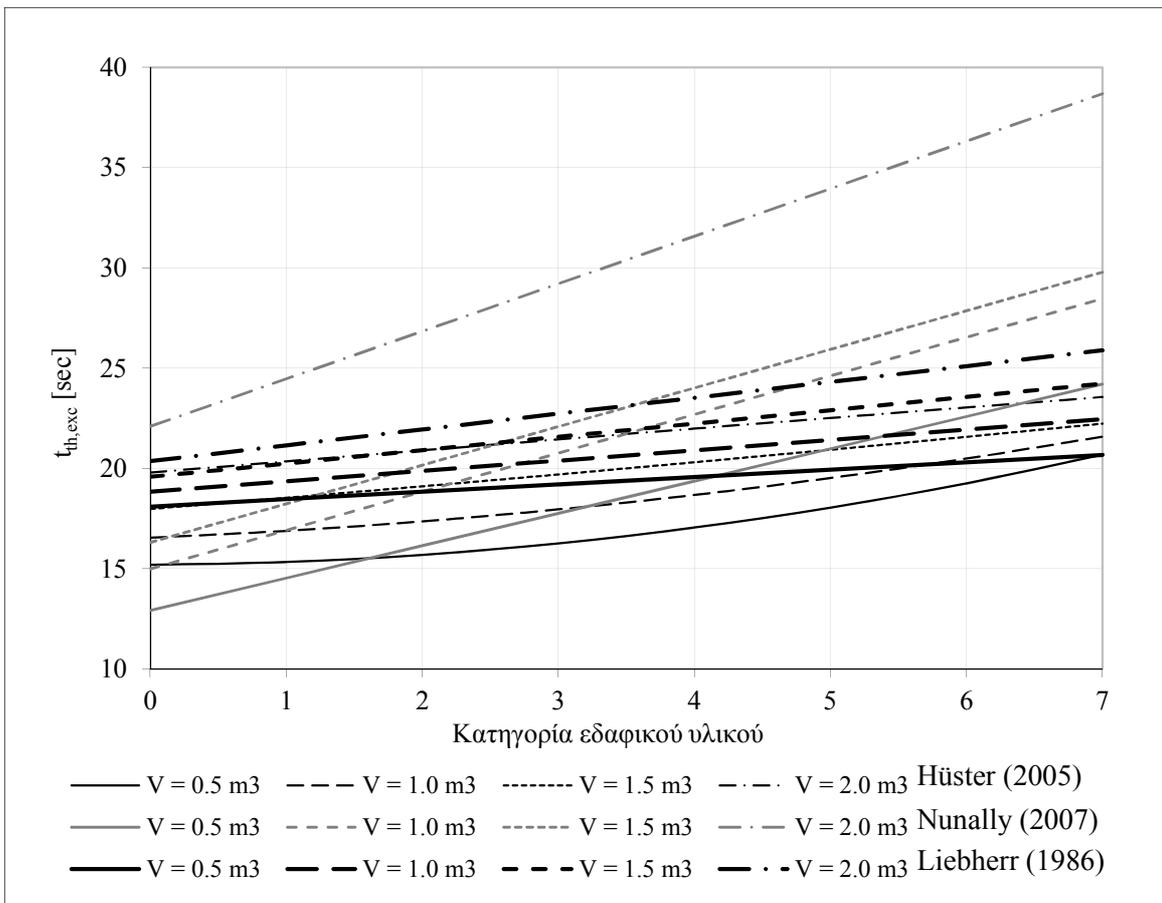
Το Σχήμα 2.9 απεικονίζει την εκτίμηση του χρόνου κύκλου εκσκαφέα σε σχέση με τη χωρητικότητα του κάδου του μηχανήματος για τις μεθόδους BML (1983) και Peurifoy and Schexnayder (2002). Η BML (1983; σελ. 3) δίνει ένα εμπειρικό νομογράφημα για δύο κατηγορίες εδαφών (3 και 4 κατά DIN 18300), το οποίο προσεγγίζεται από τις αντίστοιχες καμπύλες του Σχήματος 2.9. Οι υπόλοιπες μεθοδολογίες της Γερμανικής βιβλιογραφίας υιοθετούν τις προτάσεις της BML (1983), εκτός από τον Garbotz (1966), ο οποίος δεν δίνει συγκεκριμένες τιμές του χρόνου κύκλου, αλλά προτείνει να γίνονται σχετικές μετρήσεις επί τόπου του έργου. Οι Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 246) παρέχουν πινακοποιημένα δεδομένα χρόνου κύκλου σε σχέση με τη χωρητικότητα του κάδου θεωρώντας βάθος εκσκαφής μεταξύ 40-60% του μέγιστου βάθους εκσκαφής, γωνία στροφής 30-60° και τον εκσκαφέα στο ίδιο επίπεδο με το φορτηγό όχημα. Η μαθηματική προσέγγιση των δεδομένων απεικονίζεται στην καμπύλη του Σχήματος 2.9. Το Σχήμα 2.10 δίνει αντίστοιχες τιμές σε σχέση με την κατηγορία του εδάφους (DIN 18300:2012). Ο Hüster (2005; σελ. 43) χρησιμοποιεί νομογραφήματα για χωρητικότητα κάδου από 0,50m³-2,0m³. Θεωρεί ακόμη ότι τα καταλληλότερα μηχανήματα είναι αυτά με ισχύ 65-75kW ανά m³ κάδου. Επισημαίνει ότι μία αύξηση +30% στην ισχύ του μηχανήματος, επιφέρει μείωση του χρόνου κύκλου κατά 3sec. Ο Nunally (2007; σελ. 49) δίνει πινακοποιημένα δεδομένα του χρόνου κύκλου για τρεις κατηγορίες εδαφικού υλικού (μαλακό, μέτριο, σκληρό), οι οποίες προσαρμοζόμενες στις αντίστοιχες κατηγορίες του DIN 18300:2012 δημιουργούν τις καμπύλες του Σχήματος 2.10.

Η Liebherr (1986; σελ. 361) καθόριζε προσεγγιστικές τιμές του χρόνου κύκλου σύμφωνα με τον τύπο του εδάφους θεωρώντας χωρητικότητα κάδου έως 13,50m³ και γωνία στροφή 60-100°. Σε νεότερη έκδοση του εγχειριδίου της (Liebherr, 2003; σελ. 417) ο χρόνος κύκλου δεν συσχετίζεται με το εδαφικό υλικό, αλλά με την ισχύ του μηχανήματος, κάτι το οποίο ισχύει γενικότερα για τις μεθοδολογίες των κατασκευαστών μηχανικού εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, οι κατασκευαστές μηχανικού εξοπλισμού καθορίζουν τυπικές τιμές του εύρους του χρόνου κύκλου ανάλογα με το μοντέλο του μηχανήματος (π.χ. σελ. 7-279 για την Caterpillar (2016), Πιν. 11 σελ 14A-10 για την Komatsu (2013), σελ. 417 για την Liebherr (2003)). Το εύρος προσδιορίζεται ανάλογα με τις συνθήκες εργασίας για την Caterpillar (ιδανικές, πολύ καλές, μέτριες, σχετικά δυσμενείς, δυσμενείς) και την Liebherr (ιδανικές, μέτριες, δυσμενείς) και ανάλογα με τη γωνία στροφής για την Komatsu (45°, 90°, 180°). Για λόγους ομοιομορφίας η εκτίμηση του χρόνου κύκλου θα πρέπει να συσχετιστεί με την ισχύ (kW), καθώς αυτή αποτελεί το χαρακτηριστικό μέγεθος του εκσκαφέα σύμφωνα με την Euroliste (2015). Εφαρμόζοντας γραμμική παλινδρόμηση στα πινακοποιημένα δεδομένα των μεθόδων προκύπτει το Σχήμα 2.11 για μέτριες συνθήκες εργασίας και γωνία στροφής 90°. Τέλος, οι Edwards and Holt (2000) μελέτησαν εργασίες εκσκαφών με μηχανήματα των Caterpillar, Komatsu και Volvo και συσχέτισαν τον χρόνο κύκλου με (α) τη γωνία στροφής του προβόλου, (β) το βάρος του μηχανήματος και (γ) το βάθος εκσκαφής ως εξής (εξ. 2.18):

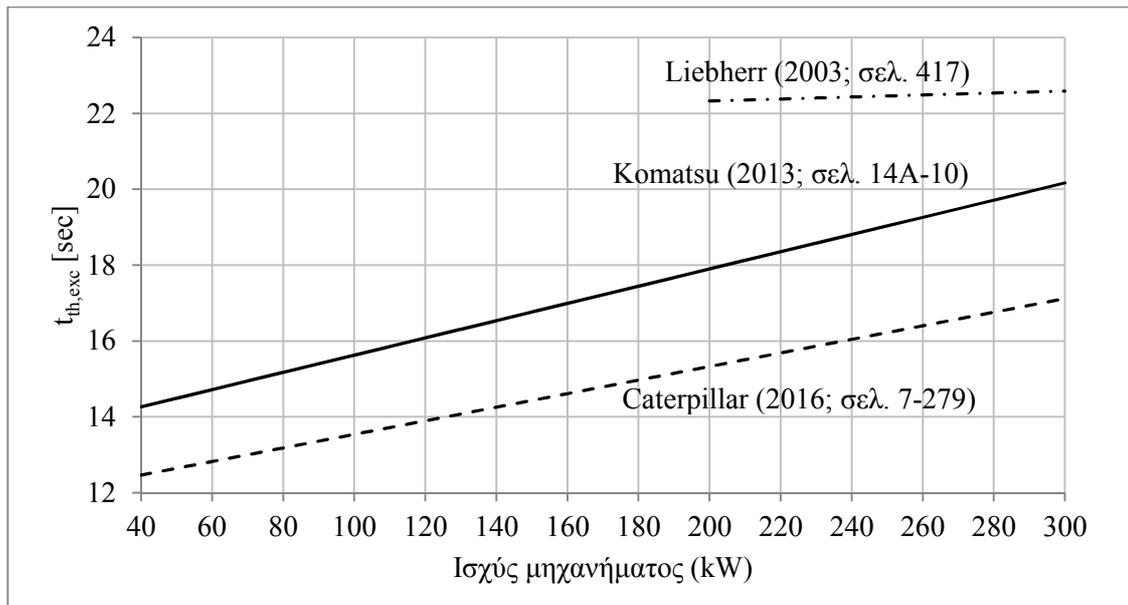
$$t_{th,exc} = -5,266 + 0,09222 x (\text{γωνία στροφής σε } ^\circ) + 0,07562 x (\text{βάρος μηχανήματος σε } t) + 0,309 x (\text{βάθος εκσκαφής/μέγιστο βάθος εκσκαφής σε } \%) \quad (\text{εξ. 2.18})$$



Σχήμα 2.9: Χρόνος κύκλου εκσκαφέα σε σχέση με τη χωρητικότητα του κάδου κατά BML (1983; σελ. 3) και Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 246)



Σχήμα 2.10: Χρόνος κύκλου εκσκαφέα σε σχέση με την κατηγορία εδαφικού υλικού κατά Hüster (2005; σελ. 43); Liebherr (1986; σελ. 361); Nunally (2007; σελ. 49)



Σχήμα 2.11: Χρόνος κύκλου εκσκαφέα σε σχέση με την ισχύ του μηχανήματος

II. Φορτωτής

Ο χρόνος κύκλου του φορτωτή προσδιορίζεται από την εξ. 2.19:

$$t_{th,load} = t_{fill} + t_{dump} + t_{tran} + \Delta t$$

• (εξ. 2.19)

Όπου t_{fill} = ο χρόνος πλήρωσης του κάδου, t_{dump} = ο χρόνος εκκένωσης του κάδου, t_{tran} = ο χρόνος μετάβασης στον χώρο απόθεσης και επιστροφής στον χώρο φόρτωσης, Δt = πρόσθετος χρόνος που εξαρτάται από τις συνθήκες εργασίας.

Οι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν τη διακύμανση του χρόνου κύκλου είναι (α) ο τύπος του μηχανήματος (ερπυστριοφόρος / ελαστικοφόρος), (β) το μέγεθος του κάδου του φορτωτή, (γ) ο τύπος του εδάφους, (δ) ο τρόπος απόθεσης και η χωρητικότητα του φορτηγού οχήματος και (ε) η κατάσταση του οχήματος.

II.1. Χρόνος πλήρωσης κάδου (t_{fill})

Η Caterpillar (2016; σελ. 23-254/23-255) και η Liebherr (2003; σελ. 594) καθορίζουν σταθερό χρόνο πλήρωσης του κάδου με τιμές 0,03 – 0,20min. Η Komatsu (2013; σελ. 14A-8) δίνει σταθερούς χρόνους που κυμαίνονται στο εύρος 0,20-0,35min. Η γερμανική βιβλιογραφία (Bauer 2007; Garbotz 1966, Girmscheidt 2010; Hoffmann 2006; Hüster 2005; Kotte 1997) υιοθετεί τις προτάσεις της BML (1983; σελ. 36-38), η οποία καθορίζει τον χρόνο πλήρωσης σε σχέση με την χωρητικότητα του κάδου για διαφορετικές κατηγορίες εδαφικού υλικού μέσω σχετικών νομογραφημάτων (Σχήμα 2.12). Ο Kühn (1984; σελ. 171) δίνει παρόμοια νομογραφήματα αλλά διαφοροποιείται στο εύρος των τιμών, ενώ έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ότι για πολύ σκληρά εδάφη (π.χ.

κερματισμένος βράχος), η BML (1983) καθορίζει φθίνουσες τιμές χρόνου πλήρωσης, όσο αυξάνεται ο όγκος του κάδου του φορτωτή.

II.2. Χρόνος εκκένωσης του κάδου (t_{dump})

Η Caterpillar (2016; σελ. 23-254/23-255) και η Liebherr (2003; σελ. 594) καθορίζουν σταθερό χρόνο εκκένωσης του κάδου με τιμές 0,04 – 0,10min. Η Komatsu (2013; σελ. 14A-8) δίνει σταθερό χρόνο ίσο με 0,10min. Η γερμανική βιβλιογραφία (Bauer 2007; BML, 1983; Garbotz 1966, Girmscheidt 2010; Hoffmann 2006; Kotte 1997) υιοθετεί τις προτάσεις της BML (1984; σελ. 171-172), η οποία καθορίζει τον χρόνο εκκένωσης από εμπειρικά νομογραφήματα σε σχέση με την χωρητικότητα του κάδου για απόθεση υλικού σε σωρό ή σε φορτηγό όχημα οπίσθιας ανατροπής (Muldenkipper) (Σχήμα 2.13). Όπως και πριν, ο Kühn (1984; σελ. 171) δίνει παρόμοια νομογραφήματα αλλά διαφοροποιείται στο εύρος των τιμών.

II.3. Χρόνος μετάβασης και επιστροφής (t_{tran})

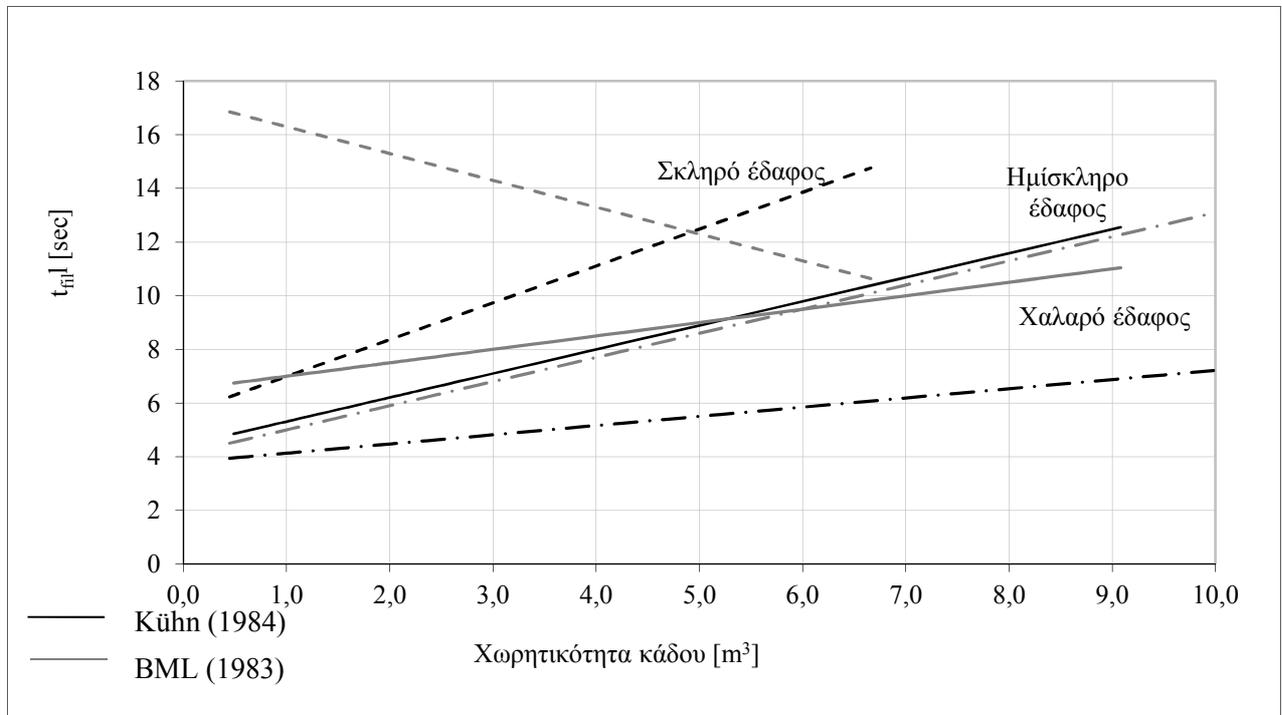
Ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής καθορίζεται από εμπειρικά νομογραφήματα και διακρίνονται οι εξής περιπτώσεις:

- (i) Διαφορετικό νομογράφημα για τον χρόνο μετάβασης (έμφορτο) και επιστροφής (άδειο) σε σχέση με την μέση απόσταση και την κλίση του εδάφους (Caterpillar 2016; σελ. 23-339) ή την συνολική αντίσταση κίνησης (κλίσης και κύλισης) (Komatsu, 2013; σελ. 3A-136) (Σχήμα 2.14 και Σχήμα 2.15).
- (ii) Ενιαίο νομογράφημα για χρόνο μετάβασης και επιστροφής που συσχετίζει τη μέση απόσταση είτε με τον τύπο του εδάφους (BML, 1983; σελ. 39), είτε με τη σχέση στο κιβώτιο ταχυτήτων (1^η ταχύτητα, 2^η ταχύτητα κ.ο.κ.) (Liebherr, 2003; σελ. 674) (Σχήμα 2.16).

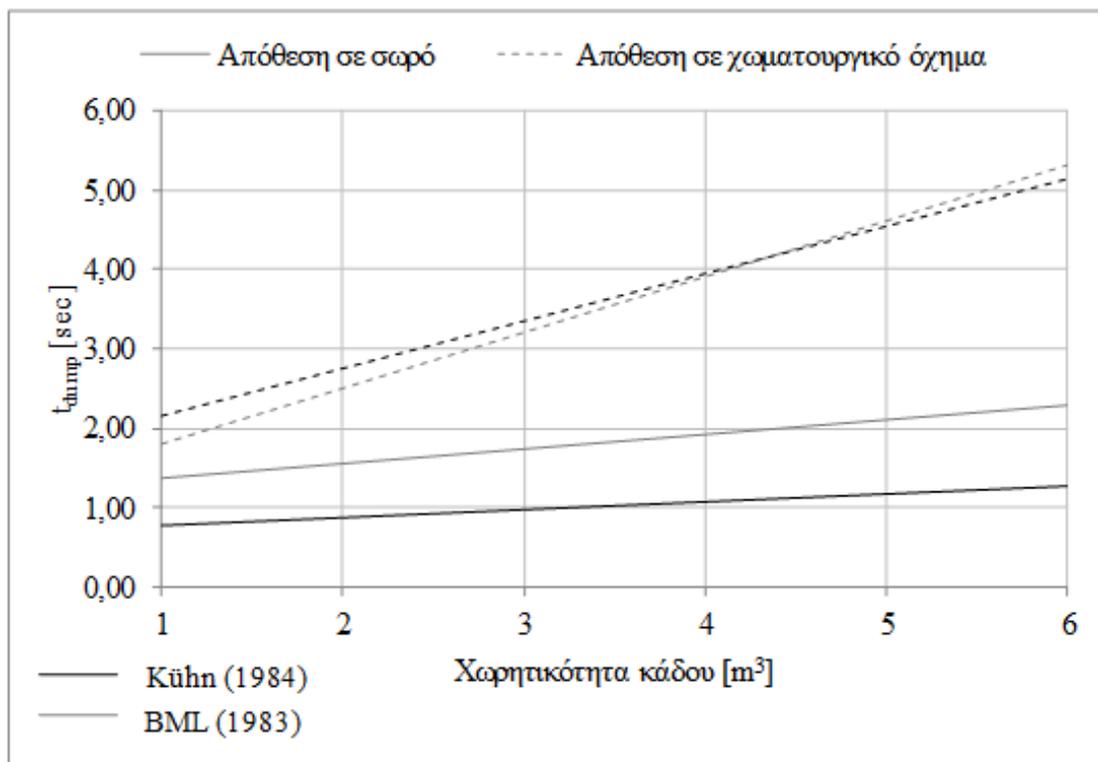
II.4. Χρόνος κύκλου και πρόσθετος χρόνος (Δt)

Για μικρές αποστάσεις (πχ. έως 20m), ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής ενσωματώνεται στον τυπικό χρόνο κύκλου του μηχανήματος. Ενδεικτικά, ο Nunally (2007; Πιν. 4-6) καθορίζει τυπικό χρόνο κύκλου 0,35-0,65min και 0,30-0,45min για ελαστικοφόρο και ερπυστριοφόρο φορτωτή αντίστοιχα. Οι αντίστοιχες τιμές των Peurifoy and Schexnayder (2002; Πιν. 8.9) είναι 27-42sec (λαστιχοφόρος) και 15-21sec (ερπυστριοφόρος). Για μεγαλύτερες αποστάσεις, ο χρόνος μετάβασης και επιστροφής εκτιμάται από τα σχετικά νομογραφήματα και προστίθεται στον τυπικό χρόνο κύκλου. Οι μέθοδοι Caterpillar (2016; σελ. 23-254) και Liebherr (2003; σελ. 594 και 673) δίνουν προσεγγιστικές τιμές του σταθερού χρόνου κύκλου (fixed cycle time) που περιλαμβάνουν την πλήρωση, εκκένωση και τους ελιγμούς του μηχανήματος. Το πεδίο τιμών του σταθερού χρόνου κύκλου κυμαίνεται στο διάστημα 0,45 – 0,55min. Στη συνέχεια προσδιορίζεται ο πρόσθετος χρόνος Δt , ο οποίος αυξομειώνει τον σταθερό χρόνο κύκλου, ανάλογα με το εδαφικό υλικό και τις συνθήκες εργασίας (Πίνακας 2.7). Η Komatsu (2013) διαχωρίζει την εργασία της στατικής φόρτωσης (χωρίς μετάβαση/επιστροφή) από την φόρτωση-μεταφορά-απόθεση-επιστροφή. Στην πρώτη περίπτωση ο χρόνος κύκλου συσχετίζεται με την χωρητικότητα του κάδου και τη μέθοδο εργασίας για ελαστικοφόρο (wheel loader) και ερπυστριοφόρο (dozer shovel) φορτωτή, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.8. Στην δεύτερη περίπτωση ο χρόνος φόρτωσης, απόθεσης και

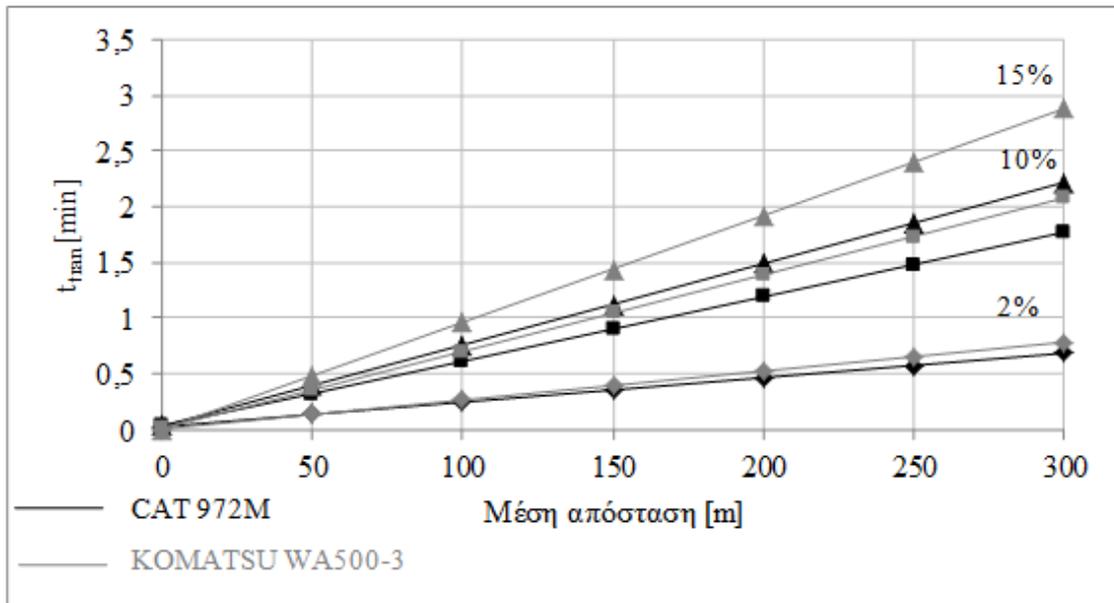
ελιγμών θεωρείται σταθερός και κυμαίνεται στο διάστημα 0,60-0,75min. Ο χρόνος μετάβασης / επιστροφής υπολογίζεται είτε από σχετικά νομογραφήματα (Σχήμα 2.14 / Σχήμα 2.15) είτε προσεγγιστικά μέσω του υπολογισμού της μέσης ταχύτητας του μηχανήματος από τον Πίνακα 2.9.



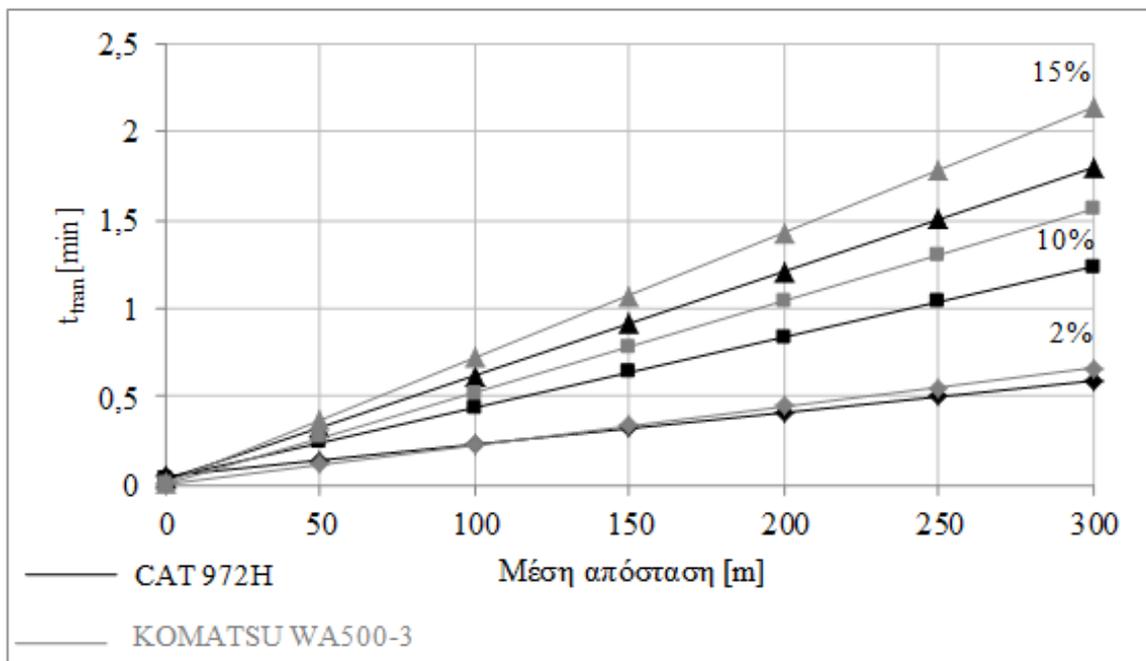
Σχήμα 2.12: Χρόνος πλήρωσης κάδου φορτωτή σε σχέση με την κατηγορία του εδαφικού υλικού



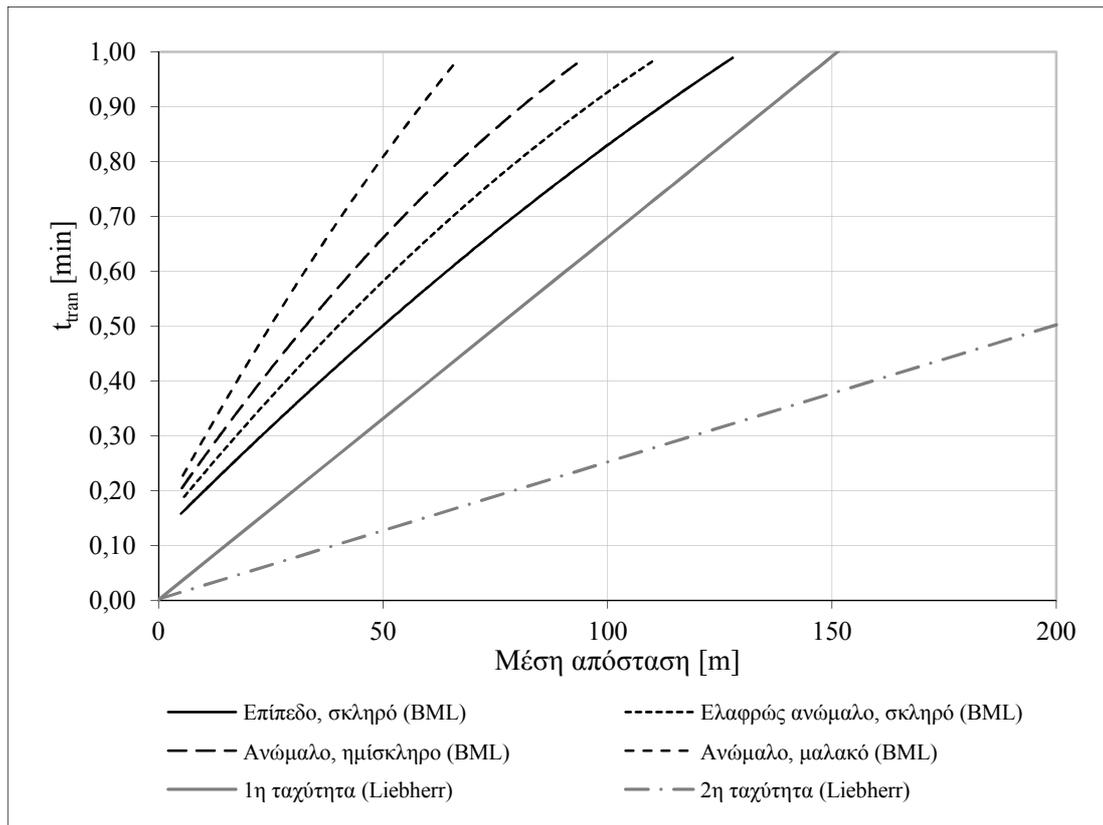
Σχήμα 2.13: Χρόνος εκκένωσης κάδου φορτωτή σε σχέση με τον τρόπο απόθεσης του υλικού



Σχήμα 2.14: Χρόνος μετάβασης έμφορτου φορτωτή (CAT 972M & KOMATSU WA500-3)



Σχήμα 2.15: Χρόνος μετάβασης άδειου φορτωτή (CAT 972M & KOMATSU WA500-3)

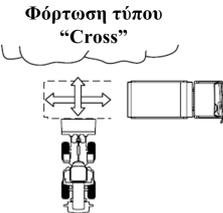


Σχήμα 2.16: Χρόνος μετάβασης / επιστροφής φορτωτή

Πίνακας 2.7: Τιμές πρόσθετου χρόνου (Δt) φορτωτή

| Παράμετρος διαφοροποίησης χρόνου κύκλου | (Caterpillar, 2016; σελ. 23-255) (Liebherr, 2003; σελ. 670-671) |
|---|--|
| Εδαφικό υλικό | Δt [min] |
| μικτό | +0,02 |
| <3mm | +0,02 |
| 3mm - 20mm | -0,02 |
| 20mm - 150mm | $\pm 0,0$ |
| >150mm | >+0,03 |
| κατακεραματισμένος βράχος | >+0, 04 |
| Απόθεση | |
| Σε σωρό ύψους >3m με χρήση προωθητή | $\pm 0,0$ |
| Σε σωρό ύψους <3m με χρήση προωθητή | +0,01 |
| Σε φορτηγό | +0,02 |
| Συνθήκες εργασίας | |
| Κοινή ιδιοκτησία φορτηγών και φορτωτή | < -0,04 |
| Διαφορετική ιδιοκτησία φορτηγών και φορτωτή | < +0,04 |
| Συνεχής απασχόληση | < -0,04 |
| Διακοπτόμενη απασχόληση | < +0,04 |
| Μικρός χώρος απόθεσης | < +0,04 |
| Ανάγκη για πολλούς ελιγμούς | < +0,05 |

Πίνακας 2.8: Τιμές χρόνου κύκλου ελαστικοφόρου και ερπυστριοφόρου φορτωτή (σε παρένθεση) κατά Komatsu (2013; σελ. 14A-7) για στατική φόρτωση [min]

| Μέθοδος εργασίας - φόρτωσης | Χωρητικότητα κάδου | | | | | | |
|--|--|----------------|-------------------------------------|----------------|--------------------|------|---------|
| | 3 m ³ | | 3,1m ³ – 5m ³ | | >5,1m ³ | | |
| Φόρτωση τύπου “V”  | Φόρτωση τύπου “Cross”  | “V” | “Cross” | “V” | “Cross” | “V” | “Cross” |
| Εύκολες συνθήκες φόρτωσης | | 0,45 (0,55) | 0,40 (0,55) | 0,55 (0,60) | 0,50 (0,60) | 0,65 | 0,60 |
| Μέτριες συνθήκες φόρτωσης | | 0,55 (0,60) | 0,50 (0,60) | 0,65 (0,70) | 0,60 (0,70) | 0,70 | 0,65 |
| Σχετικά δυσμενείς συνθήκες φόρτωσης | | 0,70 (0,75) | 0,65 (0,75) | 0,70 (0,75) | 0,65 (0,75) | 0,75 | 0,70 |
| Δυσμενείς συνθήκες φόρτωσης | | 0,75 (0,80) | 0,70 (0,80) | 0,75 (0,80) | 0,75 (0,80) | 0,80 | 0,75 |

Πίνακας 2.9: Τιμές μέσης ταχύτητας κίνησης φορτωτή κατά Komatsu (2013; σελ. 14A-8) [min]

| Συνθήκες εργασίας | | Ταχύτητα [km/h] | |
|-------------------|--|-----------------|---------|
| | | Έμφορτο | Άδειο |
| Ευνοϊκές | Μεταφορά σε καλά συμπακνωμένο οδόστρωμα, χωρίς αυλακώσεις ή άλλα εμπόδια | 10 – 23 | 11 – 24 |
| Μέτριες | Ορισμένες αυλακώσεις στο οδόστρωμα, παρουσία και άλλων μηχανημάτων έργου | 10 – 18 | 11 – 19 |
| Μάλλον δυσμενείς | Αυλακώσεις στο οδόστρωμα, έντονη παρουσία άλλων μηχανημάτων έργου | 10 – 15 | 10 – 16 |
| Δυσμενείς | Μεγάλες αυλακώσεις στο οδόστρωμα, δυσκολία στην απρόσκοπτη εκτέλεση της εργασίας | 9 – 12 | 9 – 14 |

III. Φορτηγό αυτοκίνητο οπίσθιας ανατροπής

Όλες οι μέθοδοι συμφωνούν ότι ο χρόνος κύκλου του φορτηγού αυτοκινήτου (σε min) δίνεται από τις εξ. 2.20 και 2.21:

$$t_{th, truck} = t_{fill} + t_{travel} + t_{dump} + t_{wait} + t_{change} \quad (\text{εξ. 2.20})$$

$$t_{th, truck} = t_{fill} + t_{tran} + t_{dump} + t_{ret} + t_{wait} + t_{change} \quad (\text{εξ. 2.21})$$

Όπου t_{fill} = ο χρόνος πλήρωσης της σκάφης, t_{travel} = ο χρόνος κίνησης (μετάβαση και επιστροφή), t_{tran} = ο χρόνος μετάβασης (έμφορτο), t_{dump} = ο χρόνος απόθεσης, t_{ret} = ο χρόνος επιστροφής (άδειο), t_{wait} = ο χρόνος αναμονής, t_{change} = ο χρόνος εναλλαγής των φορτηγών οχημάτων στον χώρο της φόρτωσης.

III.1. Χρόνος πλήρωσης της σκάφης (t_{fill})

Ο χρόνος πλήρωσης της σκάφης (t_{fill} σε min) καθορίζεται από την εξ. 2.22:

$$t_{fill} = \frac{V_{truck}}{V_{load}} \times t_{th,load} \dot{\eta} \frac{V_{truck}}{V_{exc}} \times t_{th,exc} \quad (\text{εξ. 2.22})$$

Συνεπώς, ο χρόνος πλήρωσης της σκάφης εξαρτάται από τον χρόνο κύκλου του φορτωτικού μέσου (εκσκαφέας ή φορτωτής) και τον λόγο της χωρητικότητας της σκάφης προς την χωρητικότητα του φορτωτικού μέσου, δηλ. τον αριθμό των κύκλων φόρτωσης (ξ) (εξ. 2.23):

$$\xi = \frac{V_{truck}}{V_{load}} \dot{\eta} \frac{V_{truck}}{V_{exc}} \quad (\text{εξ. 2.23})$$

Το εμπειρικό οικονομικό κριτήριο είναι ότι $4 \leq \xi \leq 6$ (Κοπανέζου και Λαμπρόπουλος, 1988). Η εξ. 2.23, όμως, δεν λαμβάνει υπόψη το εξής φαινόμενο: Μετά την αναχώρηση ενός έμφορτου οχήματος από τον χώρο της φόρτωσης και μέχρι την άφιξη του επόμενου άδειου φορτηγού οχήματος, μεσολαβεί χρονικό διάστημα (t_{change}), μέσα στο οποίο το φορτωτικό μέσο (εκσκαφέας ή φορτωτής) ενδέχεται να έχει ολοκληρώσει ένα πλήρη κύκλο φόρτωσης. Η εκκένωση του κάδου του εκσκαφέα ή του φορτωτή μπορεί να γίνει μόνο εάν το φορτηγό έχει λάβει την τελική θέση, συνεπώς μπορεί να δημιουργηθεί σταλία στο φορτωτικό μέσο. Γι' αυτό τον λόγο ο Kühn (1984; σελ. 167-168) προτείνει να λαμβάνεται υπόψη ένας κύκλος φόρτωσης (ξ) λιγότερος κατά τον υπολογισμό του χρόνου φόρτωσης του οχήματος και να προστίθεται ο χρόνος ελιγμών του αυτοκινήτου αφού συνήθως $t_{change} \approx t_{th,exc}$. Έτσι, η εξ. 2.23 διαμορφώνεται ως εξής (εξ. 2.24):

$$t_{fill} = \left(\frac{V_{truck}}{V_{load/exc}} - 1 \right) \times t_{th,load/exc} + t_{change} = (\xi - 1) \times t_{th,load/exc} + t_{change} \quad (\text{εξ. 2.24})$$

III.2. Χρόνος κίνησης φορτηγού αυτοκινήτου (t_{travel})

Για τον υπολογισμό του χρόνου μετάβασης ή επιστροφής ενός οχήματος θα πρέπει να γίνει ένας διαχωρισμός στον τύπο του φορτηγού: Διακρίνεται ο κοινός τύπος του φορτηγού οχήματος οπίσθιας ανατροπής, το οποίο επιτρέπεται να κυκλοφορεί στις δημόσιες οδούς (επιτρεπόμενο μικτό βάρος 33t) και ο τύπος του βαρέως οχήματος που έχει μεγαλύτερο επιτρεπόμενο βάρος και μπορεί να κινείται μόνο σε ενδοεργοταξιακές διαδρομές. Σε κάθε περίπτωση μία δεδομένη διαδρομή θα πρέπει να διαχωριστεί σε διακριτά τμήματα με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, έτσι ώστε ο χρόνος κίνησης (t_{travel} σε min) να υπολογιστεί ως (εξ. 2.25) (BML 1983; σελ. 46):

$$t_{travel} = t_{tran} + t_{ret} = \sum \frac{60 \times l_{i,full}}{1000 \times v_{i,full}} + \sum \frac{60 \times l_{i,empty}}{1000 \times v_{i,empty}} \quad (\text{εξ. 2.25})$$

Όπου $l_{i,full}$ = τμήμα διαδρομής μετάβασης έμφορτο [m], $v_{i,full}$ = μέση ταχύτητα μετάβασης έμφορτο [km/h], $l_{i,empty}$ = τμήμα διαδρομής επιστροφής άδειο [m], $v_{i,empty}$ = μέση ταχύτητα επιστροφής άδειο [km/h].

Στην περίπτωση των κοινών φορτηγών αυτοκινήτων οπίσθιας μετατροπής ο Girmscheidt (2010) τονίζει ότι η μέση ταχύτητα μετάβασης ή επιστροφής δεν διαχωρίζεται και μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά από τον παρακάτω Πίνακα 2.10:

Πίνακας 2.10: Τιμές μέσης ταχύτητας ($v_{i,full/empty}$) έμφορτου ή άδειου φορτηγού οχήματος (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 93)

| Τύπος διαδρομής | Μέση ταχύτητα v_i [km/h] |
|---|----------------------------|
| Λασπώδες ή ανώμαλο ή βραχώδες έδαφος | 5 |
| Χαλαρό έδαφος κοντά στον χώρο της απόθεσης | 10 – 15 |
| Συνεκτικό έδαφος ή χωματόδρομος σε καλή κατάσταση | 15 – 30 |
| Σε ανοιχτές, δημόσιες οδούς | 40 – 60 |

Όταν πρόκειται για οχήματα βαρέως τύπου, τότε ο υπολογισμός της μέσης ταχύτητας προϋποθέτει την εκτίμηση της μέγιστης δυνατής ταχύτητας κίνησης του οχήματος και την προσαρμογή της με χρήση διορθωτικού συντελεστή, όπως φαίνεται στις ακόλουθες εξ. 2.26 και 2.27 (Garbotz, 1966; σελ. 43):

(εξ. 2.26)

$$v_{max} = \frac{270 \times P_{mach} \times \eta}{(G_{load} + G_{truck}) \times (w_r + w_s)} < v_{lim}$$

(εξ. 2.27)

$$v_i = v_{max} \times f_{speed}$$

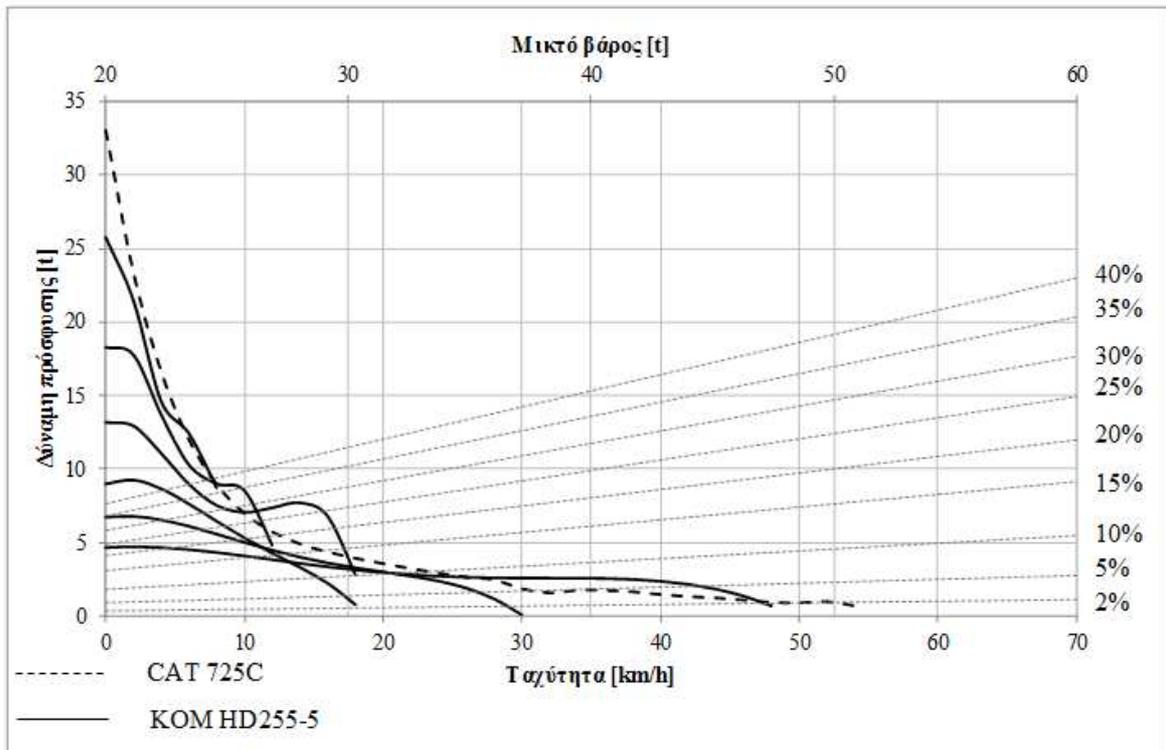
Όπου P_{mach} = ιπποδύναμη του κινητήρα του οχήματος [PS], η = συντελεστής μηχανικής απόδοσης [-], G_{load} = βάρος μεταφερόμενου υλικού [Mr], G_{truck} = απόβαρο φορτηγού οχήματος [Mr], w_r = συντελεστής αντίστασης κύλισης [Kp/Mr], w_s = συντελεστής αντίστασης κλίσης [Kp/Mr], v_{lim} = όριο ταχύτητας [km/h], v_{max} = μέγιστη ταχύτητα [km/h], v_i = μέση ταχύτητα [km/h], f_{speed} = συντελεστής ταχύτητας [-].

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι κατασκευαστές μηχανικού εξοπλισμού (π.χ. Caterpillar, 2016; Komatsu, 2013; Liebherr, 2003) παρέχουν νομογραφήματα για την ταχεία εκτίμηση της μέγιστης ταχύτητας σε σχέση με (α) τη δύναμη πρόσφυσης, (β) το μικτό βάρος του οχήματος και (γ) τη συνολική αντίσταση (κλίσης και κύλισης). Το Σχήμα 2.17 είναι μία συγκριτική απεικόνιση δύο πανομοιότυπων φορτηγών αυτοκινήτων: Caterpillar 725C (239 kW / 320 hp; σελ. 1-9) και Komatsu HD255-5 (241 kW / 323 hp; σελ. 4A-13). Οι Peurifoy and Schexnayder (2002) και ο Nunally (2007) δεν προδιαγράφουν κάποιον ιδιαίτερο τρόπο υπολογισμού του χρόνου κύκλου και παραπέμπουν στα σχετικά νομογραφήματα των κατασκευαστών, όπως αναφέρθηκε προτύτερα.

Ο συντελεστής ταχύτητας υπολογίζεται με δύο τρόπους:

- (i) Από εμπειρικά νομογραφήματα σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του οχήματος (ιπποδύναμη, βάρος) και την απόσταση κίνησης (Kühn, 1984).

- (ii) Από εμπειρικά νομογραφήματα σε σχέση με τη μέγιστη ταχύτητα και τα χαρακτηριστικά της οδού κυκλοφορίας (πλάτος, μορφολογία επιφανείας) (BML, 1983).



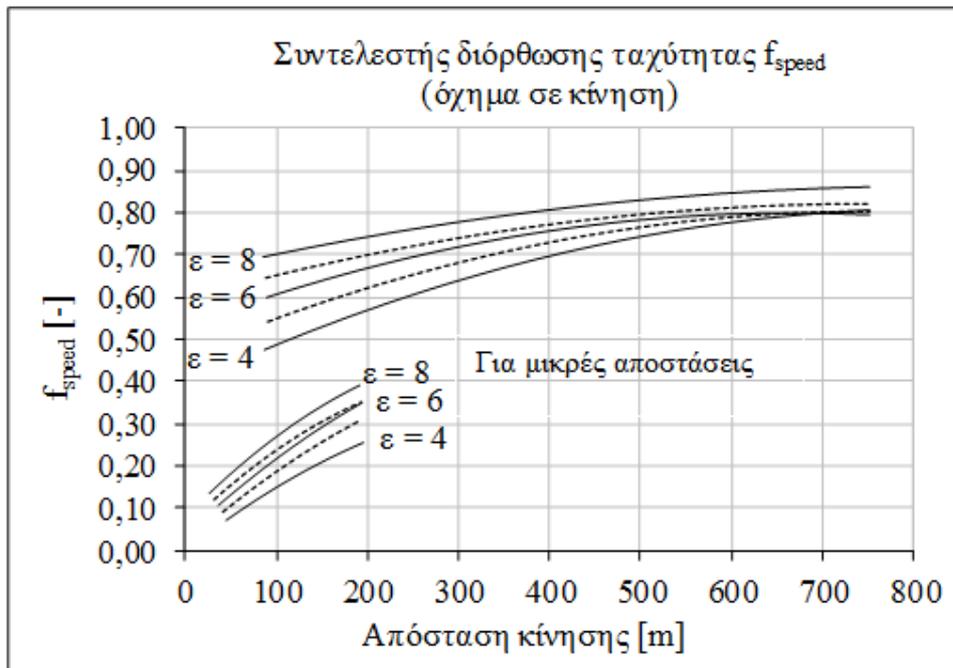
Σχήμα 2.17: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης μέγιστης ταχύτητας φορτηγού αυτοκινήτου

Ο Kühn (1984) δίνει εμπειρικά νομογραφήματα για τον υπολογισμό του συντελεστή ταχύτητας. Το Σχήμα 2.18 εφαρμόζεται εάν το φορτηγό όχημα εισέρχεται στο τμήμα της διαδρομής όντας σε κίνηση, ενώ το Σχήμα 2.19 χρησιμοποιείται όταν το φορτηγό όχημα εκκινεί από στάση. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής ταχύτητας εξαρτάται από τον λόγο της υποδύναμης του κινητήρα (P_{mach} σε PS) προς το συνολικό βάρος του οχήματος (G_{load} / G_{truck} σε t), που ο Kühn (1984; σελ. 182) ονομάζει συντελεστή ε (εξ. 2.28):

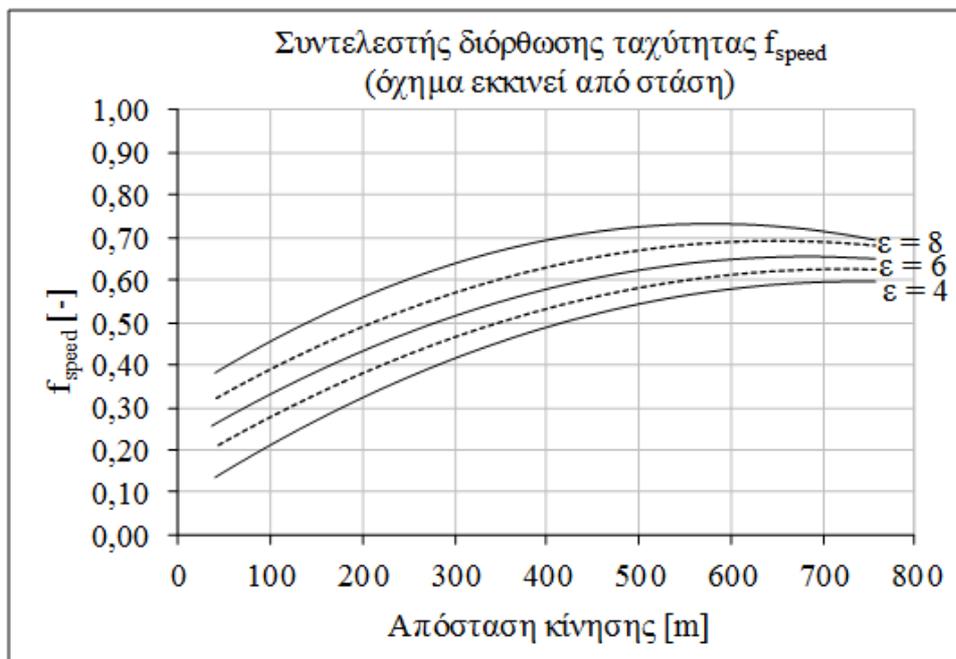
$$\varepsilon = \frac{P_{mach}}{G_{load} + G_{truck}} \quad (\text{εξ. 2.28})$$

Η μέθοδος BML (1983) προσδιορίζει τον συντελεστή ταχύτητας (f_{speed}) σύμφωνα με το νομογράφημα του Σχήματος 2.20 και το σχετικό υπόμνημα. Θα πρέπει να τονιστεί πως εάν το έδαφος είναι ιδιαίτερα ανώμαλο ή σε κακή κατάσταση, τότε η μέγιστη ταχύτητα δεν εξαρτάται από τη δυνατότητα του οχήματος, αλλά από τη μορφολογία του εδάφους και πιο συγκεκριμένα από το βάθος των αυλακώσεων και τον λόγο της οριζόντιας

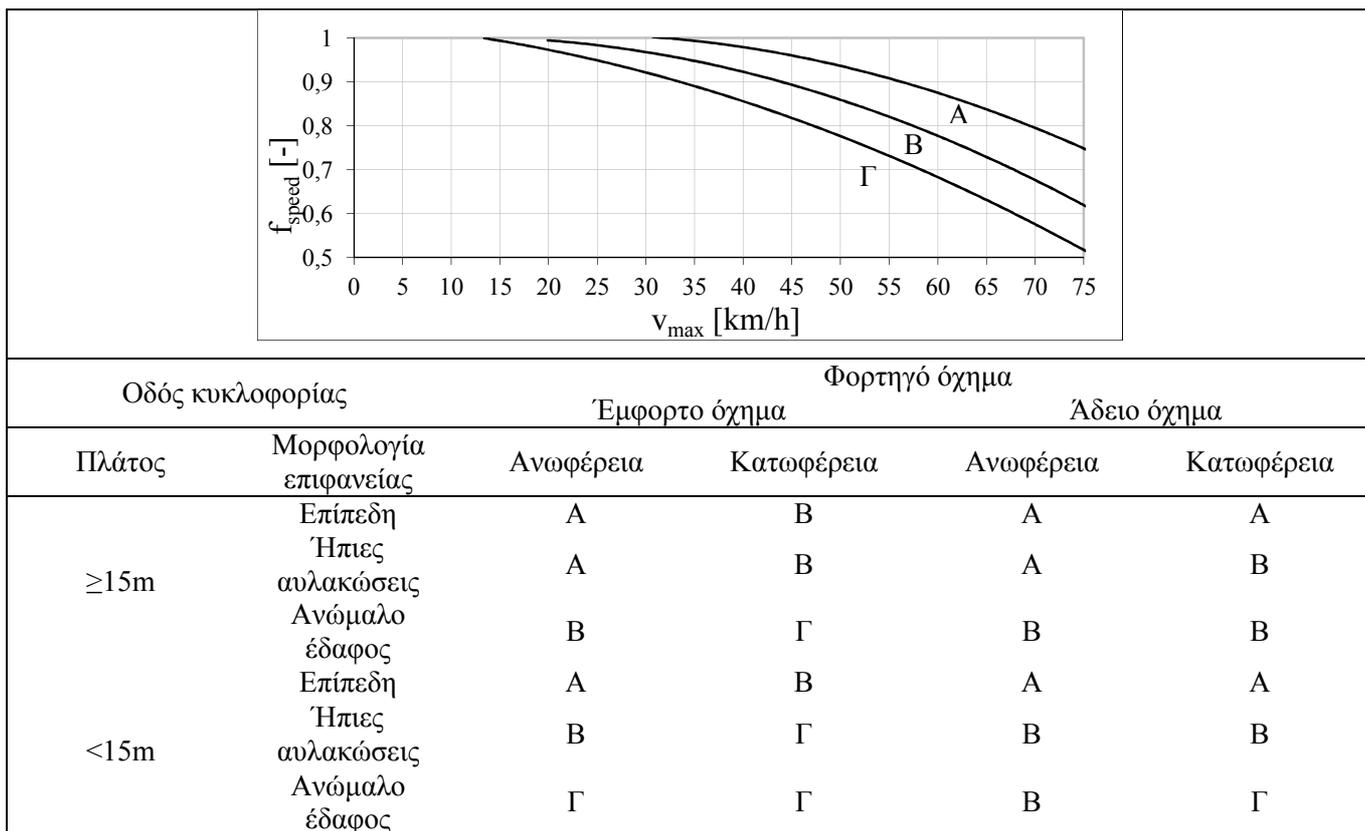
απόστασης των κορυφών των αυλακώσεων προς την αξονική απόσταση των τροχών του οχήματος (Σχήμα 2.21) (Kühn (1984; σελ. 183)):



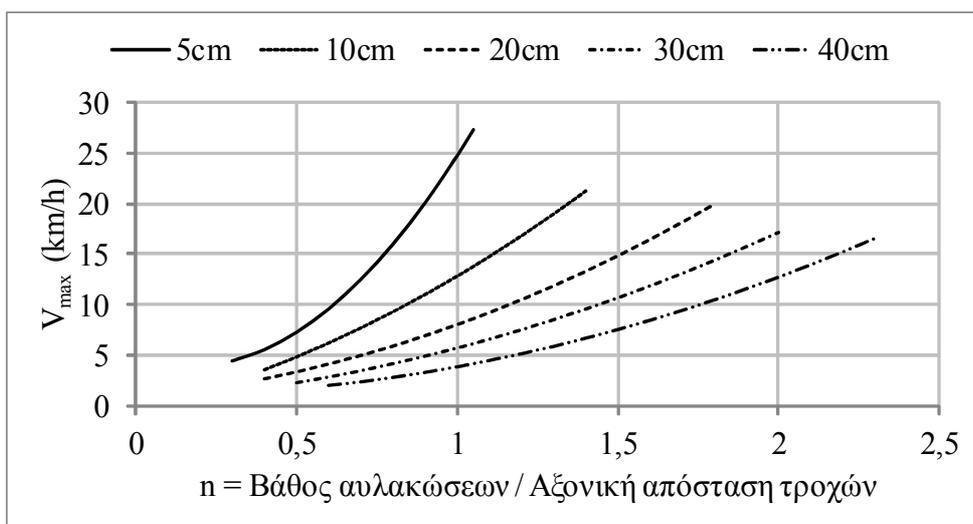
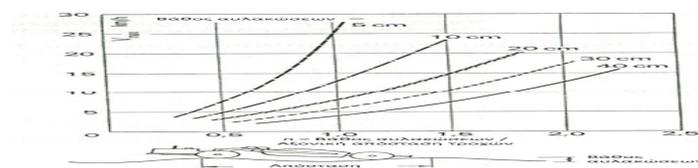
Σχήμα 2.18: Συντελεστής ταχύτητας (f_{speed}) για όχημα σε κίνηση (προσαρμοσμένο από Kühn (1984; σελ. 182))



Σχήμα 2.19: Συντελεστής ταχύτητας (f_{speed}) για όχημα που εκκινεί από στάση (προσαρμοσμένο από Kühn (1984; σελ. 182))



Σχήμα 2.20: Συντελεστής ταχύτητας (f_{speed}) σε συνάρτηση με τη μορφολογία της οδού κυκλοφορίας (προσαρμοσμένο από BML, 1983; σελ. 55)



Σχήμα 2.21: Εκτίμηση μέγιστης ταχύτητας λαστιχοφόρου οχήματος σε ανώμαλο δρόμο (προσαρμοσμένο από Kühn (1984; σελ. 183))

III.3. Σταθεροί χρόνοι φορτηγού αυτοκινήτου (t_{dump} , t_{wait} , t_{change})

Οι σταθεροί χρόνοι υπολογίζονται προσεγγιστικά από τους Πίνακες 2.11 και 2.12 παρακάτω:

Πίνακας 2.11: Χρόνος απόθεσης υλικού (t_{dump}) φορτηγού αυτοκινήτου

| Μέθοδος εκτίμησης παραγωγικότητας | Χρόνος απόθεσης (t_{dump}) [min] | |
|--|--|---|
| | Απόθεση με ανατροπή (rear-dump truck) | Απόθεση κάτω από την σκάφη (bottom-dump truck) |
| Bauer (2007), BML (1983), Garbotz (1966), Hoffmann (2006) | 0,50 – 0,70 | |
| Girmscheidt (2010) | 1,00 | 0,30 |
| Peurifoy and Schexnayder (2002) | 0,70 – 2,00 | 0,30 – 1,50 |
| Kühn (1984) | 1,00 – 2,00 | 0,30 – 1,50 |
| Hüster (2005) | 0,50 – 2,50 | |
| Nunally (2007) | 0,50 – 2,50 | 1,10 – 2,00 |
| Komatsu (2013) | 0,50 – 2,00 | - |
| Caterpillar (2016) | 1,00 – 1,20 | |

Πίνακας 2.12: Χρόνος εναλλαγής φορτηγών στον χώρο φόρτωσης (t_{change})

| Μέθοδος εκτίμησης παραγωγικότητας | Χρόνος εναλλαγής (t_{change}) [min] | |
|--|---|----------------|
| | Εμπρόσθια κίνηση | Οπίσθια κίνηση |
| Bauer (2007), BML (1983), Garbotz (1966), Hoffmann (2006) | 0,30 – 0,50 | |
| Girmscheidt (2010) | 0,00 | 0,40 – 0,60 |
| Kühn (1984) | 0,15 – 0,50 | 0,15 – 1,00 |
| Hüster (2005) | 0,20 | 0,50 |
| Komatsu (2013) | 0,10 – 0,50 | - |
| Caterpillar (2016) | 0,60 – 0,80 | |

Ο χρόνος αναμονής (t_{wait}) δεν προσδιορίζεται ποσοτικά από κάποια μέθοδο, αλλά τονίζεται ότι στόχος είναι η εξάλειψή του, δηλ. η ιδανική συναρμογή του φορτηγού (ή του στόλου των φορτηγών) με το φορτωτικό μέσο. Οι Hoffmann (2006) και Bauer (2007) υιοθετούν τις προτάσεις της BML (1983).

IV. Προωθητής

Ο χρόνος κύκλου του προωθητή δίνεται από τη σχέση (εξ. 2.29):

$$t_{th,dozer} = t_{work} + t_{travel} + \Delta t \quad (\text{εξ. 2.29})$$

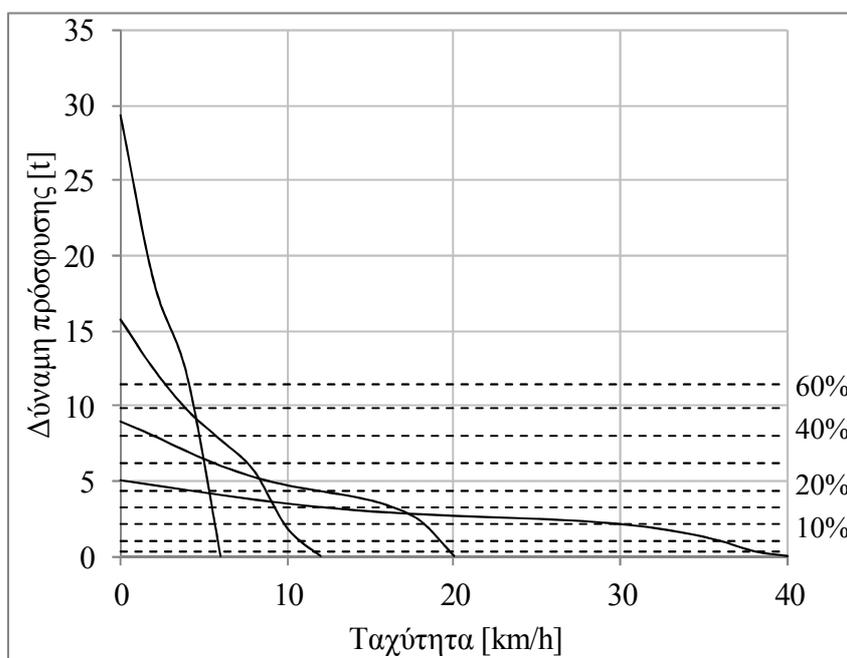
Όπου t_{work} = ο χρόνος εργασίας του μηχανήματος (π.χ. προώθηση, εκσκαφή, ισοπέδωση), t_{travel} = ο χρόνος μετάβασης/επιστροφής, Δt = πρόσθετος χρόνος που εξαρτάται από τις συνθήκες εργασίας (π.χ. ελιγμοί).

IV.1. Χρόνος εργασίας (t_{work})

Ο χρόνος εργασίας (t_{work}) ορίζεται από το πηλίκο της απόστασης εκσκαφής ή προώθησης προς την ταχύτητα κίνησης του προωθητή. Συνήθως, αυτή είναι μικρή και κυμαίνεται μεταξύ 2,5km/h και 4,0km/h (Peurifoy and Schexnayder, 2002; σελ 168) για εργασίες εκσκαφής ή προώθησης γαιών σε απόσταση μικρότερη των 30m (Nunally, 2007; σελ. 96). Φυσικά, κάθε φορά θα πρέπει να ελέγχεται ότι η διατιθέμενη δύναμη του μηχανήματος είναι μεγαλύτερη από την συνολική αντίσταση (χαλάρωσης, πλήρωσης) που αναπτύσσεται στη φάση της εκσκαφής (Kühn (1984; σελ. 187) και Εφραιμίδης (2002; σελ. 440-442)).

IV.2. Χρόνος μετάβασης/επιστροφής (t_{travel})

Ο χρόνος μετάβασης/επιστροφής (t_{travel}) εξαρτάται από την μέγιστη ταχύτητα κίνησης του προωθητή. Ενδεικτικές τιμές δίνονται από σχετικά νομογραφήματα ταχείας εκτίμησης της ταχύτητας του μηχανήματος, όπως αυτό του Σχήματος 2.22 που αφορά στον ελαστικοφόρο προωθητή (wheel dozer) Caterpillar 814F2 (173 kW / 232 hp) (Caterpillar, 2016; σελ. 22-4). Αντίστοιχα νομογραφήματα δίνονται από τις Komatsu (2013) και Liebherr (2003) και συστήνονται για εφαρμογή από τους Peurifoy and Schexnayder (2002) και Nunally (2007). Αφού υπολογιστεί η μέγιστη ταχύτητα, τότε εκτιμάται η μέση ταχύτητα κίνησης (v_i) με χρήση της εξ. 2.27 που ορίστηκε για τα φορτηγά αυτοκίνητα. Μόνο ο Kühn (1984; σελ. 185) ορίζει κάποιον συντελεστή ταχύτητας για τον προωθητή (f_{speed}) ο οποίος ισούται με 1,0 για v_{max} έως 4km/h και μειώνεται έως και την τιμή 0,65 για $v_{max} = 20$ km/h (Πίνακας 2.13).



Σχήμα 2.22: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης ταχύτητας του προωθητή Caterpillar 814F2 (Caterpillar 2016; σελ. 22-4)

Πίνακας 2.13: Τιμές συντελεστή ταχύτητας προωθητή (f_{speed}) κατά Kühn (1984; σελ. 185)

| Μέγιστη ταχύτητα (v_{max}) | Συντελεστής ταχύτητας (f_{speed}) |
|--------------------------------|---------------------------------------|
| 2 – 5 km/h | 1,00 |
| 5 – 10 km/h | 0,90 |
| 10 – 15 km/h | 0,75 |
| 15 – 20 km/h | 0,65 |

IV.3. Πρόσθετος χρόνος (Δt)

Ο πρόσθετος χρόνος αφορά στον απαραίτητο χρόνο για ελιγμούς ή τον χρόνο που απαιτείται για την επιτάχυνση του μηχανήματος μέχρι να αποκτήσει την τελική του ταχύτητα. Οι τιμές προσδιορίζονται ad hoc, αλλά συνήθως κυμαίνονται μεταξύ 3-8s (Hüster, 2005). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο χρόνος κύκλου του προωθητή συναρτάται κυρίως με (α) τον τύπο του εδάφους, (β) την απόσταση προώθησης των γαιών και (γ) το είδος της εργασίας. Ο Hüster (2005; σελ. 70-72) έχει καταστρώσει νομογραφήματα για τον υπολογισμό του χρόνου κύκλου προωθητή ($t_{th,dozer}$) και διακρίνει δύο τύπους εργασίας: (i) χαλάρωση του εδάφους και προώθηση σε σχέση με την κατηγορία του εδάφους και (ii) εργασίες επίχωσης και ισοπέδωσης σε σχέση με τον αριθμό διελεύσεων του προωθητή (Σχήμα 2.23). Οι βασικές παραδοχές του νομογραφήματος είναι: ταχύτητα εκσκαφής 3-5km/h, ταχύτητα επιστροφής 6km/h για μηχανήματα με 25-35kW ανά m² επιφάνειας κοπτήρα. Οι υπόλοιπες μέθοδοι της Γερμανικής βιβλιογραφίας (Bauer, 2007; BML 1983; Garbotz, 1966; Girmscheidt, 2010; Hoffmann, 2006) δεν δίνουν συγκεκριμένες τιμές του χρόνου κύκλου προωθητή, αλλά προτείνουν την ταχεία προεκτίμηση της παραγωγικότητας από σχετικά νομογραφήματα, όπως θα εξηγηθεί στην ενότητα §2.5.6.

V. Αποξεστικό

Ο χρόνος κύκλου του αποξεστικού δίνεται από τις εξ. 2.30 και 2.31 (Bauer, 2007; Kühn 1984; Girmscheidt, 2010):

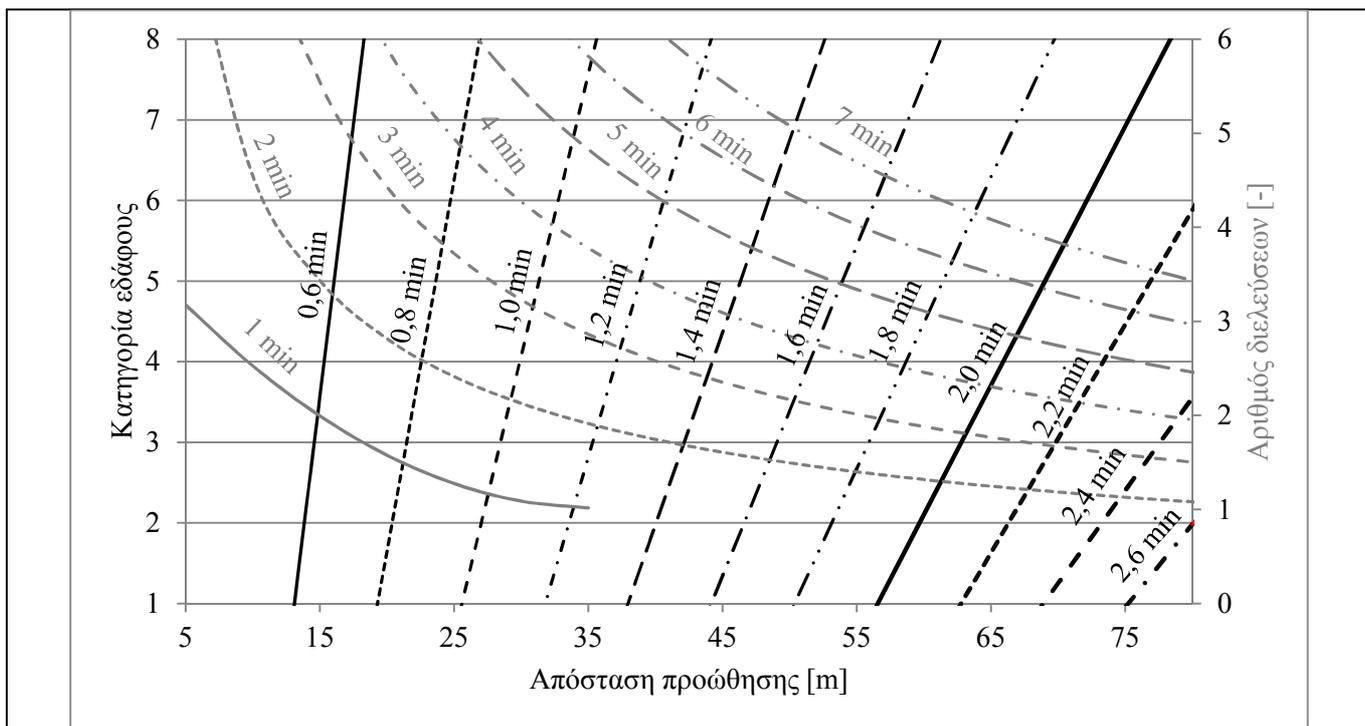
$$t_{th,scraper} = t_{fill} + t_{travel} + t_{dump} + t_{maneu} \quad (\text{εξ. 2.30})$$

$$t_{th,scraper} = t_{fill} + t_{tran} + t_{dump} + t_{ret} + t_{maneu} \quad (\text{εξ. 2.31})$$

Όπου t_{fill} = ο χρόνος πλήρωσης της σκάφης, t_{travel} = ο χρόνος κίνησης (μετάβαση και επιστροφή), t_{tran} = ο χρόνος μετάβασης (έμφορτο), t_{dump} = ο χρόνος απόθεσης, t_{ret} = ο χρόνος επιστροφής (άδειο), t_{maneu} = ο χρόνος ελιγμών.

V.1. Χρόνος πλήρωσης της σκάφης (t_{fill})

Ο χρόνος πλήρωσης της σκάφης (t_{fill}) εξαρτάται από την αντίσταση του εδαφικού υλικού κατά τη διάρκεια της φόρτωσης της σκάφης του αποξεστικού οχήματος. Οι Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 220) διευκρινίζουν ότι όσο εξελίσσεται η φόρτωση της σκάφης, τόσο αυξάνεται η αντίσταση του υλικού και απομειώνεται η απόδοση του μηχανήματος (Σχήμα 2.24).



Υπόμνημα:

[1-2]: Κερματισμένος βράχος, διάμετρος χαλίκων <250mm

[2-3]: Πολύ σκληρή άργιλος

[3-4]: Κερματισμένος βράχος, διάμετρος χαλίκων <250mm

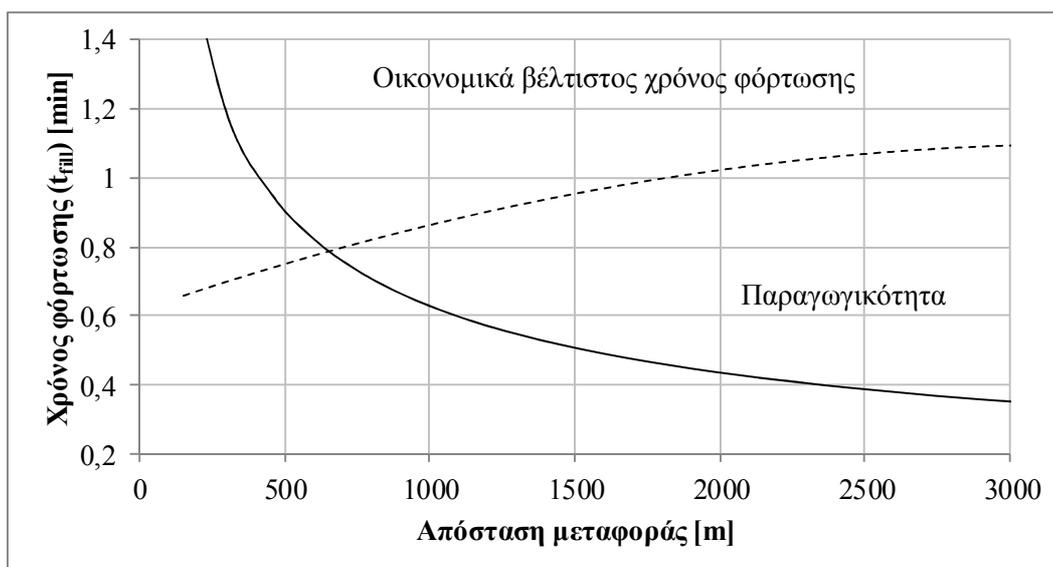
[4-5]: Σκληρή άργιλος

[5-6]: Μαλακή άργιλος

[6-7]: Ελαφρώς συνεκτικό έδαφος

[7-8]: Αμμοχάλικο

Σχήμα 2.23: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης χρόνου κύκλου προωθητή κατά Hüster (2005)



Σχήμα 2.24: Οικονομικά βέλτιστος χρόνος φόρτωσης αποξεστικού οχήματος (προσαρμοσμένο από Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 220))

Πίνακας 2.14: Τιμές χρόνου φόρτωσης σκάφης και απόρριψης υλικού / ελιγμών αποξεστικού κατά Caterpillar (2016; σελ. 24-17)

| Μοντέλο | Φόρτωση από | Χρόνος φόρτωσης [min] | Χρόνος ελιγμών και απόρριψης [min] |
|---------|-------------|-----------------------|------------------------------------|
| 621K | D8 | 0,50 | 0,70 |
| 627K | D9 | 0,40 | 0,60 |
| 631K | D9 | 0,60 | 0,70 |
| 637K | D10 | 0,50 | 0,60 |
| 657G | D11 | 0,60 | 0,60 |

Βασική προϋπόθεση για την φόρτωση της σκάφης του αποξεστικού είναι ο συνυπολογισμός των δυνάμεων αντίστασης του εδαφικού υλικού σε σχέση με το βάθος κοπής, έτσι ώστε να μην εξαντλούνται οι δυνατότητες του μηχανήματος. Όσον αφορά στους κατασκευαστές μηχανικού εξοπλισμού, η Caterpillar (2016; σελ. 24-17) καθορίζει προσεγγιστικές τιμές για τον χρόνο πλήρωσης της σκάφης, καθώς και για τον χρόνο απόρριψης υλικού / ελιγμών, σύμφωνα με τον Πίνακα 2.14, ενώ η Komatsu (2013) και η Liebherr (2003) δεν παρέχουν δεδομένα για αποξεστικά οχήματα. Ο Nunally (2007; σελ. 109) δίνει ενδεικτικές τιμές του χρόνου πλήρωσης σε σχέση με τις συνθήκες εργασίας: ευμενείς (0,50-0,80min), μέτριες (0,70-1,00min), δυσμενείς (1,30-1,50min). Ο Hoffmann (2006; σελ. 631) θεωρεί ένα τυπικό εύρος του χρόνου κύκλου από 0,80-2,00min. Όμως, διευκρινίζει ότι σε περίπτωση που η κίνηση του μηχανήματος είναι σε κατωφέρεια, ο χρόνος θα πρέπει να απομειωθεί κατά 25-35%, ενώ για πλάγια φόρτωση (oblique loading) ο χρόνος θα πρέπει να αυξηθεί κατά 30-50%. Ο προσδιορισμός του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης (optimum load time) του αποξεστικού αποτελεί ένα ανοιχτό ερευνητικά πεδίο, καθώς έχει αποδειχθεί ότι η φόρτωση μέχρι την πλήρωση της σκάφης μειώνει την ωριαία παραγωγικότητα (Nunally, 2007). Συνεπώς, σκοπός είναι η εύρεση της βέλτιστης σχέσης όγκου φόρτωσης – χρόνου πλήρωσης, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το μοναδιαίο κόστος παραγωγής. Πιο πρόσφατες ερευνητικές προσπάθειες σε αυτόν τον τομέα έχουν δημοσιευθεί από τους Kaboli and Carmichael (2014) και Marinelli and Lambropoulos (2013).

V.2. Χρόνος κίνησης του αποξεστικού (t_{travel})

Ο χρόνος κίνησης του αποξεστικού (t_{travel}) εκτιμάται από το πηλίκο της απόστασης μεταφοράς προς τη μέση ταχύτητα του μηχανήματος (εξ. 2.27). Η μέγιστη ταχύτητα υπολογίζεται από νομογραφήματα των κατασκευαστών μηχανικού εξοπλισμού (π.χ. Caterpillar 2016; σελ. 24-19 CAT 621K), ενώ για τον προσδιορισμό του συντελεστή ταχύτητας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο Πίνακας 2.13 που αφορά στους προωθητές.

V.3. Χρόνος απόθεσης υλικού (t_{dump})

Ο χρόνος απόθεσης υλικού (t_{dump}) εκτιμάται προσεγγιστικά από τους Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 221) σύμφωνα με τον Πίνακα 2.15 παρακάτω. Ο Hoffmann (2006; σελ. 631) θεωρεί πως ο χρόνος απόθεσης είναι της

τάξης του 0,50min. Ο Nunally (2007; σελ. 109) δίνει ενδεικτικές τιμές του χρόνου απόθεσης σε σχέση με τις συνθήκες εργασίας: ευμενείς (0,30min), μέτριες (0,60-0,70min), δυσμενείς (0,90-1,00min).

Πίνακας 2.15: Χρόνος απόθεσης υλικού (t_{dump}) αποξεστικού οχήματος (Peurifoy and Schexnayder, 2002; σελ. 221)

| Χωρητικότητα σκάφης [m ³] | t_{dump} [min] | |
|---------------------------------------|------------------|----------------------------------|
| | Ένας κινητήρας | Δύο κινητήρες ("Tandem-powered") |
| <33 | 0,30 | - |
| 33-44 | 0,37 | 0,26 |
| 44-57 | 0,44 | 0,28 |

V.4. Χρόνος ελιγμών ($t_{maneuver}$)

Ο χρόνος ελιγμών ($t_{maneuver}$) εκτιμάται προσεγγιστικά στο διάστημα 0,20-0,30 min σύμφωνα με τους Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 221), ενώ για τον Nunally (2007) ο χρόνος ελιγμών εμπεριέχεται στον χρόνο απόθεσης, όπως προσδιορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Ο Hoffmann (2006; σελ. 631) θεωρεί πως ο χρόνος ελιγμών εμπεριέχει και τον χρόνο αναμονής και κυμαίνεται στο διάστημα 0,75-1,50min.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που η φόρτωση του αποξεστικού γίνεται με τη βοήθεια προωθητή-ταύρου, τότε ο χρόνος κύκλου του προωθητή εξαρτάται από τη μέθοδο εργασίας (back-track loading, chain loading, shuttle loading). Όταν η ώθηση του αποξεστικού γίνεται στην κατεύθυνση της μεταφοράς (back-track loading), τότε ο χρόνος κύκλου του προωθητή δίνεται από την εξ. 2.32 (Peurifoy and Schexnayder, 2002; σελ. 223):

$$t_{th,dozer} = 1,4 \times t_{fill} + 0,25 \quad (\text{εξ. 2.32})$$

Ο χρόνος κύκλου του προωθητή μειώνεται για τις άλλες δύο μεθόδους (chain loading, shuttle loading), αλλά δεν διατυπώνεται αναλυτική σχέση για τον υπολογισμό του. Οι υπόλοιπες μέθοδοι της Γερμανικής βιβλιογραφίας (Bauer, 2007; BML 1983; Garbotz, 1966; Girmscheidt, 2010) δεν δίνουν συγκεκριμένες τιμές του χρόνου κύκλου αποξεστικού, αλλά προτείνουν την ταχεία προεκτίμηση της παραγωγικότητας από σχετικά νομογραφήματα, όπως θα εξηγηθεί στην ενότητα §2.5.6.

VI. Ισοπεδωτής

Ο ισοπεδωτής δεν σχετίζεται ευθέως με την έννοια του χρόνου κύκλου, καθώς δεν είναι σαφώς μηχανήμα κυκλικής λειτουργίας. Ουσιαστικά, η παραγωγικότητα του ισοπεδωτή εξαρτάται από την ταχύτητα κίνησης (v_{grader}) και το ενεργό μήκος της λεπίδας (L_e). Ενδεικτικές τιμές της ταχύτητας ανάλογα με τον τύπο του εδάφους δίνονται από την Caterpillar (2016; σελ. 11-27), την Komatsu (2013; σελ. 14A-20), τον Hüster (2005; σελ. 77) και τον Nunally (2007; σελ. 151) στον Πίνακα 2.16 παρακάτω. Η Liebherr (2003) δεν δίνει σχετικά δεδομένα, ενώ ο Girmscheidt (2010) υιοθετεί τις προτάσεις της Caterpillar. Ο Hoffmann (2006; σελ. 629) θεωρεί ότι η μέση ταχύτητα του ισοπεδωτή σε εργοταξιακές συνθήκες κυμαίνεται στο εύρος 8-10km/h, ενώ για εργασίες

συντήρησης οδοστρώματος το εύρος είναι 10-20km/h. Ο Kühn (1984; σελ. 203) τονίζει ότι σε εξειδικευμένες εργασίες (π.χ. κατασκευή αεροδρομίων, γηπέδων κτλ) απαιτούνται 2-3 διελεύσεις του ισοπεδωτή με μέση ταχύτητα 5-6km/h ή 1-2 διελεύσεις του ισοπεδωτή με μέση ταχύτητα 8-10km/h. Οι υπόλοιπες μέθοδοι της Γερμανικής βιβλιογραφίας (Bauer, 2007; BML 1983; Garbotz, 1966) δεν υπεισέρχονται στον αναλυτικό υπολογισμό της ταχύτητας, αλλά προτείνουν την ταχεία προεκτίμηση της παραγωγικότητας από σχετικά νομογραφήματα, όπως θα εξηγηθεί στην ενότητα §2.5.6.

Πίνακας 2.16: Τιμές ταχύτητας ισοπεδωτή (v_{grader})

| Τύπος εδάφους | Ταχύτητα ισοπεδωτή (v_{grader}) [km/h] | | | |
|-------------------------|--|---------------------------|------------------------------|-------------------------|
| | Caterpillar (2016; σ. 221) | Nunally (2007; σ. 151) | Komatsu (2013; σ. 14A-20) | Hüster (2005; σ. 77) |
| Τελική διαμόρφωση | 0 – 4 | 6,5 – 14,5 | 2 – 8 | 10 – 15 |
| Εργασία σε ανοιχτό χώρο | 0 – 9 | - | 1,6 – 4 | 5 – 7 |
| Διαμόρφωση πρανούς | 0 – 5 | 4,0 | 1,6 – 2,6 | 6 – 10 |
| Απόξεση | 0 – 5 | 4,0 – 6,4 | 1,6 – 4 | 6 – 8 |
| Συντήρηση οδοστρώματος | 5 – 16 | 6,4 – 9,7 | 2 – 6 | 6 – 8 |
| Εκχιονισμός | 7 – 28 | 19,3 – 32,3 | 7 – 25 | - |

Το ενεργό μήκος της λεπίδας συναρτάται με την γωνία υπό την οποία εκτελεί ο ισοπεδωτής την εργασία. Ενδεικτικές τιμές δίνονται από την Caterpillar (2016; σελ. 11-28) και την Komatsu (2013; σελ. 14A-20) στον Πίνακα 2.17 παρακάτω. Το μήκος επικάλυψης της λεπίδας (L_{θ}) λαμβάνεται σταθερό και συνήθως ισούται από 0,60m (Caterpillar, 2016) έως 0,90m (Girmscheidt, 2010). Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν δίνουν δεδομένα για τον προσδιορισμό του ενεργού μήκους λεπίδας.

Πίνακας 2.17: Ενεργό μήκος λεπίδας (L_e)

| Ονομαστικό μήκος λεπίδας (L_{rated}) | Caterpillar (2016; σελ. 11-28) | | Komatsu (2013; σ. 14A-20) |
|---|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Ενεργό μήκος για γωνία 30° | Ενεργό μήκος για γωνία 45° | Ενεργό μήκος για γωνία 60° |
| 3,658 | 3,17 | 2,59 | 3,20 |
| 3,962 | 3,43 | 2,80 | 3,50 |
| 4,267 | 3,70 | 3,02 | 3,70 |
| 4,877 | 4,22 | 3,45 | 4,20 |
| 7,315 | 6,33 | 5,17 | - |

VII. Δομικός πυργογερανός ή οικοδομικός γερανός

Ο χρόνος κύκλου του οικοδομικού γερανού αναλύεται στις επιμέρους κινήσεις του γερανού, δηλ. χρόνος για ανύψωση / κατάβαση του φορτίου, χρόνος στροφής προβόλου γερανού, χρόνος πορείας του φορείου, χρόνος δέσμευσης / αποδέσμευσης του φορτίου από τον γερανό. Ενδεικτικές τιμές δίνονται από τον Πίνακα 2.18 παρακάτω (Girmscheidt, 2010; σελ. 229):

Πίνακας 2.18: Ανάλυση του χρόνου κύκλου ($t_{th,crane}$) [s] οικοδομικού γερανού (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 229)

| Χρόνος | Μονάδα μέτρησης | Περιγραφή | Τιμές |
|------------------------|-----------------|---------------------------------|-----------|
| t_{lift} / t_{lower} | [s/m] | Ανύψωση / κατάβαση του φορτίου | 1 – 20 |
| t_{swing} | [s/α] | Στροφή του προβόλου του γερανού | 0,1 – 0,2 |
| t_{move} | [s/m] | Κίνηση / πορεία του φορείου | 1 – 3 |
| t_{attach} | [s] | Χρόνος δέσμευσης του φορτίου | 30 – 180 |
| t_{detach} | [s] | Χρόνος αποδέσμευσης του φορτίου | 30 – 180 |

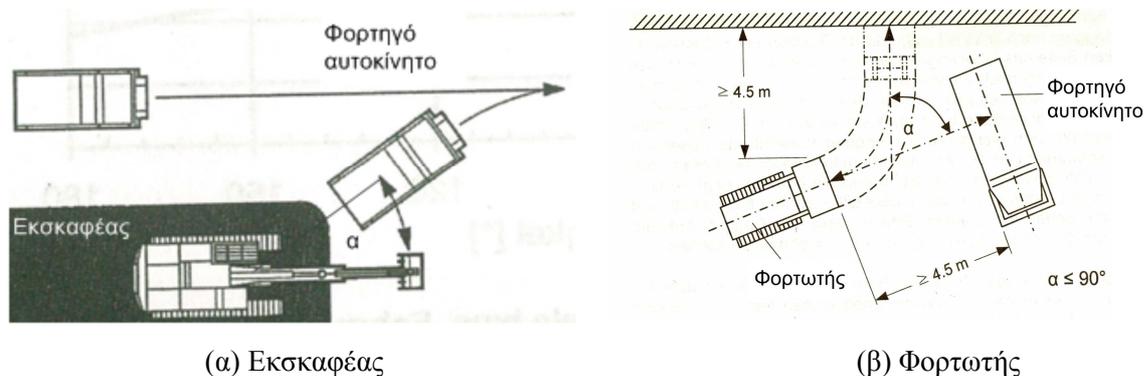
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι καλοί χειριστές επιτυγχάνουν επικαλύψεις μεταξύ των παραπάνω χρόνων (π.χ. στροφή προβόλου γερανού ταυτόχρονα με ανύψωση του φορτίου), συνεπώς ο χρόνος κύκλου ενδέχεται να μειωθεί ακόμη περισσότερο (Hoffmann, 2006). Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν αναφέρουν συγκεκριμένα δεδομένα παραγωγικότητας για τον δομικό πυργογερανό.

2.5.5. Συντελεστές παραγωγικότητας (f_x)

Οι συντελεστές παραγωγικότητας, μέσω των διορθωτικών πολλαπλασιαστών τους (f_x), εκφράζουν την επιρροή των πραγματικών συνθηκών στην παραγωγικότητα των δομικών μηχανών. Οι συντελεστές παραγωγικότητας που αναφέρονται στη βιβλιογραφία συνοψίζονται στον Πίνακα 2.19 και περιγράφονται αναλυτικότερα στις επόμενες παραγράφους.

I. Συντελεστής γωνίας στροφής (f_{swing})

Ο συντελεστής γωνίας στροφής (f_{swing}) ορίζεται για τον εκσκαφέα και τον φορτωτή. Εκφράζει την επιρροή της γωνίας στροφής του προβόλου του εκσκαφέα ή του φορτωτή από τη θέση εκσκαφής / φόρτωσης στη θέση απόθεσης (Σχήμα 2.25). Η τυπική τιμή της γωνίας στροφής είναι $\alpha=90^\circ$. Για $\alpha>90^\circ$ ο συντελεστής είναι μειωτικός, ενώ για $\alpha<90^\circ$ είναι αυξητικός (Hüster, 2005; Kotte, 1997; Nunally, 2007). Η γερμανική βιβλιογραφία (Bauer, 2007; Garbotz, 1966; Girmscheidt, 2010; Hoffmann, 2006; Hüster, 2005; Kotte, 1997; Kühn, 1984) υιοθετεί τις προτάσεις της BML (1983; σελ. 6/17/26), οποία δίνει ενδεικτικές τιμές του συντελεστή που διαφοροποιούνται ανάλογα με τον τύπο του μηχανήματος (π.χ. υδραυλικός / μηχανικός εκσκαφέας, φορτωτής) και τον τύπο του κάδου για την περίπτωση του μηχανικού εκσκαφέα (μετωπικός / συρόμενος), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.26.



Σχήμα 2.25: Γωνία στροφής εκσκαφέα / φορτωτή σύμφωνα με τον Girmscheidt (2010)

Πίνακας 2.19: Συγκριτική απεικόνιση των συντελεστών παραγωγικότητας (α) ανά μηχάνημα και (β) μέθοδο εκτίμησης παραγωγικότητας

| (α) | Δομικό Μηχάνημα (βλέπε Πίνακα 2.2 / Σχήμα 2.3) | | | | | | | | | |
|-----|--|---|---|---|---|--|---|---|---|---|
| | D.1 | D.3 | P.2 | D.4 | D.5 | D.7 | C.0 | B.7 | | |
| A/A | Συντελεστής... | Σύμβολο |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 | Γωνίας στροφής | f_{swing} | ✓ | ✓ | | | | | | |
| 2 | Βάθους εκσκαφής ή ύψους φόρτωσης | f_{depth} ή f_{height} | ✓ | ✓ | | | | | | |
| 3 | Γωνίας στροφής – βάθους / ύψους εκσκαφής | $f_{\text{swing-depth}}$ / $f_{\text{swing-height}}$ | ✓ | ✓ | | | | | | |
| 4 | Εκκένωσης του κάδου | f_{dump} | ✓ | ✓ | | | | | | |
| 5 | Συναρμογής όγκου υλικού | f_{vol} | ✓ | ✓ | | | | | | |
| 6 | Φθοράς δοντιών κάδου | f_{wear} | ✓ | ✓ | | | | | | |
| 7 | Υψομέτρου εργασίας | f_{alt} | ✓ | | | | | | | |
| 8 | Τύπου κοπήρα | f_{blade} | | | | ✓ | | | | |
| 9 | Κλίσης εδάφους | f_{grade} | | | | ✓ | | | | |
| 10 | Μεθόδου εργασίας | f_{method} | | | | ✓ | | | | |
| 11 | Κατάστασης χώρου εργασίας | $f_{\text{condition}}$ | | | | ✓ | ✓ | | | |
| 12 | Διαθεσιμότητας μηχανήματος | f_{avail} | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 13 | Ικανότητας χειριστή | f_{skill} | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 14 | Συναρμογής χρόνων κύκλου | f_{match} | | | ✓ | | | | | |
| 15 | Πλήρωσης σωλήνα αντλίας | f_{hose} | | | | | | | | ✓ |
| 16 | Ακρίβειας σκυροδέτησης | f_{concrete} | | | | | | | | ✓ |
| 17 | Εκμετάλλευσης μηχανήματος | f_E | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

Οι συντελεστές παραγωγικότητας αναφέρονται στις ακόλουθες μεθόδους εκτίμησης παραγωγικότητας:

¹Bauer (2007); BML (1983); Garbotz (1966); Girmscheidt (2010); Hoffmann (2006); Hüster (2005); Kotte (1997); Kühn (1984)

²Bauer (2007); BML (1983); Garbotz (1966); Girmscheidt (2010); Hoffmann (2006); Hüster (2005); Komatsu (2013); Kotte (1997); Kühn (1984)

³Nunally (2007); Peurifoy and Schexnayder (2002)

⁴Bauer (2007); BML (1983); Garbotz (1966); Hüster (2005); Kotte (1997); Kühn (1984)

⁵Bauer (2007); Garbotz (1966); Girmscheidt (2010); Hoffmann (2006); Hüster (2005); Kotte (1997); Kühn (1984)

⁶Bauer (2007); Garbotz (1966); Girmscheidt (2010); Kotte (1997)

⁷Garbotz (1966); Kotte (1997)

⁸BML (1983); Girmscheidt (2010); Hoffmann (2006); Hüster (2005); Komatsu (2013); Liebherr (2003)

⁹BML, (1983); Caterpillar (2016); Girmscheidt (2010); Komatsu (2013); Liebherr (2003)

¹⁰Caterpillar (2016); Peurifoy and Schexnayder (2002)

¹¹Caterpillar (2016); Hoffmann (2006); Liebherr (2003)

¹²Garbotz (1966); Girmscheidt (2010); Hüster (2005); Kotte (1997)

¹³Caterpillar (2016); Garbotz (1966); Girmscheidt (2010); Hüster (2005); Kotte (1997); Kühn (1984); Liebherr (2003); Peurifoy and Schexnayder (2002)

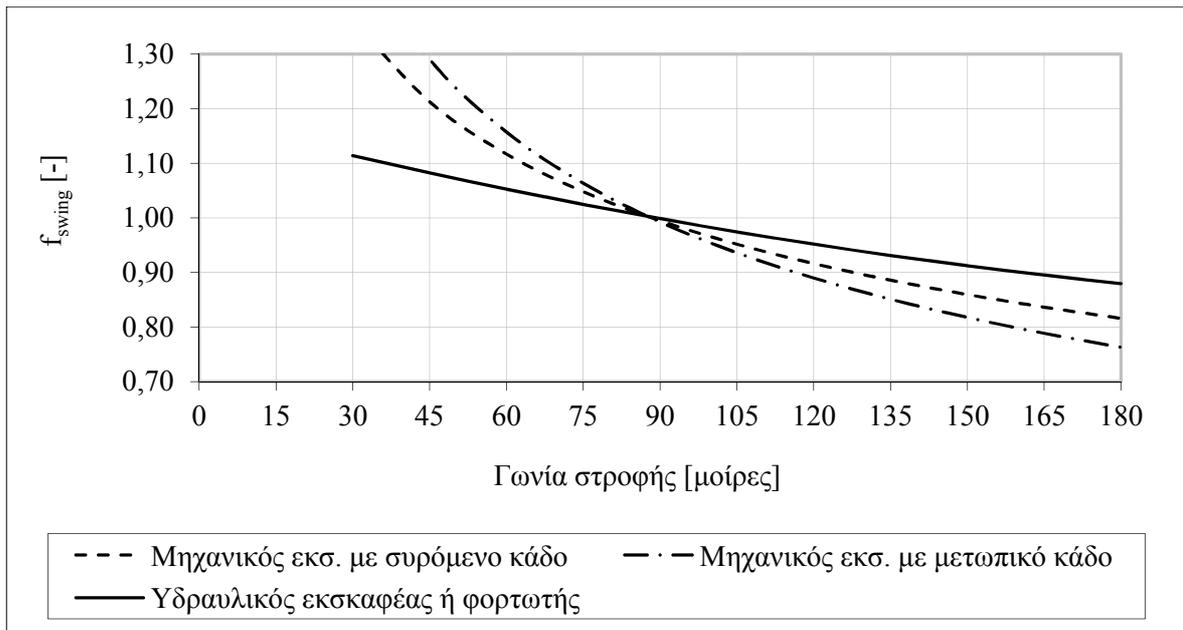
¹⁴Bauer (2007); BML (1983); Caterpillar (2016); Garbotz (1966); Girmscheidt (2010); Hoffmann (2006); Hüster (2005); Kühn (1984)

^{15,16}Girmscheidt (2010)

¹⁷Όλες οι μέθοδοι

(β)

| A/A | Μέθοδος... | Συντελεστές παραγωγικότητας |
|-----|---------------------------------|---|
| 1 | Bauer (2007) | $f_{\text{swing}}, f_{\text{depth}} \text{ ή } f_{\text{height}}, f_{\text{dump}}, f_{\text{blade}}, f_{\text{grade}}, f_{\text{vol}}, f_{\text{wear}}, f_{\text{match}}, f_E$ |
| 2 | BML (1983) | $f_{\text{swing}}, f_{\text{depth}} \text{ ή } f_{\text{height}}, f_{\text{dump}}, f_{\text{blade}}, f_{\text{grade}}, f_{\text{match}}, f_{\text{vol}}, f_E$ |
| 3 | Caterpillar (2016) | $f_{\text{grade}}, f_{\text{method}}, f_{\text{condition}}, f_{\text{skill}}, f_{\text{match}}, f_E$ |
| 4 | Edwards and Holt (2000) | f_E |
| 5 | Garbotz (1966) | $f_{\text{swing}}, f_{\text{depth}} \text{ ή } f_{\text{height}}, f_{\text{dump}}, f_{\text{blade}}, f_{\text{grade}}, f_{\text{vol}}, f_{\text{wear}}, f_{\text{alt}}, f_{\text{avail}}, f_{\text{skill}}, f_{\text{match}}, f_E$ |
| 6 | Girmscheidt (2010) | $f_{\text{swing}}, f_{\text{depth}} \text{ ή } f_{\text{height}}, f_{\text{vol}}, f_{\text{wear}}, f_{\text{blade}}, f_{\text{grade}}, f_{\text{avail}}, f_{\text{skill}}, f_{\text{match}}, f_{\text{hose}}, f_{\text{concrete}}, f_E$ |
| 7 | Hoffmann (2006) | $f_{\text{swing}}, f_{\text{depth}} \text{ ή } f_{\text{height}}, f_{\text{dump}}, f_{\text{vol}}, f_{\text{blade}}, f_{\text{grade}}, f_{\text{condition}}, f_{\text{match}}, f_E$ |
| 8 | Hüster (2005) | $f_{\text{swing}}, f_{\text{depth}} \text{ ή } f_{\text{height}}, f_{\text{dump}}, f_{\text{blade}}, f_{\text{grade}}, f_{\text{avail}}, f_{\text{skill}}, f_E$ |
| 9 | Komatsu (2013) | $f_{\text{depth}} \text{ ή } f_{\text{height}}, f_{\text{blade}}, f_{\text{grade}}, f_E$ |
| 10 | Kotte (1997) | $f_{\text{swing}}, f_{\text{depth}} \text{ ή } f_{\text{height}}, f_{\text{dump}}, f_{\text{vol}}, f_{\text{wear}}, f_{\text{alt}}, f_{\text{avail}}, f_{\text{skill}}, f_E$ |
| 11 | Kühn (1984) | $f_{\text{swing}}, f_{\text{depth}} \text{ ή } f_{\text{height}}, f_{\text{dump}}, f_{\text{vol}}, f_{\text{skill}}, f_{\text{match}}, f_E$ |
| 12 | Liebherr (2003) | $f_{\text{blade}}, f_{\text{grade}}, f_{\text{method}}, f_{\text{condition}}, f_{\text{skill}}, f_E$ |
| 13 | Nunally (2007) | $f_{\text{swing-depth}} / f_{\text{swing-height}}, f_{\text{grade}}, f_{\text{skill}}, f_E$ |
| 14 | Peurifoy and Schexnayder (2002) | $f_{\text{swing-depth}} / f_{\text{swing-height}}, f_{\text{grade}}, f_{\text{method}}, f_{\text{skill}}, f_E$ |



Σχήμα 2.26: Συντελεστής γωνίας στροφής (f_{swing}) εκσκαφέα ή φορτωτή κατά BML (1983; σ. 6/17/26)

Ιδανικά ο εκσκαφέας ή ο φορτωτής θα πρέπει να στρίβει σε γωνίες 0-45° (Bauer, 2007; Caterpillar, 2016; Komatsu, 2013; Liebherr, 2003; Nunally, 2007; Peurifoy and Schexnayder, 2002). Ειδικά για την περίπτωση του εκσκαφέα, η κίνηση είναι προτιμότερο να γίνεται αντι-ωρολογιακά, καθώς η καμπίνα του χειριστή βρίσκεται στην αριστερή πλευρά του μηχανήματος και έτσι διευκολύνεται η εργασία και αυξάνεται η παραγωγικότητα (Girmscheidt, 2010). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος Komatsu (2013) δεν καθορίζει ξεχωριστό συντελεστή γωνίας στροφής, αλλά ενσωματώνει τη γωνία στροφής στον υπολογισμό του χρόνου κύκλου. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται τρεις κατηγορίες γωνίας στροφής (45°, 90° και 180°) στις οποίες αντιστοιχίζεται μία τιμή χρόνου κύκλου (π.χ. για τον εκσκαφέα PC350-LC8 οι τιμές του χρόνου κύκλου είναι 15sec (45°), 18sec (90°) και 21sec (180°)). Οι Caterpillar (2016) και Liebherr (2003) δεν καθορίζουν συγκεκριμένες τιμές για τον συντελεστή γωνίας στροφής.

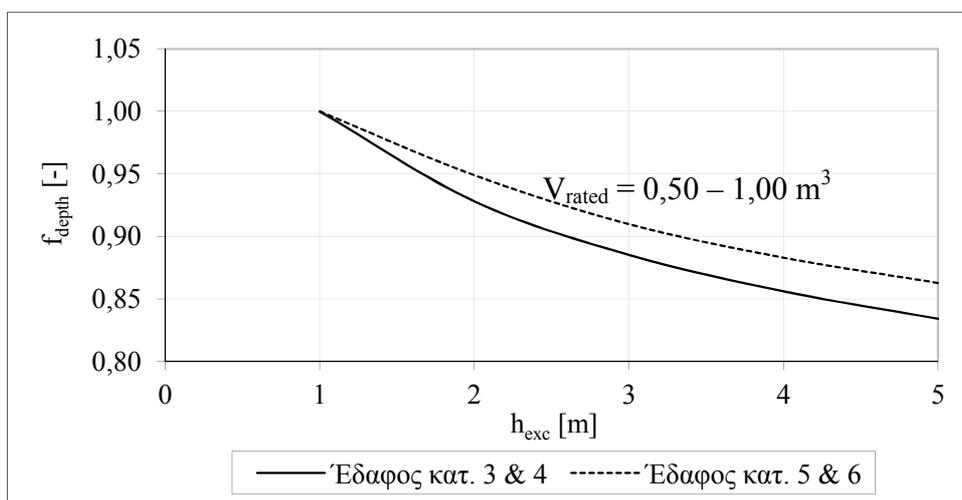
II. Συντελεστής βάθους εκσκαφής (f_{depth}) ή ύψους φόρτωσης (f_{height})

Για κάθε εκσκαφέα υπάρχει ένα βέλτιστο βάθος εκσκαφής (h_{d-opt}), το οποίο ορίζεται εμπειρικά ως $h_{d-opt} = (1-2) \times V_{rated}$ [m] (BML, 1983). Σε περίπτωση που το βάθος εκσκαφής διαφέρει από το βέλτιστο χρησιμοποιείται ο διορθωτικός συντελεστής f_{depth} . Κατά την BML (1983; σελ. 6), στην περίπτωση των εκσκαφών, οι τιμές του συντελεστή δίνονται μόνο για κάδους χωρητικότητας $V_{rated} = 0,50-1,00m^3$ ανάλογα με την κατηγορία του εδάφους κατά DIN18300:2012 (Σχήμα 2.27). Με παρόμοιο τρόπο καθορίζουν τιμές για τον ίδιο συντελεστή οι μέθοδοι της γερμανικής βιβλιογραφίας (Bauer, 2007; Garbotz, 1966; Girmscheidt, 2010; Hoffmann, 2006; Hüster, 2005; Kotte, 1997; Kühn, 1984). Ο συντελεστής βάθους εκσκαφής προσδιορίζεται ελαφρώς παραλλαγμένος για τη μέθοδο Komatsu (2013; σελ. 14A-10). Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται ένας συντελεστής συσχέτισης του λόγου του βάθους εκσκαφής προς το μέγιστο βάθος εκσκαφής (μετρούμενο σε ποσοστό επί τοις

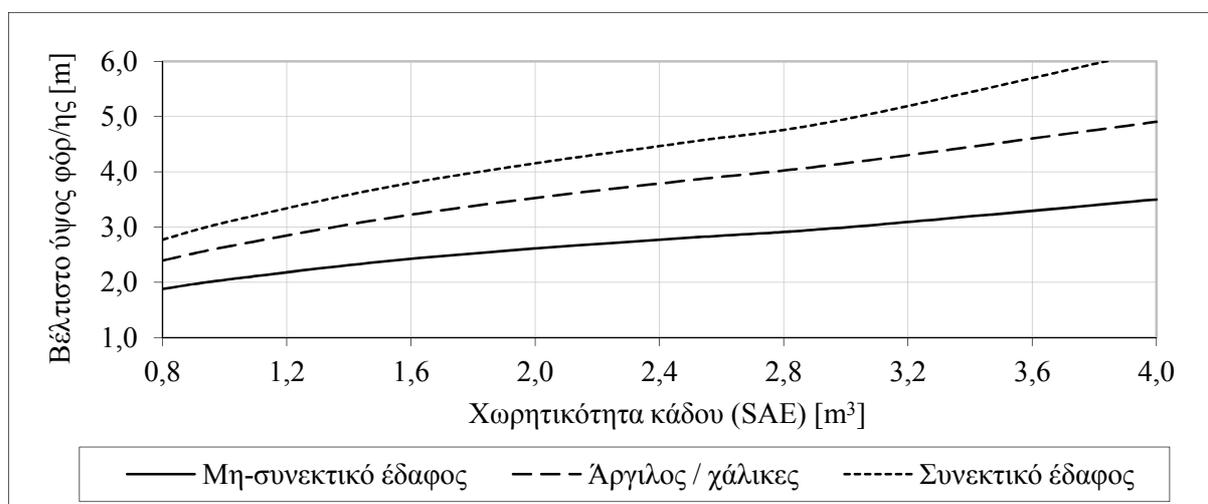
εκατό %) με τις συνθήκες απόθεσης του εδαφικού υλικού, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.20. Τέλος, ο Kühn (1984; σελ. 177) καθορίζει το βέλτιστο ύψος φόρτωσης (για φορτωτή ή εκσκαφέα με μετωπικό κάδο) σε σχέση με την κατηγορία του εδάφους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.28. Με γνωστό το βέλτιστο ύψος φόρτωσης, προσδιορίζεται ο συντελεστής ύψους φόρτωσης (f_{height}) σύμφωνα με το Σχήμα 2.29. Οι Caterpillar (2016) και Liebherr (2003) δεν καθορίζουν συγκεκριμένες τιμές για τον συντελεστή βάθους εκσκαφής ή ύψους φόρτωσης.

Πίνακας 2.20: Τιμές του συντελεστή βάθους εκσκαφής (f_{depth}) υδραυλικού εκσκαφέα κατά Komatsu (2013; σελ. 14A-10)

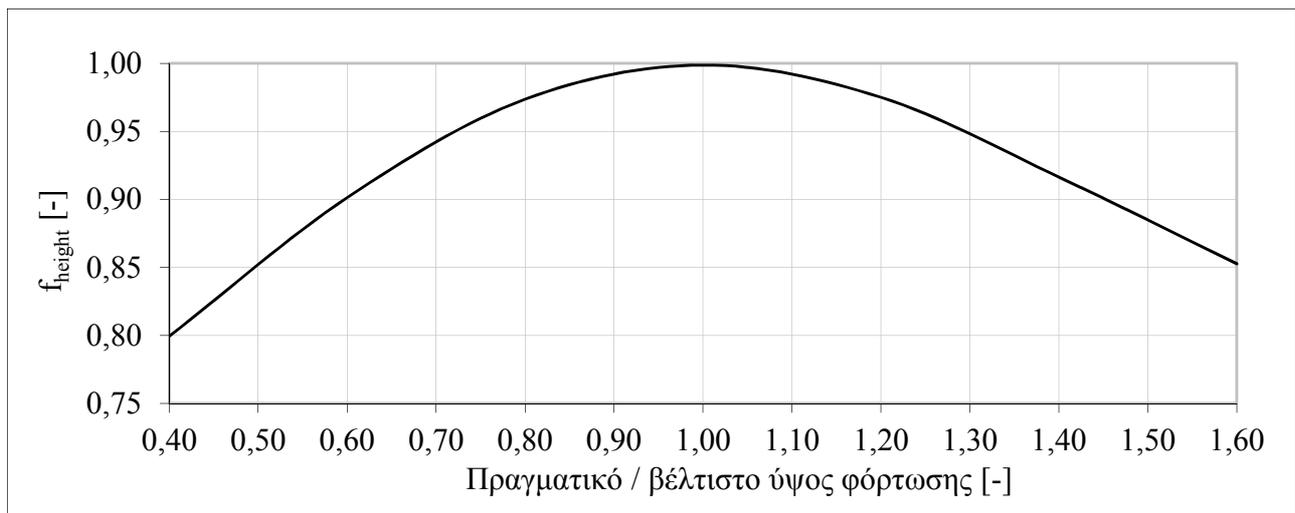
| Βάθος εκσκαφής Μέγιστο βάθος εκσκαφής | Συνθήκες απόθεσης εδαφικού υλικού | | | |
|--|-----------------------------------|--|--|--|
| | Εύκολες (απόθεση σε σωρό) | Κανονικές (απόθεση σε μεγάλο χώρο) | Μάλλον δύσκολη (απόθεση σε μικρό χώρο) | Δύσκολες (Απόθεση σε μικρό χώρο που απαιτεί την μέγιστη έκταση του προβόλου) |
| <40% | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,4 |
| 40% - 75% | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 1,6 |
| >75% | 0,9 | 1,1 | 1,5 | 1,8 |



Σχήμα 2.27: Συντελεστής βάθους εκσκαφής (f_{depth}) υδραυλικού εκσκαφέα κατά BML (1983; σελ. 6)



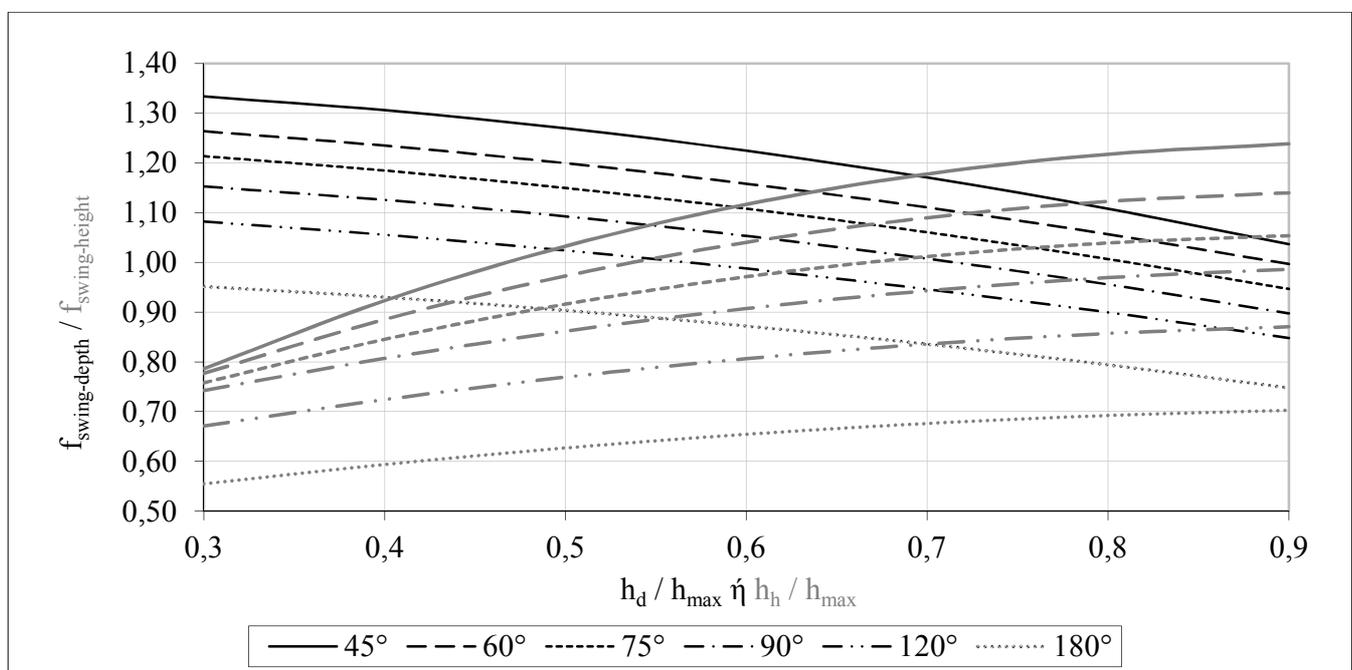
Σχήμα 2.28: Βέλτιστο ύψος φόρτωσης (h_{h-opt}) κατά Kühn (1984; σελ. 177)



Σχήμα 2.29: Συντελεστής ύψους φόρτωσης (f_{height}) φορτωτή κατά Kühn (1984; σελ. 177)

III. Συντελεστής γωνίας στροφής – βάθους εκσκαφής ($f_{swing-depth}$)

Η μέθοδοι Nunally (2007; σελ. 49) και Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 236) προσδιορίζουν έναν συνδυαστικό συντελεστή για τη γωνία στροφής και το βάθος ($f_{swing-depth}$) ή το ύψος εκσκαφής ($f_{swing-height}$) αντίστοιχα. Ο συντελεστής ορίζεται σε σχέση με τη γωνία στροφής και τον λόγο του βάθους/ύψους εκσκαφής (h_d ή h_h) προς το μέγιστο βάθος/ύψος εκσκαφής (h_{max}) μετρούμενο σε ποσοστό επί τοις εκατό (%), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.30. Ο συντελεστής $f_{swing-depth}$ δεν συναντάται σε κάποια άλλη μεθοδολογία.



Σχήμα 2.30: Συντελεστής γωνίας στροφής – βάθους εκσκαφής ($f_{swing-depth}$) ή γωνίας στροφής – ύψους εκσκαφής ($f_{swing-height}$)

IV. Συντελεστής εκκένωσης του κάδου (f_{dump})

Η μέθοδος εκκένωσης του κάδου επηρεάζει άμεσα τον χρόνο εκκένωσης –άρα τον χρόνο κύκλου– και κατά συνέπεια την παραγωγικότητα του εκσκαφέα. Ο Kiehl (1973) παρατήρησε ότι για εκσκαφείς με χρόνο κύκλου 0,31-0,41min, ο χρόνος απόθεσης αυξανόταν ~11% όταν η εκκένωση του κάδου γινόταν σε φορτηγό αντί σε σωρό. Αυτό είχε ως συνέπεια να μειώνεται η παραγωγικότητα κατά 10%. Η διαπίστωση αυτή συμπίπτει με τις μετρήσεις της BML (1983; σελ. 7) και υιοθετείται από τη γερμανική βιβλιογραφία (Bauer 2007; Garbotz 1966, Hoffmann 2006; Hüster 2005 Kotte 1997; Kühn 1984). Ο Kühn (1984; σελ. 177) πραγματοποίησε μετρήσεις σε μηχανικούς εκσκαφείς, αλλά χρησιμοποίησε τα αποτελέσματα και στην περίπτωση των υδραυλικών εκσκαφών. Έτσι, ορίζοντας ως συνθήκη αναφοράς την ελεύθερη απόθεση σε σωρό, η συστηματική αύξηση του χρόνου κύκλου για διαφορετικές μεθόδους απόθεσης και η μειωτική επίδρασή της στην παραγωγικότητα εκφράζεται από τον συντελεστή εκκένωσης κάδου (f_{dump}), όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.21 (Kühn, 1984; BML, 1983). Τέλος, εάν γίνεται απόθεση συνεκτικού υλικού θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η δυσκολία πλήρους εκκένωσης του κάδου που οδηγεί σε (α) αύξηση του χρόνου κύκλου και (β) μείωση του συντελεστή πλήρωσης (Bauer 2007).

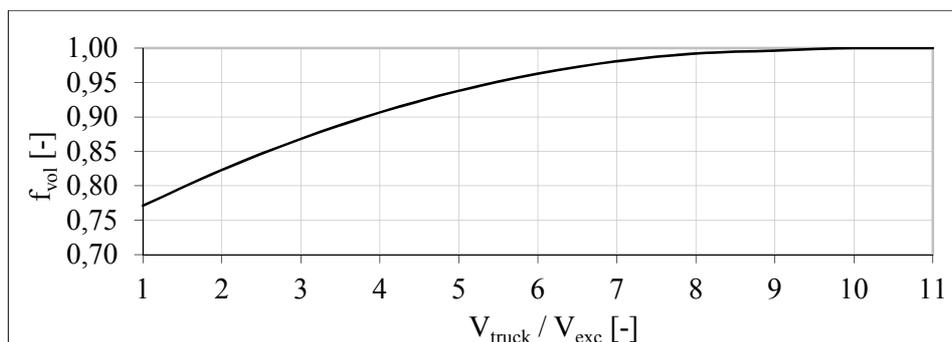
Πίνακας 2.21: Συγκριτική απεικόνιση του συντελεστή εκκένωσης κάδου

| Μέθοδος εκκένωσης | Συντελεστής εκκένωσης (f_{dump}) | |
|--|--------------------------------------|------------|
| | Kühn (1984) | BML (1983) |
| α. εκκένωση σε σωρό | 1,00 | 1,00 |
| β. εκκένωση σε φορτηγό στο ίδιο επίπεδο με τον εκσκαφέα | 0,90 | 0,90 |
| γ. εκκένωση σε φορτηγό ένα επίπεδο κάτω από τον εκσκαφέα | 0,80 | - |
| δ. εκκένωση σε κάδο αποθήκευσης (loading hopper) | 0,67 | - |
| ε. εκκένωση σε σιλό απόθεσης (storage silo) | 0,58 | - |

V. Συντελεστής συναρμογής όγκων φορτωτικού μέσου – μεταφορικού οχήματος (f_{vol})

Η περίπτωση όπου ένας εκσκαφέας αποθέτει το εδαφικό υλικό σε ένα μεταφορικό μέσο (π.χ. φορτηγό) συναντάται πολύ συχνά στο εργοτάξιο. Το ζήτημα της συναρμογής των όγκων μεταξύ του φορτωτικού μέσου (π.χ. εκσκαφέας, φορτωτής) και του μεταφορικού οχήματος έχει απασχολήσει πολύ τη βιβλιογραφία, και ιδιαίτερα τους κατασκευαστές μηχανικού εξοπλισμού, όπως η Caterpillar (2016). Ο λόγος του όγκου της σκάφης του μεταφορικού μέσου (V_{truck}) προς τον όγκο του κάδου του εκσκαφέα (V_{rated}) επηρεάζει τον χρόνο κύκλου του εκσκαφέα ως εξής (Girmscheidt, 2010; Bauer, 2007): όσο μικρότερος είναι ο λόγος (αυξανόμενος όγκος κάδου και μειούμενος όγκος σκάφης), τόσο ο χειριστής του εκσκαφέα πρέπει να εργάζεται με μεγάλη προσοχή για να μπορέσει να αποθέσει με ακρίβεια το υλικό στην σκάφη. Επίσης, λόγω των συχνών αλλαγών των μεταφορικών οχημάτων, αφού ο χρόνος φόρτωσης του φορτηγού μικραίνει, οι αναμονές του εκσκαφέα αυξάνονται. Αυτό μπορεί να μειώσει την απόδοση του εργοταξίου συνολικά, ειδικά στην περίπτωση που ο εκσκαφέας είναι το κρίσιμο μηχάνημα. Η επιρροή του λόγου των όγκων στην παραγωγικότητα του μηχανήματος εκφράζεται από τον συντελεστή συναρμογής όγκων φορτωτικού μέσου – μεταφορικού οχήματος (f_{vol}). Η μέθοδος BML (1983; σελ. 7) προσδιορίζει τον f_{vol} σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 2.31. Το ίδιο

διάγραμμα χρησιμοποιούν και οι Bauer (2007), Garbotz (1966), Girmscheidt (2010), Hoffmann (2006), Kotte (1997) και Kühn (1984). Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.



Σχήμα 2.31: Συντελεστής συναρμογής όγκων εκσκαφέα – μεταφορικού οχήματος (f_{vol}^{BML}) (προσαρμοσμένο από BML, 1983; σελ. 7.)

VI. Συντελεστής φθοράς δοντιών του κάδου (f_{wear})

Ο συντελεστής φθοράς των δοντιών του κάδου του εκσκαφέα εκφράζει τη μείωση στην παραγωγικότητα του μηχανήματος, λόγω της απομειωμένης ικανότητας εργασίας. Ο συντελεστής προσδιορίζεται από τον Kotte (1997) σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 2.22 και εφαρμόζεται επίσης από τους Bauer (2007), Garbotz (1966) και Girmscheidt, (2010). Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.

Πίνακας 2.22: Τιμές συντελεστή φθοράς δοντιών κάδου (f_{wear}^{KT}) (προσαρμοσμένο από Kotte, 1997)

| Κατάσταση δοντιών κάδου | Συντελεστής φθοράς δοντιών κάδου (f_{wear}^{KT}) |
|-------------------------------------|--|
| Καινούρια | 1,00 |
| Ελαφρώς προς μέτρια χρησιμοποιημένα | 0,90 |
| Πολύ χρησιμοποιημένα – ανεπαρκή | 0,80 |

VII. Συντελεστής υψομέτρου εργασίας (f_{alt})

Ο συντελεστής υψομέτρου εργασίας εκφράζει την μείωση της απόδοσης των κινητήρων εσωτερικής καύσης, όσο αυξάνεται το υψόμετρο. Η Caterpillar (2016) αναφέρει ότι το υψόμετρο επηρεάζει την απόδοση του κινητήρα, αλλά δεν δίνει συγκεκριμένες τιμές. Αντίθετα, ενδεικτικές τιμές δίνονται από τον Kotte (1997) σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 2.23. Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.

Πίνακας 2.23: Τιμές συντελεστή υψομέτρου εργασίας (f_{alt}^{KT}) (προσαρμοσμένο από Kotte, 1997)

| Τύπος κινητήρα | Υψόμετρο εργασίας (m) | Συντ. f_{alt}^{KT} |
|----------------|-----------------------|----------------------|
| Ατμοσφαιρικός | 300 | 1,000 |
| | 500 | 0,976 |
| | 1000 | 0,916 |
| | 1500 | 0,856 |
| | 2000 | 0,796 |
| Turbo | 1000 | 1,000 |
| | 1500 | 0,950 |
| | 2000 | 0,900 |

VIII. Συντελεστής τύπου κοπήρα (f_{blade})

Ο συντελεστής τύπου κοπήρα (f_{blade}) εκφράζει την μεταβολή της χωρητικότητας του προωθητή ανάλογα με τον τύπο του κοπήρα. Η BML (1983; σελ. 84) καθορίζει ενδεικτικές τιμές, οι οποίες συναντώνται και στους Bauer (2007), Garbotz (1966) και Hoffmann (2006). Η Liebherr (2003; σελ. 512) διαφοροποιεί ελαφρώς το εύρος τιμών και υιοθετείται από τους Girmscheidt (2010) και Hüster (2005). Οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή φαίνονται στον Πίνακα 2.24. Η Komatsu (2013; σελ. 14A-4) συσχετίζει τον συντελεστή κοπήρα με τις συνθήκες εργασίας (προώθησης / εκσκαφής), σύμφωνα με τον Πίνακα 2.25. Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.

Πίνακας 2.24: Συντελεστής τύπου κοπήρα προωθητή (f_{blade})

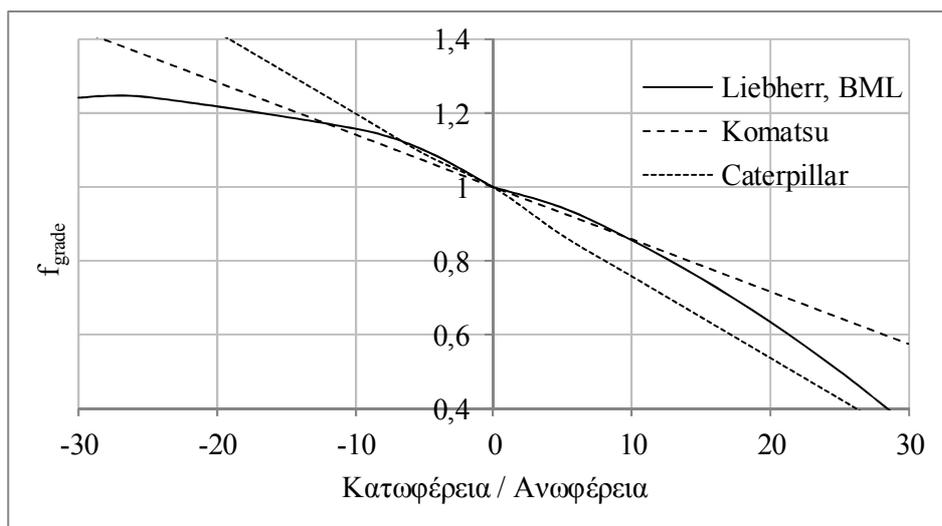
| Τύπος κοπήρα | Συντελεστής κοπήρα (f_{blade}) | |
|-----------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | BML (1983; σελ. 83) | Liebherr (2003; σελ. 512) |
| μετωπικός ή τύπου S, | 1,10 – 1,25 | 1,00 |
| γωνιακός ή τύπου A | 1,00 | 0,50 – 0,75 |
| προωθητικός ή τύπου U | 0,70 – 0,85 | 1,20 |

Πίνακας 2.25: Συντελεστής τύπου κοπήρα προωθητή (f_{blade}) σε σχέση με συνθήκες εργασίας

| Συνθήκες εργασίας | Συντελεστής κοπήρα (f_{blade}) Komatsu (2013; σ. 14A-4) |
|-------------------|--|
| Εύκολη φόρτωση | 0,90 – 1,10 |
| Μεσαία δυσκολία | 0,70 – 0,90 |
| Μάλλον δυσμενείς | 0,60 – 0,70 |
| Δυσμενείς | 0,40 – 0,60 |

IX. Συντελεστής κλίσης εδάφους (f_{grade})

Ο συντελεστής κλίσης εδάφους (f_{grade}) εκφράζει την επιρροή της παραγωγικότητας λόγω μεταβολής της κλίσης του εδάφους κατά την εκτέλεση της εργασίας του προωθητή. Η BML (1983; σελ. 85) δίνει τιμές που ταυτίζονται με αυτές της Liebherr (2003; σελ. 512), ενώ οι Caterpillar (2016; σελ. 19-55) και Komatsu (2013; σελ. 14A-5) διαφοροποιούν το εύρος τιμών τους όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.32. Ο Girmscheidt (2010) υιοθετεί τις προτάσεις της Liebherr (2003), ενώ οι Bauer (2007), Garbotz (1966), Hoffmann (2006) και Hüster (2005) υιοθετούν τις τιμές της BML (1983). Οι Nunally (2007) και Peurifoy and Schexnayder (2002) ακολουθούν τις προτάσεις της Caterpillar (2016). Τέλος, ο Kühn (1984) δεν προσδιορίζει τιμές για αυτόν τον συντελεστή.



Σχήμα 2.32: Συντελεστής κλίσης εδάφους εργασίας προωθητή

X. Συντελεστής μεθόδου εργασίας (f_{method})

Ο συντελεστής μεθόδου εργασίας (f_{method}) καθορίζεται για δύο μηχανήματα: (α) προωθητής και (β) αποξεστικό. Στην περίπτωση του προωθητή ο συντελεστής μεθόδου εργασίας (f_{method}) εκφράζει την επιρροή του τρόπου προώθησης του υλικού στην παραγωγικότητα. Διακρίνονται δύο τύποι: (α) κατά μήκος προώθηση (slot dozing) και (β) πλευρική προώθηση (side by side dozing). Ενδεικτικές τιμές της Caterpillar (2016; σελ. 19-55) παρέχονται από τον Πίνακα 2.26, οι οποίες υιοθετούνται από τους Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 173). Η Liebherr (2003; σελ. 512) αναφέρει μόνο την περίπτωση της μειωμένης ορατότητας και συμπίπτει με την Caterpillar, ενώ υιοθετείται από τον Girmscheidt (2010). Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.

Πίνακας 2.26: Συντελεστής μεθόδου εργασίας (f_{method}) προωθητή (Caterpillar, 2016; σ. 19-55)

| Μέθοδος εργασίας | Συντελεστής μεθόδου εργασίας (f_{method}) |
|---------------------|---|
| Κατά μήκος προώθηση | 1,20 |
| Πλευρική προώθηση | 1,15 – 1,25 |
| Μειωμένη ορατότητα | 0,80 |

XI. Συντελεστής κατάστασης χώρου εργασίας ($f_{condition}$)

Ο συντελεστής κατάστασης χώρου εργασίας ($f_{condition}$) εκφράζει την μεταβολή της παραγωγικότητας σε σχέση με την κατάσταση του εδαφικού υλικού που εκσκάπτεται. Ο συντελεστής ορίζεται για τον προωθητή από την Caterpillar (2016; σελ. 19-55) και Liebherr (2003; σελ. 512), καθώς και για το αποξεστικό από τον Hoffmann (2006; σελ. 631). Στην περίπτωση του προωθητή, καθορίζονται τέσσερις εδαφικές κατηγορίες και οι τιμές των δύο μεθόδων ουσιαστικά ταυτίζονται, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.27. Στην περίπτωση του αποξεστικού, οι τιμές του συντελεστή εξαρτώνται από τον τύπο του εδαφικού υλικού και τις καιρικές συνθήκες (π.χ. έντονες βροχοπτώσεις δυσχεραίνει την εκτέλεση των εργασιών), όπως απεικονίζεται στον Πίνακα 2.28.

Πίνακας 2.27: Συντελεστής κατάστασης χώρου εργασίας ($f_{condition}$)

| Τύπος εδάφους | Συντελεστής κατάστασης χώρου εργασίας ($f_{condition}$) | |
|-------------------|---|-------------------------|
| | Caterpillar (2016; σ. 19-55) | Liebherr (2003; σ. 512) |
| Χαλαρά εδάφη | 1,20 | 1,20 |
| Σκληρά παγωμένα | 0,70 – 0,80 | 0,70 – 0,80 |
| Σκληρά, συνεκτικά | 0,80 | 0,60 – 0,80 |
| Βραχώδη | 0,60 – 0,80 | 0,60 – 0,80 |

Πίνακας 2.28: Συντελεστής κατάστασης χώρου εργασίας ($f_{condition}$) (Hoffmann, 2006; σελ. 631)

| Τύπος εδάφους | Αμμοχάλικο | Μαλακή άργιλος, άμμος, μάργα | Χάλικες, σκληρή άργιλος |
|--|-------------|------------------------------|-------------------------|
| Καλή κατάσταση, στεγνό έδαφος, μικρές αυλακώσεις | 0,75 – 0,95 | 0,50 – 0,90 | 0,30 – 0,70 |
| Κακή κατάσταση, υγρό έδαφος, μεγάλες αυλακώσεις | 0,70 – 0,90 | 0,30 – 0,75 | 0,10 – 0,25 |

XII. Συντελεστής διαθεσιμότητας μηχανήματος (f_{avail})

Ο συντελεστής διαθεσιμότητας μηχανήματος εκφράζει την επιρροή των ωρών λειτουργίας του κινητήρα του μηχανήματος στην απόδοσή του. Η συσχέτιση βασίζεται στη θεωρητική παραδοχή πως όσες περισσότερες ώρες έχει χρησιμοποιηθεί ένας κινητήρας, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να μην λειτουργήσει αποδοτικά εξαιτίας ξαφνικών βλαβών, κακής κατάστασης των μηχανικών του μερών κτλ. Οι κατασκευαστές μηχανικού εξοπλισμού (Caterpillar, Liebherr, Komatsu) αναφέρουν ότι θα πρέπει να ληφθεί υπόψη αυτός ο συντελεστής, αλλά δεν δίνουν συγκεκριμένες τιμές. Ο Hüster (2005) ισχυρίζεται ότι ο συντελεστής μπορεί να κυμανθεί στο όριο του 0,80, ενώ σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί να μειωθεί κάτω από 0,50 (π.χ. για μηχανήματα σε πολύ κακή κατάσταση). Ο Kotte (1997) δίνει ενδεικτικές τιμές του συντελεστή για εκσκαφείς σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 2.29, οι οποίες συναντώνται και στους Girmscheidt (2010) και Garbotz (1966). Αν και οι τιμές αφορούν σε εκσκαφείς, ο Girmscheidt (2010) αναφέρει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για κάθε τύπο χωματουργικού μηχανήματος. Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.

Πίνακας 2.29: Συντελεστής διαθεσιμότητας μηχανήματος (f_{avail}) (Kotte, 1997)

| Ωρες λειτουργίας κινητήρα | f_{avail} |
|---------------------------|-------------|
| <1000 | 1,00 |
| 1000-1500 | 0,93 |
| 1500-2000 | 0,85 |
| 2000-3500 | 0,75 |
| 3500-5000 | 0,65 |

XIII. Συντελεστής ικανότητας χειριστή (f_{skill})

Ο συντελεστής ικανότητας χειριστή εκφράζει την επιρροή των γνώσεων και της εμπειρίας του χειριστή του μηχανήματος στην ωριαία απόδοση (Edwards et al., 2005; Holt and Edwards, 2015). Ενδεικτικές τιμές του συντελεστή δίνονται από τους Kotte (1997), Liebherr (2003; σελ. 413) και Caterpillar (2016; σελ. 19-55)

σύμφωνα με τον παρακάτω Πίνακα 2.30. Οι Girmscheidt (2010) και Hüster (2005) υιοθετούν τις προτάσεις του Kotte (1997), ο οποίος αναφέρει ότι παρόμοιες τιμές χρησιμοποιεί και ο Garbotz (1966), παρόλο που δεν προσδιορίζονται επακριβώς. Οι Peurifoy and Schexnayder (2002; σελ. 173) υιοθετούν τις προτάσεις της Caterpillar (2016). Ο Kühn (1984) διαχωρίζει τη φυσική και τη ψυχολογική κατάσταση του χειριστή και καθορίζει αντίστοιχους συντελεστές για κάθε μία κατηγορία, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.31. Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.

Πίνακας 2.30: Συντελεστής ικανότητας χειριστή (f_{skill})

| Επίπεδο εμπειρίας και ικανότητας χειριστή | Liebherr (2003; σ. 413) | Kotte (1997) | Caterpillar (2016; σελ. 19-55) |
|---|-------------------------|--------------|--------------------------------|
| Πολύ καλή | 1,10 | 1,10 | 1,00 |
| Καλή | 1,00 | 1,00 | - |
| Μέτρια | 0,80 – 0,90 | 0,80 | 0,75 |
| Αρχάριος | 0,70 | 0,65 | 0,60 |

Πίνακας 2.31: Συντελεστής ικανότητας χειριστή (f_{skill}) (προσαρμοσμένο από Kühn, 1984)

| | Ψυχολογική κατάσταση | | Φυσική κατάσταση | | |
|-----------|----------------------|------|------------------|------|--|
| | Πολύ καλή | Καλή | Μέτρια | Κακή | |
| Πολύ καλή | 1,00 | 0,96 | 0,79 | 0,60 | |
| Καλή | 0,94 | 0,88 | 0,71 | 0,56 | |
| Μέτρια | 0,81 | 0,75 | 0,64 | 0,52 | |
| Κακή | 0,58 | 0,54 | 0,47 | 0,45 | |

XIV. Συντελεστής συναρμογής χρόνου κύκλου (f_{match})

Σε κάθε εργασία που αφορά στον συνδυασμό φορτωτικού μέσου (φορτωτής ή εκσκαφέας) με φορητά αυτοκίνητα θα πρέπει να εξασφαλιστεί η καλύτερη δυνατή συναρμογή των χρόνων κύκλου (Smith, 1999; Smith et al., 1995; Smith et al., 2000). Η έννοια του συντελεστή συναρμογής αναφέρθηκε πρώτη φορά από τους Morgan and Peterson (1968) στην Caterpillar και υπολογίζεται όπως παρακάτω (εξ. 2.33):

$$f_{match} = \frac{n_{trucks} \times t_{th,exc / load}}{n_{exc/load} \times t_{th,truck}} \quad (\text{εξ. 2.33})$$

Ο χρόνος κύκλου του φορτωτικού μέσου και του φορητού αυτοκινήτου δεν περιλαμβάνει σταλίες. Η Caterpillar (2016) ορίζει τον συντελεστή συναρμογής για το φορτωτικό μέσο, ενώ η BML (1983) ορίζει τον αντίστοιχο συντελεστή μόνο για το μεταφορικό μέσο. Η τέλεια συναρμογή επιτυγχάνεται για $f_{match} = 1,00$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμα κι αν επιτευχθεί η απόλυτη συναρμογή δεν είναι εύκολο να διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα καθώς θα αυξάνεται ο συνωστισμός των φορητών αυτοκινήτων πίσω από το αυτοκίνητο με τη μικρότερη ταχύτητα κίνησης (bunching effect). Σε κάθε περίπτωση, για $f_{match} > 1,00$, το κρίσιμο μηχάνημα είναι το φορτωτικό μέσο, ενώ για $f_{match} < 1,00$, κρίσιμο μηχάνημα είναι το φορητό αυτοκίνητο. Η μέθοδος BML (1983; σελ. 57) προσδιορίζει τον f_{match} σύμφωνα με τον Πίνακα 2.32 παρακάτω για εργασία χωρίς διακοπές και βλάβες μηχανήματος. Τον ίδιο πίνακα χρησιμοποιούν και οι Bauer (2007), Garbotz

(1966), Girmscheidt (2010), Hoffmann (2006) και Kühn (1984). Ο Hüster (2005) τονίζει ότι κατά τη διαστασιολόγηση του συνδυασμού φορτωτικού μέσου – φορτηγών αυτοκινήτων, ο αριθμός των φορτηγών αυτοκινήτων θα πρέπει να αυξάνεται κατά 10-15% με σκοπό την μεγιστοποίηση της παραγωγικότητας αλλά και την αντιμετώπιση του κινδύνου σταλίας λόγω βλάβης των φορτηγών αυτοκινήτων. Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.

Πίνακας 2.32: Συντελεστής συναρμογής χρόνου κύκλου (f_{match}) (προσαρμοσμένο από BML, 1983; σελ. 57)

| n_{trucks} | $t_{th,trucks} / t_{th,exc/load}$ | | | | | | | | |
|--------------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 2 | 0,89 | 0,75 | 0,55 | 0,45 | | | | | |
| 3 | 0,98 | 0,88 | 0,74 | 0,61 | 0,51 | 0,46 | | | |
| 4 | 1,00 | 0,96 | 0,87 | 0,75 | 0,65 | 0,58 | 0,51 | 0,47 | 0,41 |
| 5 | | 0,99 | 0,94 | 0,86 | 0,77 | 0,68 | 0,61 | 0,55 | 0,50 |
| 6 | | 1,00 | 0,98 | 0,92 | 0,86 | 0,77 | 0,70 | 0,63 | 0,58 |
| 7 | | | 1,00 | 0,96 | 0,91 | 0,85 | 0,78 | 0,71 | 0,65 |
| 8 | | | | 0,98 | 0,95 | 0,90 | 0,85 | 0,79 | 0,72 |
| 9 | | | | 1,00 | 0,97 | 0,94 | 0,89 | 0,85 | 0,79 |
| 10 | | | | | 0,99 | 0,96 | 0,93 | 0,89 | 0,84 |
| 11 | | | | | 1,00 | 0,98 | 0,95 | 0,92 | 0,88 |
| 12 | | | | | | 1,00 | 0,97 | 0,94 | 0,91 |

XV. Συντελεστής πλήρωσης σωλήνα αντλίας σκυροδέματος (f_{hose})

Ο συντελεστής πλήρωσης σωλήνα αντλίας σκυροδέματος (f_{hose}) εκφράζει την επιρροή στην παραγωγικότητα από τον βαθμό πλήρωσης του σωλήνα κατά την άντληση του σκυροδέματος. Ενδεικτικές τιμές δίνονται από τον Girmscheidt (2010; σελ. 233) στον Πίνακα 2.33. Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.

Πίνακας 2.33: Συντελεστής πλήρωσης σωλήνα αντλίας (f_{hose}) σκυροδέματος (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 233)

| Βαθμός πλήρωσης | f_{hose} |
|-------------------------------|------------|
| $\frac{3}{4}$ - πλήρες | 1,00 |
| $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{4}$ | 0,80 |

XVI. Συντελεστής ακρίβειας σκυροδέτησης ($f_{concrete}$)

Ο συντελεστής ακρίβειας σκυροδέτησης ($f_{concrete}$) εκφράζει την επιρροή στην παραγωγικότητα από τον τύπο και την ακρίβεια της σκυροδέτησης, ως συνάρτηση της μεθόδου εργασίας. Ενδεικτικές τιμές δίνονται από τον Girmscheidt (2010; σελ. 234) στον Πίνακα 2.34. Οι υπόλοιπες μέθοδοι δεν προσδιορίζουν τιμές για τον συντελεστή.

Πίνακας 2.34: Συντελεστής ακρίβειας σκυροδέτησης ($f_{concrete}$) σκυροδέματος (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 234)

| Τύπος σκυροδέτησης | f_{hose} |
|--------------------|-------------|
| Πλάκα | 1,00 |
| Υποστυλώματα | 0,50 – 0,70 |
| Τοιχία | 0,70 – 1,00 |

XVII. Συντελεστής εκμετάλλευσης μηχανήματος (f_E)

Ο συντελεστής εκμετάλλευσης του μηχανήματος υπολογίζεται από τη σχέση (εξ. 2.34):

$$f_E = \frac{t_{net}}{60} \quad (\text{εξ. 2.34})$$

όπου t_{net} [min] ο καθαρός χρόνος εργασίας μέσα σε μία ώρα (60') απασχόλησης του μηχανήματος. Κάθε μέθοδος δίνει τις δικές της τιμές, οι οποίες όμως κυμαίνονται στο εύρος που παρουσιάζεται στον παρακάτω Πίνακα 2.35 και αφορά στους εκσκαφείς. Αντίστοιχες τιμές ορίζονται για όλα τα χωματουργικά μηχανήματα, με κατάλληλες προσαρμογές στην περιγραφή των εργασιών.

Πίνακας 2.35: Συντελεστής εκμετάλλευσης μηχανήματος (f_E) σε συνάρτηση με τις συνθήκες εργασίας

| Συνθήκες εργασίας | Μέθοδος εκκένωσης κάδου | Συντελεστής εκμετάλλευσης μηχανήματος (f_E) |
|---|-------------------------|---|
| α. Ιδανικές συνθήκες: Γενικές εκσκαφές, εργασία χωρίς εμπόδια στο ιδανικό βάθος εκσκαφής με ελεύθερη στροφή του προβόλου. Τέτοιες συνθήκες συναντώνται σε μεταλλεία ή πολύ μεγάλα εργοτάξια. | Εκκένωση σε σωρό | 0,82-1,00 |
| | Εκκένωση σε φορτηγό | 0,76-0,80 |
| β. Εργασία σε περιορισμένο χώρο: Ο εκσκαφέας δεν μπορεί να κινηθεί ελεύθερα σε όλη την περιοχή εργασίας (operating envelope) καθώς υπάρχουν ένας ή περισσότεροι χωρικοί περιορισμοί (π.χ. εκσκαφή υπογείου κοντά σε τοίχο παρακείμενης οικοδομής ή η εργασία στην άκρη ενός δρόμου). | Εκκένωση σε φορτηγό | 0,74-0,76 |
| | Εκκένωση σε σωρό | 0,74-0,76 |
| γ. Εργασία με συχνές αλλαγές θέσης: Εργασία κατά την οποία ο χρόνος που απαιτείται για την αλλαγή της θέσης του μηχανήματος είναι σημαντικό ποσοστό του χρόνου κύκλου (π.χ. εκσκαφή επιμήκους και ρηχού σκάμματος που απαιτείται συχνή αλλαγή θέσης του εκσκαφέα). | Εκκένωση σε σωρό | 0,74-0,76 |
| δ. Εκσκαφές τάφρων / ορύγματος: Είναι η συχνότερη εργασία για εκσκαφείς με ανεστραμμένο κάδο και αφορά στην εκσκαφή μεγάλου μήκους και μικρού πλάτους/βάθους σκαμμάτων για την τοποθέτηση καλωδίων, σωλήνων κτλ. κυρίως σε αστικό περιβάλλον. | Εκκένωση σε σωρό | 0,74-0,76 |
| | Εκκένωση σε φορτηγό | 0,70-0,72 |
| ε. Εκσκαφές μικρού όγκου: Αφορούν σε μεμονωμένες εκσκαφές (π.χ. μικρών θεμελίων) σε σκάμμα με μικρό σχετικά όγκο. | Εκκένωση σε σωρό | 0,64 |
| στ. Ειδικές συνθήκες: Αφορά οποιαδήποτε άλλη εργασία που δεν αναφέρεται στις παραπάνω κατηγορίες. | - | Δεν ορίζεται |

Ο συντελεστής εκμετάλλευσης μηχανήματος (f_E) εξαρτάται από τις λειτουργικές συνθήκες και γι' αυτό πολλές φορές αναφέρεται και ως «συντελεστής λειτουργικών συνθηκών» (operating conditions factor), ενώ μπορεί να προσδιοριστεί και στοχαστικά με βάση ιστορικά δεδομένα.

2.5.6. Μέθοδοι ταχείας εκτίμησης παραγωγικότητας

Οι μέθοδοι ταχείας εκτίμησης της παραγωγικότητας αποτελούν εμπειρικά εργαλεία που χρησιμεύουν στον γρήγορο υπολογισμό της παραγωγικότητας μηχανημάτων έργου. Αν και υστερούν σε ακρίβεια, οι μέθοδοι ταχείας εκτίμησης προσδιορίζουν την «τάξη μεγέθους» της παραγωγικότητας κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Όμως, θα πρέπει να εφαρμόζονται προσεκτικά και να επιβεβαιώνονται με μετρήσεις επί τόπου του έργου, καθώς δεν είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψη οι συντελεστές παραγωγικότητας και οι αντίστοιχοι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές τους. Στις επόμενες παραγράφους παρατίθενται οι σχετικές μέθοδοι (συνήθως εμφανίζονται με τη μορφή νομογραφήματος) για τα συνηθέστερα μηχανήματα έργου.

I. Εκσκαφέας

Η ωριαία παραγωγικότητα του υδραυλικού εκσκαφέα με ανεστραμμένο κάδο φόρτωσης μπορεί να εκτιμηθεί από το νομογράφημα του Σχήματος 2.33 σε συνάρτηση με τη χωρητικότητα του κάδου, τον χρόνο κύκλου, τον συντελεστή επιπλήσματος, τον συντελεστή πλήρωσης του κάδου και τον συντελεστή εκμετάλλευσης του μηχανήματος (Fritz, 1970). Αντίστοιχες τιμές δίνονται από τον Hüster (2005; σελ. 150) στο νομογράφημα του Σχήματος 2.34 για υδραυλικό εκσκαφέα με μετωπικό κάδο φόρτωσης. Μία πολύ σημαντική παράμετρος για την αποδοτική εργασία ενός μηχανήματος είναι η σωστή διαστασιολόγηση, τόσο του εκσκαφέα όσο και του κάδου που αυτός θα φέρει. Η Caterpillar (2016; σελ. 7-290 / 7-293) περιγράφει τη διαδικασία διαστασιολόγησης του κάδου του εκσκαφέα από σχετικά νομογραφήματα με βάση στοιχεία ωριαίας παραγωγικότητας, τα οποία όμως θα πρέπει να είναι γνωστά πριν από τους υπολογισμούς. Γι' αυτό τον λόγο παραλείπεται η αναλυτική τους περιγραφή από αυτό το εδάφιο.

II. Φορτωτής

Οι γερμανικές μέθοδοι ταχείας προεκτίμησης της παραγωγικότητας για τον φορτωτή προσδιορίζουν την ωριαία παραγωγικότητα από νομογραφήματα, όπως αυτά στα παρακάτω Σχήματα 2.35 και 2.36 σε συνάρτηση με την απόσταση μεταφοράς, την χωρητικότητα του κάδου, την μέση ταχύτητα, τον χρόνο κύκλου και τον συντελεστή εκμετάλλευσης του μηχανήματος (Hoffmann, 2006; σελ. 620). Για τον ελαστικοφόρο φορτωτή οι παραδοχές είναι: μέση ταχύτητα κίνησης 10km/h, χρόνος κύκλου 0,6min και συντελεστής εκμετάλλευσης 0,75. Για τον ερπυστριοφόρο φορτωτή οι παραδοχές είναι: μέση ταχύτητα κίνησης 4km/h, χρόνος κύκλου 0,4min και συντελεστής εκμετάλλευσης 0,80. Ακόμη, ο Girmscheidt (2010; σελ. 79) δίνει εμπειρικά νομογραφήματα της ωριαίας παραγωγικότητας του φορτωτή (λαστιχοφόρος / ερπυστριοφόρος) σε σχέση με την απόσταση μεταφοράς για ονομαστική χωρητικότητα κάδου 1,00m³ (Σχήμα 2.37). Τέλος, σε αντιστοιχία με τον εκσκαφέα, η Caterpillar (2016; σελ. 23-257 / 23-259) περιγράφει τη διαδικασία διαστασιολόγησης του κάδου του φορτωτή

από σχετικά νομογραφήματα με βάση στοιχεία ωριαίας παραγωγικότητας, τα οποία όμως θα πρέπει να είναι γνωστά πριν από τους υπολογισμούς. Γι' αυτό τον λόγο παραλείπεται η αναλυτική τους περιγραφή από αυτό το εδάφιο.

III. Προωθητής και αποξεστικό

Η Γερμανική Βιβλιογραφία ομαδοποιεί τον ελαστικοφόρο ή ερπυστριοφόρο προωθητή, καθώς και το αποξεστικό όχημα ως «μηχανήματα ισοπέδωσης» (Planiergeräte). Σε αυτό το πλαίσιο, η ωριαία παραγωγικότητα του προωθητή και του αποξεστικού μπορεί να υπολογιστεί από νομογραφήματα όπως αυτό του Σχήματος 2.37 (Girmscheidt, 2010; σελ. 79). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσον αφορά στο αποξεστικό όχημα, η εκτίμηση της παραγωγικότητας γίνεται για ονομαστική χωρητικότητα σκάφης 10m^3 . Ο Kühn (1984; σελ. 186) καθορίζει ενδεικτικές τιμές παραγωγικότητας προωθητή/αποξεστικού σε συνάρτηση με το εδαφικό υλικό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.36.

Με αντίστοιχο τρόπο, η BML (1983; σελ. 83) προτείνει το νομογράφημα του Σχήματος 2.38 για την ταχεία εκτίμηση της ωριαίας παραγωγικότητας μηχανημάτων ισοπέδωσης σε συνάρτηση με την ισχύ του κινητήρα (kW) για κάθε τύπο μηχανήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα ακόλουθα:

- Μετωπικός κοπτήρας (τύπου S)
- Μηχάνημα σε καλή κατάσταση
- Ευκόλως εκσκάψιμο υλικό με αναμενόμενο ειδικό βάρος $\sim 1800\text{kg/m}^3$
- Εργασία σε ανοικτό πεδίο
- Πολύ καλός χειριστής
- Ιδανικές συνθήκες εργασίας (δηλ. καμία διακοπή ή σταλία κατά τη διάρκεια της εργασίας, έδαφος με μηδενική κλίση κτλ)

Τέλος, οι κατασκευαστές μηχανημάτων έργου (Caterpillar, Komatsu, Liebherr κ.ά.) δίνουν νομογραφήματα ταχείας εκτίμησης της παραγωγικότητας ανάλογα με τον τύπο του κοπτήρα. Για παράδειγμα, η Caterpillar (39^η έκδοση; σελ. 1-49) εκτιμά την ωριαία παραγωγικότητα του ερπυστριοφόρου και ελαστικοφόρου προωθητή με μετωπικό κοπτήρα (τύπου S), με βάση το νομογράφημα του Σχήματος 2.39 κάνοντας τις ακόλουθες παραδοχές:

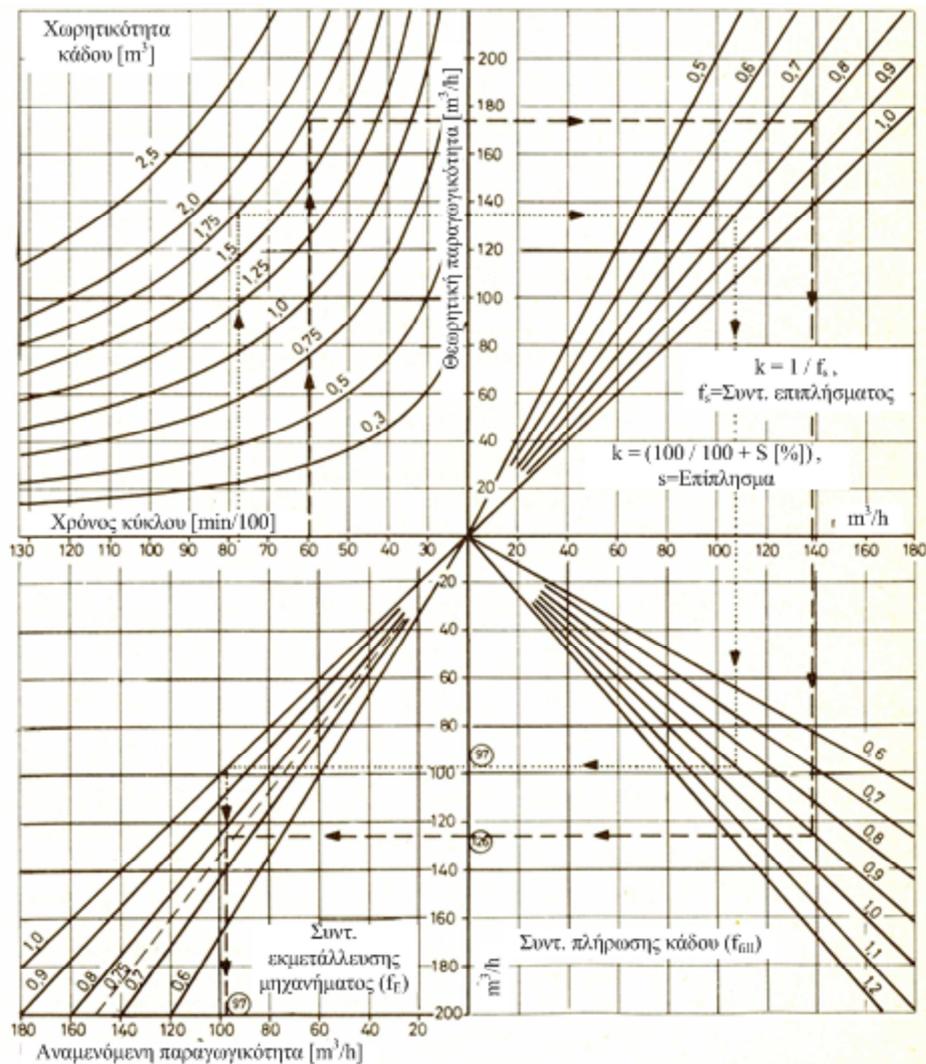
- Ιδανικές συνθήκες εργασίας (συντελεστής εκμετάλλευσης $f_E = 1,00$)
- Χρόνος απόθεσης υλικού ίσος με μηδέν
- Αναμενόμενο ειδικό βάρος χαλαρού υλικού $\sim 1370\text{kg/m}^3$
- Προώθηση σε μήκος 15m
- Συντελεστής πρόσφυσης ίσος με 0,50 για ερπυστριοφόρο μηχάνημα και 0,40 για ελαστικοφόρο μηχάνημα
- Λειτουργία λεπίδας με υδραυλικό μηχανισμό

IV. Ισοπεδωτής

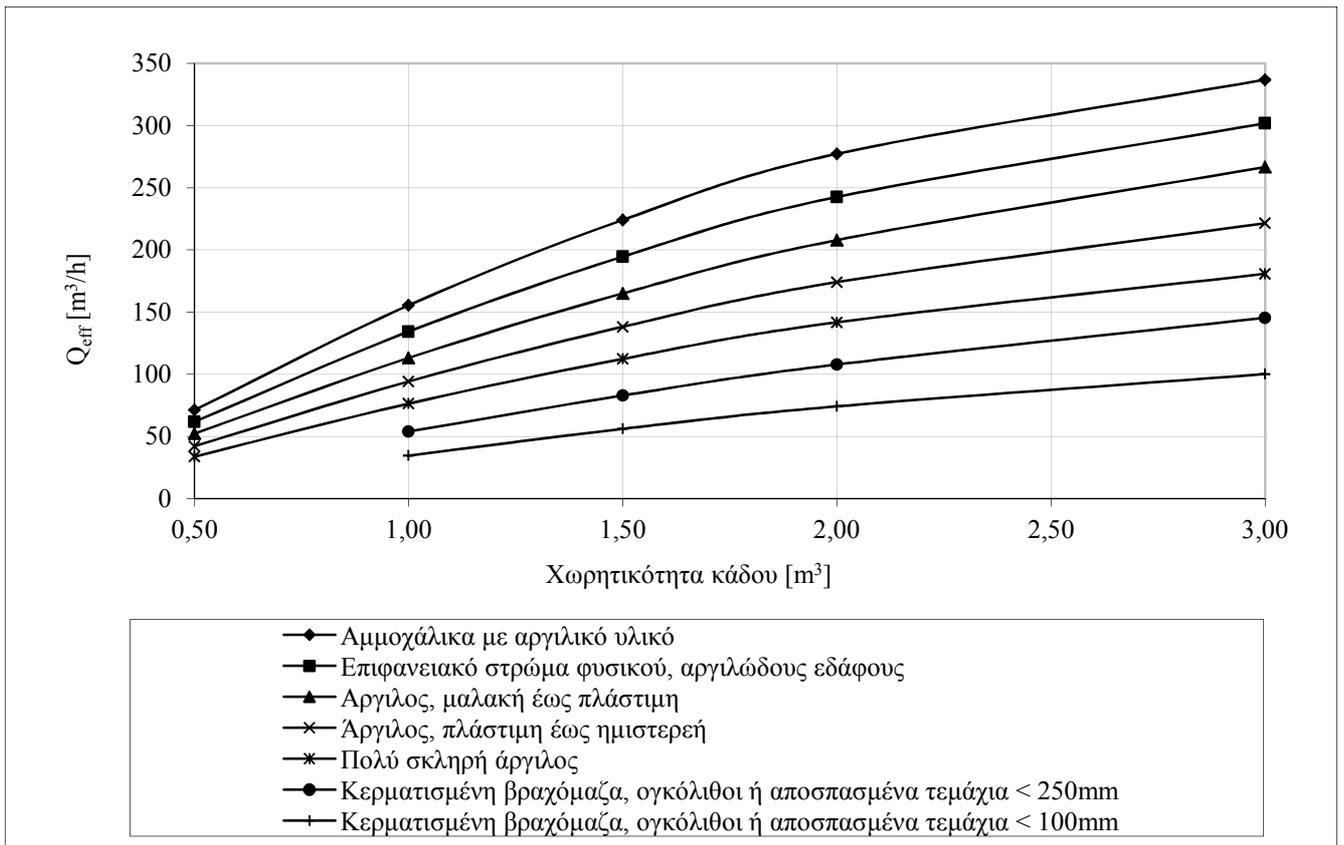
Ο Girmscheidt (2010; σελ. 80) δίνει προσεγγιστικές τιμές της ωριαίας παραγωγικότητας του ισοπεδωτή ανάλογα με τον τύπο της εργασίας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.37. Οι τιμές αφορούν τυπικό μηχάνημα Caterpillar τύπου 140H με ισχύ 138kW, αλλά μπορούν να εφαρμοστούν και για άλλους τύπους μηχανημάτων με παρόμοια χαρακτηριστικά και κατάλληλες προσαρμογές.

V. Αντλία σκυροδέματος

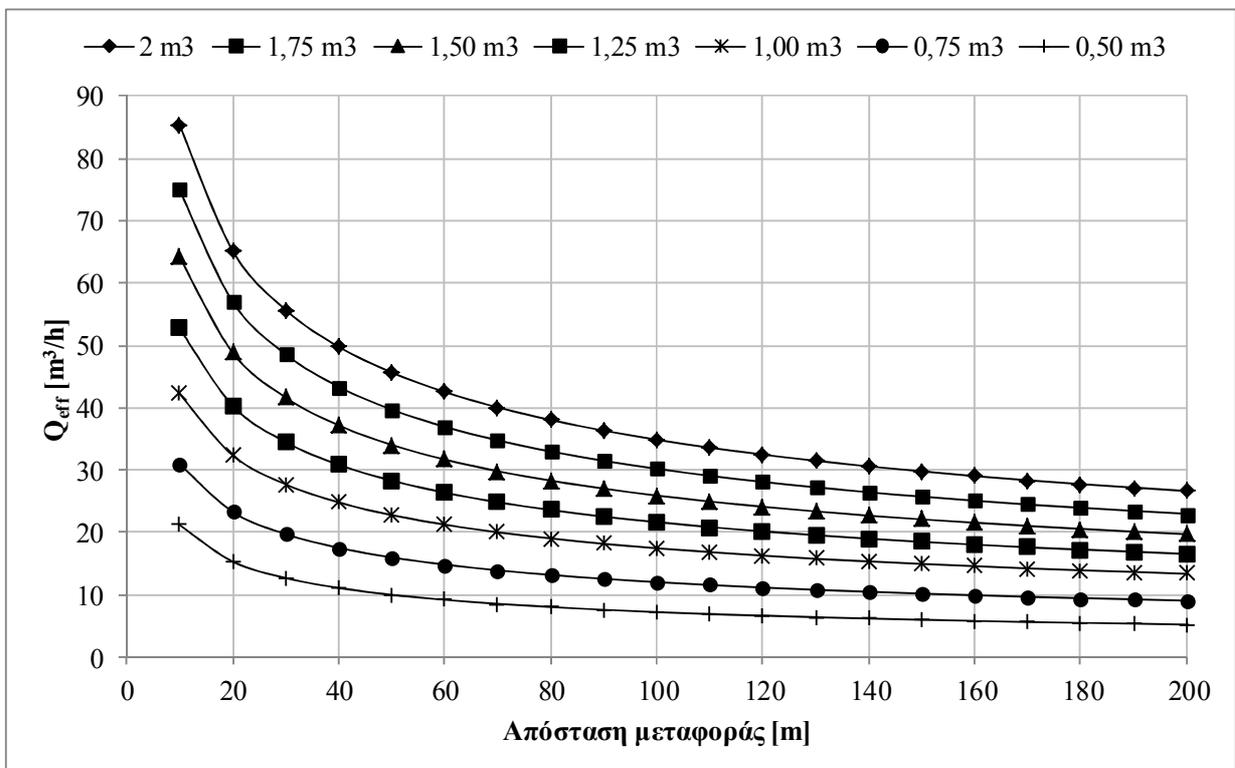
Σε συνέχεια όσων αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους, η εκτίμηση της παραγωγικότητας και η διαστασιολόγηση του κατάλληλου μηχανήματος προϋποθέτει τον υπολογισμό της αναμενόμενης παραγωγικότητας (Q_{eff}) με χρήση των κατάλληλων διορθωτικών πολλαπλασιαστών. Για δεδομένη διάμετρο σωλήνα άντλησης, μήκος δικτύου, υψομετρική διαφορά και χαρακτηριστικά σκυροδέματος (π.χ. μέτρο εξάπλωσης), η απαιτούμενη ισχύς της αντλίας εκτιμάται από το Σχήμα 2.40 που αφορά σε αντλίες τύπου Schwing και δίνεται από τον Hoffmann (2006; σελ. 593).



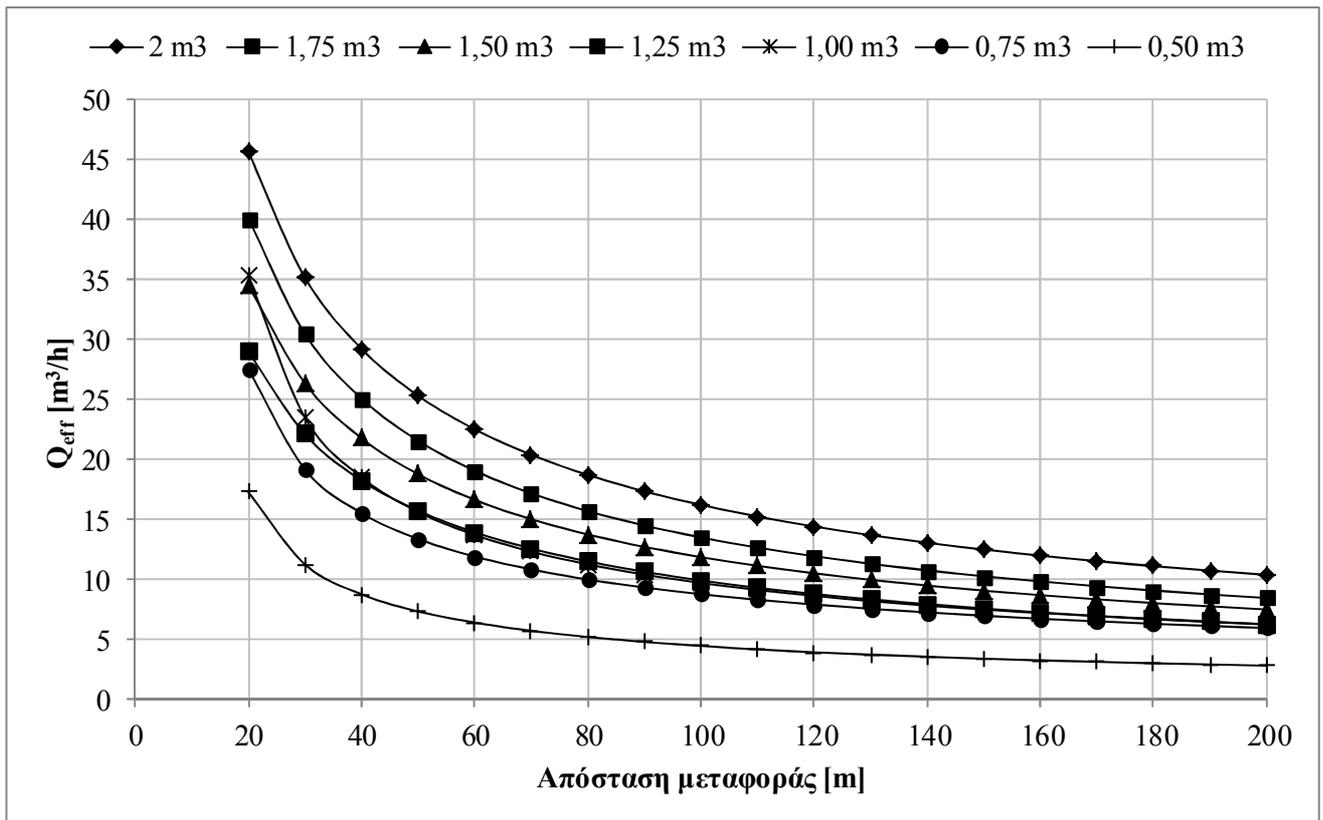
Σχήμα 2.33: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας υδραυλικού εκσκαφέα με ανεστραμμένο κάδο φόρτωσης (προσαρμοσμένο από Fritz, 1970)



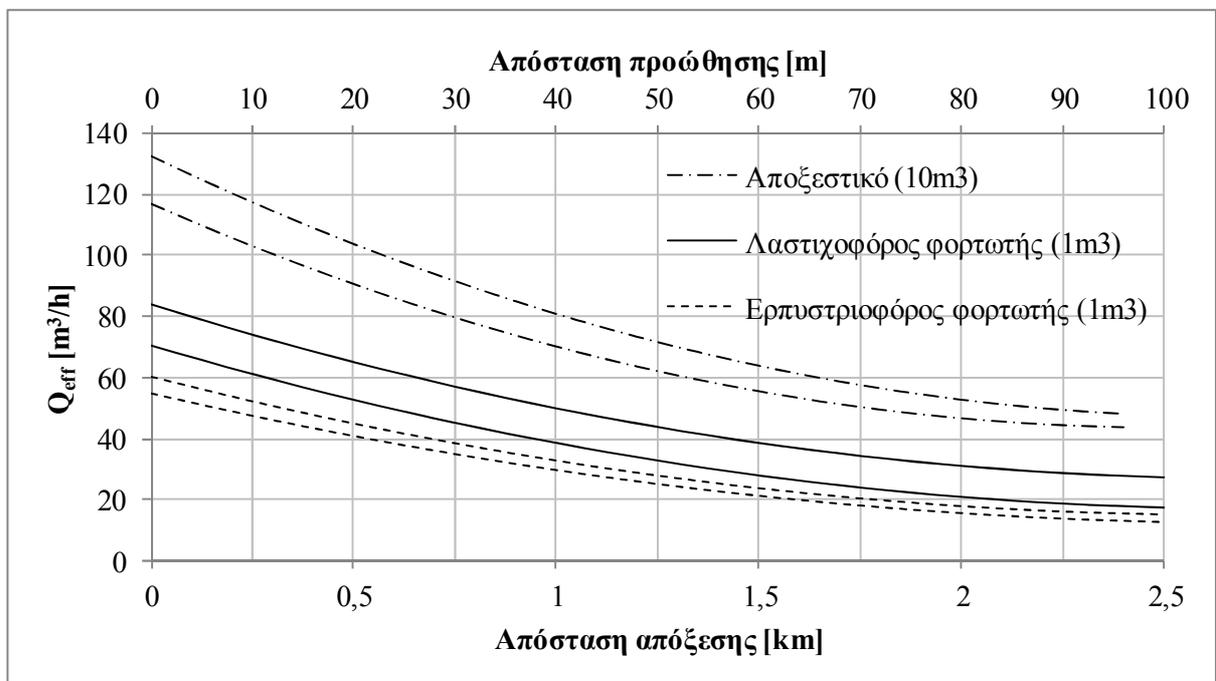
Σχήμα 2.34: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας υδραυλικού εκσκαφέα με μετωπικό κάδο φόρτωσης (προσαρμοσμένο από Hüster, 2005; σελ 150)



Σχήμα 2.35: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας ελαστικοφόρου φορτωτή (προσαρμοσμένο από Hoffmann, 2006; σελ. 620)



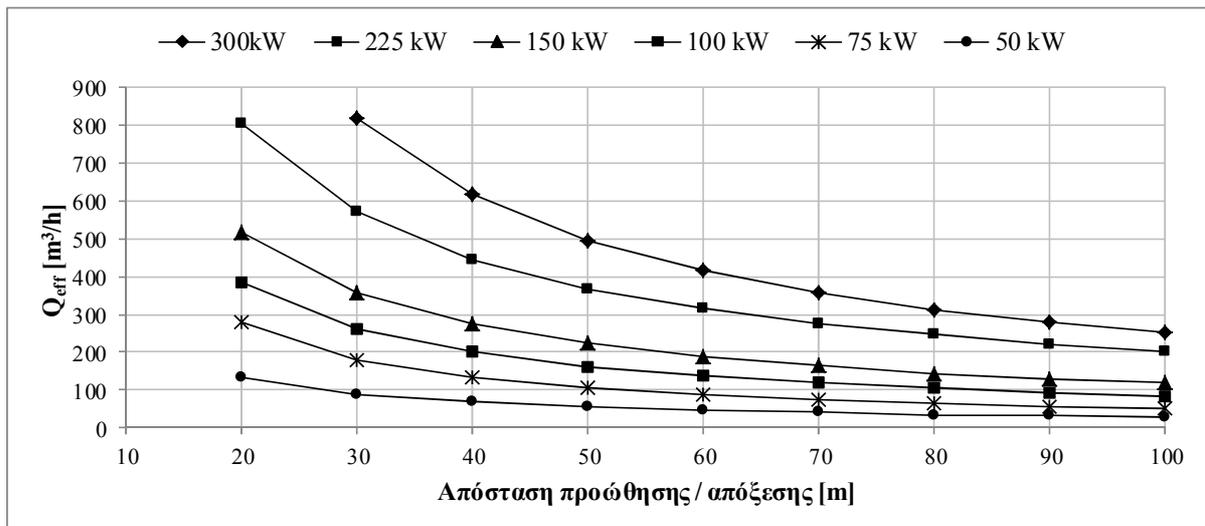
Σχήμα 2.36: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας ερπυστριοφόρου φορτωτή (προσαρμοσμένο από Hoffmann, 2006; σελ. 620)



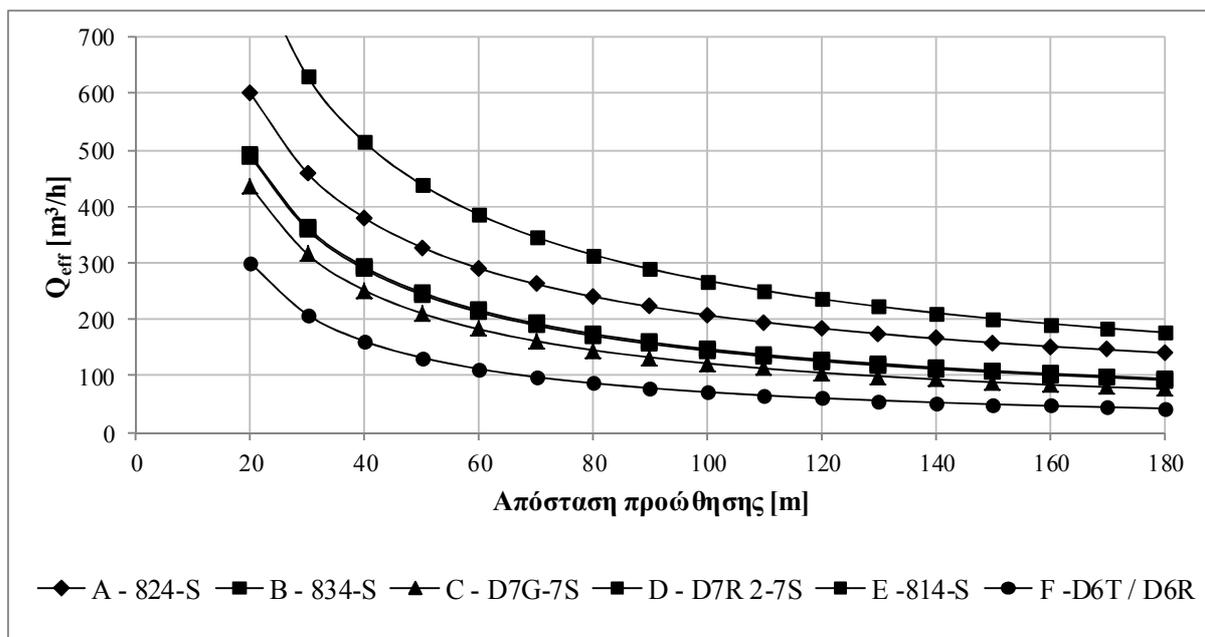
Σχήμα 2.37: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας αποξυστικού και φορτωτή (προσαρμοσμένο από Girmscheidt, 2010; σελ. 79)

Πίνακας 2.36: Εκτίμηση θεωρητικής παραγωγικότητας προωθητή/αποξεστικού με βάση το εδαφικό υλικό (προσαρμοσμένο από Kühn, 1984; σελ. 186)

| Q_{max} [m^3/h] | Ισχύς μηχανήματος [kW] | | | |
|-----------------------|------------------------|-----|-----|-----|
| | 75 | 150 | 200 | 300 |
| Συνεκτικό έδαφος | | | | |
| Στεγνό, κερματισμένο | 250 | 350 | 450 | 550 |
| Υγρό, κερματισμένο | 220 | 320 | 400 | 500 |
| Μη συνεκτικό έδαφος | | | | |
| Άμμος, λεπτόκοκκη | 210 | 290 | 380 | 460 |
| Άμμοχάλικο | 180 | 260 | 340 | 420 |
| Βράχος, κερματισμένος | 160 | 230 | 300 | 380 |



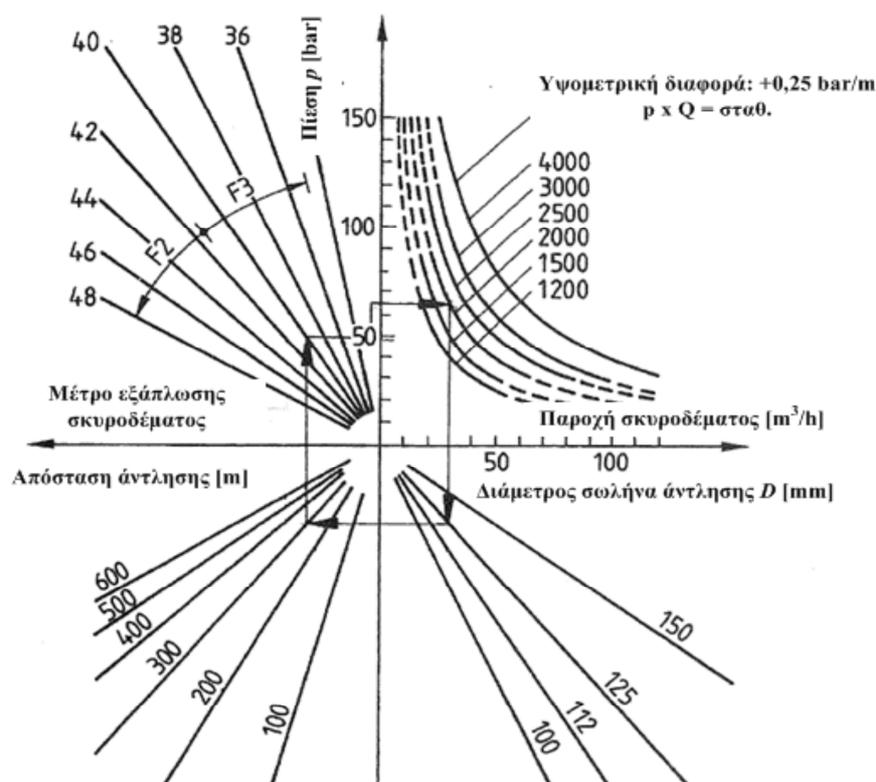
Σχήμα 2.38: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας μηχανημάτων ισοπέδωσης (προσαρμοσμένο από BML, 1983; σελ. 83)



Σχήμα 2.39: Νομογράφημα εκτίμησης ωριαίας παραγωγικότητας ερπυστριοφόρου προωθητή (προσαρμοσμένο από Caterpillar 39^η έκδοση, σελ. 1-49)

Πίνακας 2.37: Εκτίμηση ωριαίας παραγωγικότητας ισοπεδωτή κατά Girmscheidt (2010; σελ. 80)

| Είδος εργασίας | Ωριαία παραγωγικότητα Q_{th} [m^2/h] |
|-------------------------|---|
| Τελική διαμόρφωση | 8.000 |
| Εργασία σε ανοιχτό χώρο | 18.000 |
| Συντήρηση οδοστρώματος | 30.000 |
| Διαμόρφωση πρανούς | 6.000 |
| Εκχιονισμός | 50.000 |



Σχήμα 2.40: Νομογράφημα ταχείας εκτίμησης παραγωγικότητας αντλίας σκυροδέματος (προσαρμοσμένο από Hoffmann (2006; σελ. 593))

2.5.7. Παραγωγικότητα δομικών μηχανών

Το Παράρτημα Α συνοψίζει τα αποτελέσματα του υπολογισμού της παραγωγικότητας για τα οκτώ (8) μηχανήματα και τις δεκατέσσερις (14) μεθόδους εκτίμησης παραγωγικότητας που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Τα βασικά συμπεράσματα από την κριτική αξιολόγηση των μεθόδων εκτίμησης παραγωγικότητας συνοψίζονται παρακάτω:

- Η εκτίμηση της παραγωγικότητας για μία δεδομένη δραστηριότητα βασίζεται, είτε στη διατύπωση ενός γενικού πλαισίου υπολογισμού το οποίο έχει προέλθει από «ad hoc» μελέτη της δραστηριότητας που ενδιαφέρει τον μηχανικό ή περιορίζεται στην εφαρμογή μίας μεθόδου ανάλογα με τις προτιμήσεις του

μελετητή. Αυτό το κενό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας δεν είναι εύκολα επεξεργάσιμες, καθώς ενέχουν υπολογιστικές δυσκολίες, ενώ πολλές φορές οι παραδοχές της μίας αντικρούονται από τις αντίστοιχες παραδοχές της άλλης. Ακόμη, πολλές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν την ίδια δραστηριότητα, όπως αυτές που αναφέρθηκαν παραπάνω, χρησιμοποιούν διαφορετικούς συντελεστές ή διαφορετικό εύρος τιμών για τους ίδιους συντελεστές παραγωγικότητας.

- Συνεπώς, η απευθείας ποιοτική και, κυρίως, ποσοτική σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων είναι τουλάχιστον δυσχερής, αν όχι αδύνατη. Άλλωστε, οι διαφορές στα δεδομένα εισόδου των μεθόδων να έχουν ως αποτέλεσμα τον προσδιορισμό διαφορετικών εκτιμήσεων παραγωγικότητας για την ίδια δραστηριότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα Α.1. Αυτό έχει ως συνέπεια την διαφοροποίηση του μοναδιαίου κόστους και, κατ' επέκταση, επηρεάζει αρνητικά την οικονομοτεχνική ανάλυση του έργου. Γι' αυτό το λόγο είναι κατανοητό ότι απαιτείται μία δομημένη προσέγγιση στην εκτίμηση και συγκριτική αξιολόγηση της παραγωγικότητας που θα αντιμετωπίζει τις δυσκολίες που τονίστηκαν πιο πριν.
- Η εφαρμογή κάποιας μεθόδου ταχείας εκτίμησης της παραγωγικότητας αυξάνει τον βαθμό της ασάφειας και μειώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, καθώς δεν λαμβάνονται υπόψη οι λειτουργικές συνθήκες, δηλ. η μέθοδος εργασίας και τα χαρακτηριστικά της δραστηριότητας που εκτελείται. Αυτές οι μέθοδοι δίνουν μία προσεγγιστική εικόνα της αναμενόμενης παραγωγικότητας, αλλά θα πρέπει να επιβεβαιώνονται πάντοτε με μετρήσεις επί τόπου του έργου.

2.5.8. Μέτρηση της παραγωγικότητας

Η παραγωγικότητα μετράται είτε σε μακροσκοπικό (macro-level) είτε σε μικροσκοπικό (micro-level) επίπεδο (Lowe, 1987; Thomas and Kramer, 1988). Στην πρώτη περίπτωση θα πρέπει να εξεταστούν γενικές παράμετροι, όπως οι συμβατικές υποχρεώσεις του αναδόχου του έργου ή η εργατική νομοθεσία. Στη δεύτερη περίπτωση το ενδιαφέρον εστιάζεται στην οργάνωση και διαχείριση του έργου στο επίπεδο του εργοταξίου (Dozzi and AbouRizk, 1993). Η βελτίωση της παραγωγικότητας προϋποθέτει τη δυνατότητα ποσοτικού προσδιορισμού της ωριαίας ή ημερήσιας παραγωγικότητας ενός προκαθορισμένου συνόλου δραστηριοτήτων (Al-Sudairi, 2007; Gouett et al., 2011). Οι μετρηθείσες τιμές της παραγωγικότητας συγκρίνονται με τις αναμενόμενες τιμές που εκτιμήθηκαν κατά τη μελέτη του έργου ή, εάν αυτές δεν είναι διαθέσιμες, τότε συγκρίνονται με τιμές που προέρχονται από επαγγελματικά εγχειρίδια (Caterpillar, 2016; Komatsu, 2013; Liebherr, 2003), τη διεθνή βιβλιογραφία (Ostwald, 2000; RSMMeans, 2009; STLB-Bau, 2014) ή ιστορικά δεδομένα παραγωγικότητας της κάθε εταιρείας (Anson et al., 2002).

Η μέτρηση της παραγωγικότητας μπορεί να γίνει με τη χρήση τεχνικών και μεθόδων που αποτυπώνουν την αποδοτικότητα της εργασίας του μηχανικού εξοπλισμού και των συνεργείων. Η χρήση της μεθόδου εξαρτάται από τον επιθυμητό βαθμό ακρίβειας. Για χονδροειδείς υπολογισμούς του βαθμού απασχόλησης των μέσων

παραγωγής μίας κατασκευαστικής δραστηριότητας χρησιμοποιείται ο δείκτης μέτρησης πεδίου (ΔΜΠ) (field rating). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, κάθε εργάτης ή συνεργείο βρίσκεται πάντοτε σε δύο καταστάσεις: «εργασίας» (working) και «μη-εργασίας» (non-working). Ο δείκτης υπολογίζεται ως το κλάσμα του αριθμού των παρατηρήσεων σε κατάσταση «εργασίας» προς τον συνολικό αριθμό παρατηρήσεων με μία προσαύξηση 10% για την ενσωμάτωση της εργασιακής απασχόλησης του εργοδηγού ή του επικεφαλής του συνεργείου.

Για ελαφρώς πιο πολύπλοκες μετρήσεις, εφαρμόζεται η δειγματοληπτική μελέτη χρόνου (work sampling), η οποία βασίζεται στην στατιστική δειγματοληψία και είναι ελαφρώς πιο πολύπλοκη μέθοδος από τη μέτρηση πεδίου που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο (Liu and Borcharding, 1986; Thomas et al., 1984). Η μέθοδος εκτιμά το ποσοστό παραγωγικής εργασίας ενός εργάτη ή ενός συνεργείου σε σχέση με τη συνολική διάρκεια της εργασίας για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (π.χ. μία εργάτο-ημέρα). Παρόμοια τεχνική είναι και η μέθοδος της πεντάλεπτης μέτρησης (five minute rating), η οποία δεν βασίζεται στη θεωρία της στατιστικής δειγματοληψίας. Αντιθέτως, στηρίζεται στην απλή παρατήρηση μίας δραστηριότητας για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα (Thomas and Daily, 1983).

Πιο αναλυτική μέθοδος μέτρησης είναι το μοντέλο παραγωγικότητας και σταλίας (ΜΠΣ) (method productivity delay model) που προτάθηκε από τους Adrian και Boyer (1976) και επικαιροποιήθηκε από τον Adrian (2004) ως μία μέθοδος που θα συνδυάζε τις μελέτες χρόνου (time study) με την μέτρηση της παραγωγικότητας. Το ΜΠΣ στηρίζεται στη συλλογή δεδομένων πεδίου και την καταγραφή αυτών σε ειδική φόρμα, ενώ επικεντρώνεται στον χρόνο κύκλου του κυριότερου μέσου παραγωγής μίας δραστηριότητας (Park et al., 2005).

Οι προηγούμενες μέθοδοι και τεχνικές βασίζονται περισσότερο στις θεωρητικές παραδοχές της μελέτης των μεθόδων εργασίας (methods study) της εργονομίας (work measurement study) (Drewin, 1982; Price and Harris, 1985; REFA, 1991). Εξαρτώνται πολύ από την ικανότητα και την αντικειμενικότητα του παρατηρητή και δεν προσφέρονται για την μελέτη της επιρροής των συντελεστών παραγωγικότητας σε πραγματικές εργοταξιακές συνθήκες (Navon and Haskaya, 2006).

Έτσι, για τη μελέτη της παραγωγικότητας χρησιμοποιείται κυρίως μία άλλη τεχνική που έχει αποδειχθεί κατάλληλη για την εφαρμογή του παραγοντικού μοντέλου (Navon and Haskaya, 2006; Chin et al., 2005; Liu et al. 1995): το ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας (daily site report). Είναι ένας αποδοτικός τρόπος για (α) την καταγραφή κρίσιμων τιμών των συντελεστών παραγωγικότητας, (β) την αξιολόγηση της εξέλιξης των δραστηριοτήτων και (γ) την μέτρηση του ρυθμού κατανάλωσης των μέσων παραγωγής. Το δελτίο συγκεντρώνει μεγάλο όγκο πληροφοριών, όπως (Abdelssayed and Navon, 1999; Chin et al., 2005; Liu et al., 1995; Pogorilich, 1992; Russell, 1993): πλήθος και σύνθεση συνεργείων, υλικά, πλήθος και τύπος μηχανημάτων, σχεδιαστικές λεπτομέρειες, καταγραφή καιρικών συνθηκών, ποσότητες εργασιών, εργάτορες κ.ά. Όλα τα στοιχεία καταγράφονται καθημερινά και είτε είναι απευθείας επεξεργάσιμα σε ηλεκτρονική μορφή, είτε εισάγονται σε συγκεντρωτικές βάσεις δεδομένων. Αρκετά συχνά τα δεδομένα πεδίου εμπλουτίζονται με οπτικοακουστικό

υλικό μέσω βιντεοσκόπησης στοπ-καρέ (time lapse video) με τη χρήση ειδικά διαμορφωμένων διατάξεων για λόγους επικύρωσης και διατηρησιμότητας των δεδομένων (Everett et al., 1998). Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία πλήρης ηλεκτρονική βιβλιοθήκη στοιχείων παραγωγικότητας, από την επεξεργασία της οποίας θα μπορούσαν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για την διακύμανση της ημερήσιας παραγωγικότητας.

Η τυπική δομή ενός ημερήσιου δελτίου παραγωγικότητας περιλαμβάνει την πινακοειδή καταγραφή του χρόνου έναρξης και λήξης κάθε δραστηριότητας, την ποσότητα που παράχθηκε (π.χ. m³ σκυροδέτησης), καθώς και το πλήθος των μέσων παραγωγής που απασχολήθηκαν στο συγκεκριμένο διάστημα (O'Connor and Huh, 2006). Ακόμη, συγκρατούνται δευτερεύουσες πληροφορίες, οι οποίες ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση, όπως οι καιρικές συνθήκες, πιθανά προβλήματα ή σταλίες, χωροταξικά δεδομένα (π.χ. χιλιομετρική θέση εκτέλεσης εργασιών, γεωμετρικά στοιχεία δομικών στοιχείων) και τα αντίστοιχα κέντρα κόστους των δραστηριοτήτων που παρακολουθούνται. Η δομή του αντίστοιχου ημερήσιου δελτίου παραγωγικότητας που συντάχθηκε για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της διατριβής παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο §3.

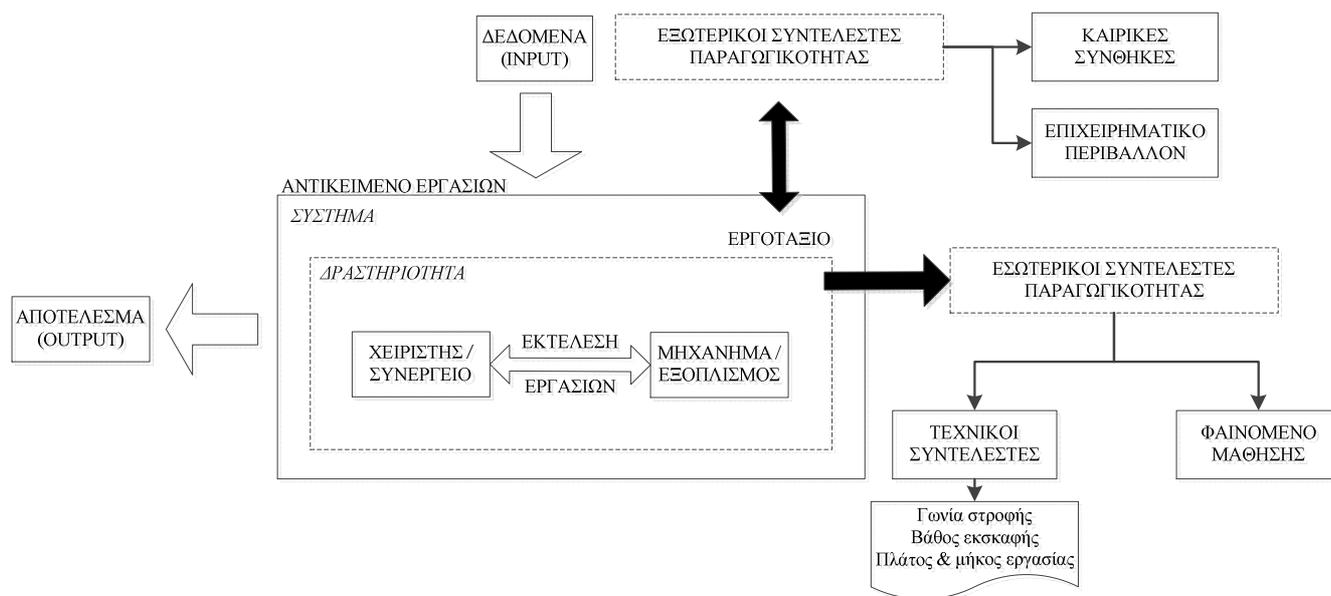
2.6. Συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα και το φαινόμενο της μάθησης

Η κατασκευαστική διαδικασία είναι ένα σύστημα που έχει συγκεκριμένες εισόδους (π.χ. ποσότητα εργασίας) και μέσω της εκτέλεσης δραστηριοτήτων παράγει συγκεκριμένες εξόδους (π.χ. ολοκληρωμένο τεχνικό έργο) (Halligan et al., 1994; Steinmetzger, 2005; Thiengburanatham, 2003). Το Σχήμα 2.41, αποτυπώνει την αλληλεπίδραση της κατασκευαστικής διαδικασίας με τους συντελεστές παραγωγικότητας. Οι συντελεστές παραγωγικότητας διαχωρίζονται σε εξωτερικούς και εσωτερικούς, με βάση το εύρος της επιρροής τους στο τεχνικό έργο (Dai et al., 2007; Rojas and Agamvareekul, 2003). Για παράδειγμα, οι εξωτερικοί συντελεστές επηρεάζουν όλες τις δραστηριότητες ενός έργου. Τέτοιοι συντελεστές θεωρούνται οι καιρικές συνθήκες (El-Rayes and Moselhi, 2001), το επιχειρηματικό περιβάλλον μέσα στο οποίο υλοποιείται το έργο (Chan and Kaka, 2007) ή η τεχνολογική εξέλιξη των υλικών (Goodrum et al., 2009; Grau et al., 2009) και του μηχανικού εξοπλισμού (Goodrum and Haas, 2004; Hasan et al., 2013) που χρησιμοποιούνται στο έργο. Αντίθετα, οι εσωτερικοί συντελεστές παραγωγικότητας αφορούν σε ένα συγκεκριμένο τεχνικό έργο ως κατασκευαστικό σύστημα (Doloi, 2008), σε μία δραστηριότητα του έργου (Dai et al., 2009), σε ένα μηχάνημα (π.χ. ικανότητα χειριστή) (Bernold, 2007) ή σε συγκεκριμένο συνεργείο (Panas et al., 2010). Στο πλαίσιο της διατριβής εξετάζονται οι εσωτερικοί συντελεστές για τους παρακάτω λόγους:

A. Η παραγωγικότητα μελετάται στο επίπεδο της δραστηριότητας και η διακύμανσή της εξαρτάται από την επιρροή των εσωτερικών συντελεστών παραγωγικότητας.

B. Στόχος είναι η βελτίωση της μεθόδου εργασίας, η οποία εξαρτάται από τον αριθμό και το εύρος τιμών των εσωτερικών συντελεστών παραγωγικότητας.

Οι εσωτερικοί συντελεστές παραγωγικότητας διακρίνονται στους τεχνικούς συντελεστές, οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τις συνθήκες εργασίας και στους συντελεστές ανθρώπινου παράγοντα, με έμφαση στο φαινόμενο της μάθησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τεχνικών συντελεστών παραγωγικότητας είναι οι συντελεστές που εξετάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο για την εκτίμηση της παραγωγικότητας των δομικών μηχανών. Ο συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα εκφράζεται από το φαινόμενο της μάθησης και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 2.41: Συστημική θεώρηση της κατασκευαστικής διαδικασίας (προσαρμοσμένο από Steinmetzger, 2005)

Η εκτίμηση της παραγωγικότητας λαμβάνει υπόψη παράγοντες που αντικατοπτρίζουν την πρακτική και το ύφος της διοίκησης του έργου (Pantounakis and Panas, 2010; Shan et al. 2011). Μία από τις βασικές παραμέτρους που επηρεάζουν την παραγωγικότητα είναι η επαναληπτική φύση των εργασιών. Στη βάση αυτής της διαπίστωσης, η βελτίωση που παρατηρείται σε επόμενους κύκλους παραγωγής μίας συγκεκριμένης παραγωγικής διαδικασίας οφείλεται συχνά στο φαινόμενο της μάθησης της εργασίας μεταξύ των μέσων παραγωγής που απασχολούνται για την πραγματοποίησή τους (Thomas et al. 1986; Hijaji et al. 1992). Με άλλα λόγια, η παραγωγικότητα επαναληπτικών δραστηριοτήτων βελτιώνεται, όσο αυξάνεται η εμπειρία των συνεργείων που απασχολούνται στο έργο (Pellegrino et al., 2012). Ο χρόνος που απαιτείται (εργατοώρες) για την ολοκλήρωση επαναληπτικών δραστηριοτήτων μειώνεται, όσο αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων, καθώς (i) τα συνεργεία εξοικειώνονται με τη φύση της εργασίας, (ii) βελτιώνεται ο συντονισμός του μηχανικού εξοπλισμού και των συνεργείων, (iii) βελτιώνεται το επίπεδο οργάνωσης, διοίκησης και επίβλεψης του έργου, (iv) εφαρμόζονται αποδοτικότερες τεχνικές και κατασκευαστικές μέθοδοι, (v) εφαρμόζονται πιο αποδοτικά συστήματα ροής και διάθεσης υλικών επί τόπου του έργου και (vi) οριστικοποιείται η μελέτη, περιορίζοντας την ανάγκη για μετατροπές και πρόσθετες διορθωτικές ενέργειες (Thomas, 2009). Σε αυτό το πλαίσιο, θεωρείται ότι

ο ρυθμός μάθησης εκφράζει την επιρροή του ανθρώπινου παράγοντα στην παραγωγικότητα, δηλ. τη συμβολή της ικανότητας και της εμπειρίας των συνεργείων στην παραγωγικότητα.

Η ενσωμάτωση του φαινομένου της μάθησης στις μελέτες παραγωγικότητας ενισχύει την ακρίβεια του χρονοδιαγράμματος ή της προκοστολόγησης (Lutz et al. 1994), βελτιώνει τον έλεγχο και τον προγραμματισμό του έργου (Pellegrino et al. 2012) και παρέχει την απαραίτητη επιστημονική βάση για διεκδικήσεις χαμένων εργατοωρών (Thomas, 2009). Οι καμπύλες μάθησης χρησιμοποιούνται για την γραφική απεικόνιση της χρονικής διάρκειας, του κόστους ή των εργατοωρών που απαιτούνται για την εκτέλεση μία αλληλουχίας δραστηριοτήτων (Everett and Farghal 1994). Η θεωρία της καμπύλης μάθησης υποδεικνύει ότι ο απαιτούμενος χρόνος (εργατοώρες) για την παραγωγή μίας δομικής μονάδας μειώνεται ως ποσοστό του χρόνου που απαιτήθηκε για την παραγωγή της προηγούμενης μονάδας (UN, 1965; Jarkas and Horner, 2011). Το ποσοστό ονομάζεται ρυθμός μάθησης (learning rate) και χαρακτηρίζει την έκταση του φαινομένου της μάθησης για μία δραστηριότητα (Thomas et al., 1986). Μαθηματικά, ο ρυθμός μάθησης ταυτίζεται με την κλίση της καμπύλης μάθησης. Όσο μικρότερη η τιμή του ρυθμού μάθησης, τόσο εντονότερο το φαινόμενο της μάθησης. Για παράδειγμα, όταν ο ρυθμός μάθησης ισούται με 80%, τότε οι απαιτούμενες εργατοώρες για την παραγωγή μίας δομικής μονάδας (π.χ. ορόφου, οικίας, προκατασκευασμένου στοιχείου) είναι 80% λιγότερες από τον χρόνο που απαιτείται για την παραγωγή της προηγούμενης δομικής μονάδας. Όταν ο ρυθμός μάθησης ισούται με 100%, τότε δεν εκδηλώνεται το φαινόμενο της μάθησης για τη συγκεκριμένη δραστηριότητα.

Η θεωρία της καμπύλης μάθησης εφαρμόζεται για την εκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου παραγωγής μίας μονάδας (π.χ. όροφος πολυκατοικίας, χιλιόμετρο οδοποιίας) ή για τον υπολογισμό της αθροιστικής μέσης διάρκειας κατασκευής διαφορετικών ποσοτήτων μίας μονάδας (Farghal and Everett 1997; Jarkas and Horner 2011). Η αθροιστική μέση διάρκεια υπολογίζεται ως το πηλίκο του συνολικού χρόνου που απαιτήθηκε για την κατασκευή ενός δεδομένου αριθμού μονάδων προς τον αριθμό των μονάδων που παρήχθησαν (Hinze and Olbina 2009). Όταν χρησιμοποιείται η πρώτη κατηγορία δεδομένων, τότε η ανάλυση θεωρείται ότι εμπεριέχει μοναδιαία δεδομένα (unit data), ενώ όταν χρησιμοποιείται η δεύτερη κατηγορία δεδομένων, η ανάλυση εμπεριέχει αθροιστικά δεδομένα (cumulative data). Στο πλαίσιο της διατριβής, οι μελέτες παραγωγικότητας περιέχουν αθροιστικά δεδομένα, καθώς χρησιμοποιούνται συχνότερα στην μελέτη κατασκευαστικών δραστηριοτήτων (Jarkas and Horner 2011). Επιπρόσθετα, οι δημοσιευμένες μελέτες παραγωγικότητας με χρήση καμπύλων μάθησης ακολουθούν την στατιστική προσέγγιση (Thomas et al. 1986; Everett and Farghal 1997; Couto and Texeira 2005; Pellegrino et al. 2012), ενώ η χρήση τεχνικών προσομοίωσης είναι περιορισμένη (Hijazi et al. 1992; Lutz et al. 1994; Naresh and Jahren 1999). Οι καμπύλες μάθησης χρησιμοποιούνται είτε για την ερμηνεία ιστορικών δεδομένων (Jarkas and Horner 2011), είτε για την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης του συστήματος (Hinze and Olbina 2009). Όσον αφορά στο πεδίο εφαρμογής, η θεωρία της καμπύλης μάθησης κυμαίνεται από τις εργασίες σκυροδέτησης (Couto and Texeira 2005) και την κατασκευή κτιρίων (Pellegrino et al. 2012), έως και την κατασκευή τεχνικών έργων υποδομής μεγάλης κλίμακας (Everett and Farghal 1997; Naresh and Jahren 1999).

2.6.1. Μαθηματικά μοντέλα καμπύλων μάθησης

Το φαινόμενο της μάθησης μελετάται με τη χρήση μαθηματικών μοντέλων (ή καμπυλών μάθησης), τα οποία ερμηνεύουν τη διακύμανση της παραγωγικότητας ως συνάρτηση του αριθμού των δομικών μονάδων που παράγονται. Κάθε μελέτη παραγωγικότητας που ενσωματώνει το φαινόμενο της μάθησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη κρίσιμες παραμέτρους, όπως (α) τον καθορισμό του βέλτιστου μοντέλου για την εκτίμηση της παραγωγικότητας, (β) την κατανόηση των συντελεστών που επηρεάζουν τον ρυθμό της μάθησης, (γ) την εκτίμηση των παραμέτρων για τα μοντέλα μάθησης και (δ) την ποσοτικοποίηση της επιρροής του φαινομένου της μάθησης στην παραγωγικότητα (Hinze and Olbina, 2009). Γενικά, έχουν προταθεί πέντε βασικοί τύποι μοντέλων μάθησης όπως: (1) το ευθύγραμμο μοντέλο (straight-line model), (2) το μοντέλο “Stanford B”, (3) το κυβικό μοντέλο (cubic model), (4) το βαθμωτό μοντέλο (piecewise / stepwise model) και (5) το εκθετικό μοντέλο (exponential model) (Σχήμα 2.42) (Thomas et al., 1986; Srouf et al., 2016). Το ευθύγραμμο μοντέλο ή εναλλακτικά το μοντέλο «Boeing» ή «Wright» αποτελεί το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην συντριπτική πλειοψηφία των μελετών καμπύλης μάθησης (Hinze and Olbina 2009). Αναπτύχθηκε το 1936 από τον T. P. Wright και αφορούσε στον προσδιορισμό συντελεστών που επηρεάζουν το κόστος κατασκευής αεροσκαφών. Η ονομασία του προέρχεται από τη μορφή του διαγράμματος που προκύπτει όταν δημιουργηθεί σε λογαριθμική κλίμακα (log-log scale) (Hijazi et al. 1992). Οι Hinze και Olbina (2009) ισχυρίζονται ότι η υιοθέτηση άλλων μαθηματικών μοντέλων δεν αλλάζει την ακρίβεια της ανάλυσης και γι’ αυτό τον λόγο το ευθύγραμμο μοντέλο υιοθετήθηκε στη διατριβή. Η μαθηματική έκφραση του ευθύγραμμου μοντέλου, όπως έχει προσαρμοστεί για την κατασκευή των caisson, δίνεται από τις εξ. 2.35 και 2.36 παρακάτω (Hijazi et al. 1992):

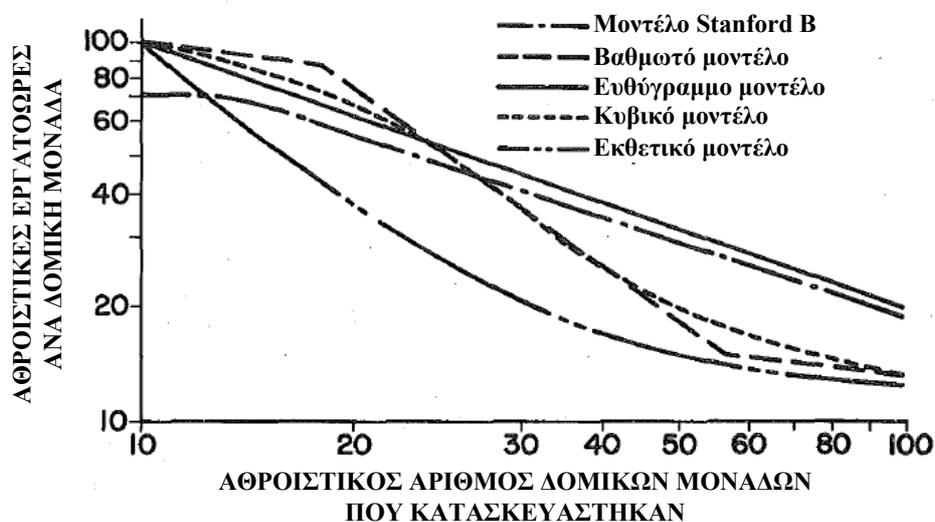
$$Y_x = A \times X^{n_c} \quad (\text{εξ. 2.35})$$

$$n_c = \ln L / \ln 2 \quad (\text{εξ. 2.36})$$

όπου Y_x = η αθροιστική μέση τιμή της χρονικής διάρκειας (εργατοώρες – wh) που απαιτείται για την ολοκλήρωση της κατασκευής X caisson, A = η χρονική διάρκεια κατασκευής του πρώτου caisson, X = ο συνολικός αριθμός caisson για τον οποίο υπολογίζεται η τιμή Y_x , n_c = η κλίση της λογαριθμικής καμπύλης, και L = ο ρυθμός μάθησης μετρούμενος σε ποσοστό.

Παρά το πλήθος των δημοσιευμένων μελετών, η εφαρμοσιμότητα της θεωρίας της καμπύλης μάθησης στις κατασκευαστικές δραστηριότητες δεν έχει τεκμηριωθεί πλήρως (Jarkas and Horner 2011) και υποτιμάται η σημασία της στην κατασκευαστική διαδικασία (Lee et al., 2015). Επίσης, οι Hinze και Olbina (2009) τονίζουν ότι απαιτείται βαθύτερη διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας της καμπύλης μάθησης, έτσι ώστε να προσδιοριστούν όσον το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα οφέλη και τα πλεονεκτήματα στον προγραμματισμό των έργων. Επιπρόσθετα, οι Everett και Farghal (1994) θεωρούν ότι αντίστοιχη διερεύνηση απαιτείται και για τον τρόπο με τον οποίο το φαινόμενο της μάθησης σχετίζεται με τη φύση των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων που μελετούνται. Αυτές οι διαπιστώσεις αποτέλεσαν αφορμή για την μελέτη της εφαρμογής των καμπυλών μάθησης

στην εκτίμηση της παραγωγικότητας. Ο τρόπος ενσωμάτωσης του ρυθμού μάθησης σε μελέτες παραγωγικότητας με τη χρήση τεχνικών προσομοίωσης αναφέρεται λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 2.42: Βασικοί τύποι μοντέλων μάθησης (προσαρμοσμένο από Thomas et. al, 1986)

2.7. Αναλυτικές μέθοδοι εκτίμησης παραγωγικότητας

Σε αυτή την παράγραφο εξετάζονται πιο προχωρημένες μέθοδοι για τη μελέτη και τη βελτίωση της παραγωγικότητας μίας συγκεκριμένης κατασκευαστικής δραστηριότητας. Εξετάζεται η χρήση στατιστικών μεθόδων, καθώς και η εφαρμογή τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

2.7.1. Στατιστικά μοντέλα

Τα στατιστικά μοντέλα στηρίζονται στη χρήση τεχνικών παλινδρόμησης και διαχωρίζονται σε γραμμικά (linear) και μη γραμμικά (non-linear). Τα μοντέλα παλινδρόμησης εκφράζουν μαθηματικές σχέσεις μεταξύ εξαρτημένων (dependent variables) και ανεξάρτητων μεταβλητών (independent variables). Γενικά, η ανάλυση παλινδρόμησης αποτελεί μία στατιστική μέθοδο που χρησιμοποιεί τη σχέση μεταξύ μίας ή περισσότερων ποσοτικών ή ποιοτικών μεταβλητών, έτσι ώστε να προβλέψει την τιμή μίας μεταβλητής με βάση τις τιμές των άλλων μεταβλητών της ανάλυσης (Neter et al., 1996; Kutner et al., 2005). Η χρήση των γραμμικών μοντέλων παλινδρόμησης, η διεξαγωγή ανάλυσης διακύμανσης (analysis of variance) και ο σχεδιασμός πειραμάτων είναι πολύ διαδεδομένες μέθοδοι στη μελέτη της παραγωγικότητας κατασκευαστικών δραστηριοτήτων. Η επιτυχής εφαρμογή αυτών των μοντέλων απαιτεί την σωστή κατανόηση τόσο της θεωρίας, όσο και των πρακτικών δυσκολιών που μπορεί να προκύψουν από την χρήση αυτών των μοντέλων στη μελέτη πραγματικών προβλημάτων (Neter et al., 1996; Kutner et al., 2005).

Διακρίνονται δύο τύποι συσχετίσεων μεταξύ διαφόρων μεταβλητών: η λειτουργική συσχέτιση (functional relation) και η στατιστική συσχέτιση (statistical relation). Η λειτουργική συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών

μπορεί να εκφραστεί με μαθηματικό τρόπο. Εάν υποθεθεί ότι με «x» ισούται η ανεξάρτητη μεταβλητή και με «y» ισούται η εξαρτημένη μεταβλητή, τότε η λειτουργική συσχέτισή τους μπορεί να γραφεί ως εξής (Neter et al., 1996; Kutner et al., 2005) (εξ. 2.37):

$$y = f(x) \quad (\text{εξ. 2.37})$$

Η στατιστική συσχέτιση, αντίθετα με τη λειτουργική, δεν μπορεί να εκφραστεί με απόλυτα μαθηματικό τρόπο, καθώς η σχέση εξαρτημένης και ανεξάρτητης μεταβλητής δεν είναι απόλυτα καθορισμένη (Neter et al., 1996; Kutner et al., 2005). Συνεπώς, η ανάλυση παλινδρόμησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη της κατανομής μίας μεταβλητής εξόδου (output variable) (π.χ. παραγωγικότητα) σε σχέση με μία ή περισσότερες μεταβλητές εισόδου (input variable) (π.χ. παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγικότητα, όπως ο ρυθμός μάθησης της εργασίας). Η μεταβλητή εξόδου αποτελεί το ισοδύναμο της εξαρτημένης μεταβλητής, ενώ η μεταβλητή εισόδου αποτελεί το ισοδύναμο της ανεξάρτητης μεταβλητής. Τα μοντέλα παλινδρόμησης χωρίζονται σε μοντέλα απλής παλινδρόμησης (simple regression) και μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης (multiple regression). Τα μοντέλα του πρώτου τύπου περιέχουν μία εξαρτημένη και μία ανεξάρτητη μεταβλητή (Mohamed and Srinavin, 2005). Τα μοντέλα του δεύτερου τύπου περιλαμβάνουν μία εξαρτημένη και περισσότερες της μίας ανεξάρτητες μεταβλητές (Dunlop and Smith, 2004; Edwards and Holt, 2000). Συνεπώς, τα μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης είναι καταλληλότερα για την πρόβλεψη της παραγωγικότητας των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, καθώς η παραγωγικότητα (εξαρτημένη μεταβλητή) επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες (ανεξάρτητες μεταβλητές) (Zayed and Halpin, 2005b).

Η γενική μαθηματική διατύπωση του στατιστικού μοντέλου γραμμικής πολλαπλής παλινδρόμησης φαίνεται στην εξ. 2.38 (Neter et al., 1996; Kutner et al., 2005):

$$Y_i = b_0 + b_1 \times X_{i,1} + b_2 \times X_{i,2} + \dots + b_{p-1} \times X_{i,p-1} + \varepsilon_i \quad (\text{εξ. 2.38})$$

όπου: Y_i = εξαρτημένη μεταβλητή, $X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,p-1}$ = ανεξάρτητες μεταβλητές, b_0 = συντελεστής παρεμβολής (intercept); b_1, b_2, \dots, b_{p-1} = συντελεστές παλινδρόμησης (regression coefficients); ε_i = σφάλμα πρόβλεψης (error); $i = 1, 2, 3, \dots, n$; n = αριθμός παρατηρήσεων.

Η εξ. 2.38 μπορεί να γραφεί και ως εξής (εξ. 2.39):

$$Y_i = \sum_{k=0}^{p-1} b_k \times X_{i,k} + \varepsilon_i, \text{ όπου } X_{i0} \equiv 1 \quad (\text{εξ. 2.39})$$

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, τα μοντέλα παλινδρόμησης ενδέχεται να περιέχουν τόσο ποσοτικές, όσο και ποιοτικές μεταβλητές (Neter et al., 1996; Kutner et al., 2005). Ενδεικτικά, ποιοτικές

μεταβλητές για την εκτίμηση της παραγωγικότητας στις κατασκευές θα μπορούσαν να είναι οι καιρικές συνθήκες, η εμπειρία των συνεργείων ή των χειριστών των μηχανημάτων έργου και η διαθεσιμότητα του μηχανικού εξοπλισμού. Ακόμη όμως και οι ποιοτικές μεταβλητές πρέπει να ποσοτικοποιηθούν για να ενσωματωθούν στα στατιστικά μοντέλα. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση μεταβλητών δεικτών (indicator variables), οι οποίες παίρνουν διακριτές τιμές (Neter et al., 1996; Kutner et al., 2005). Για παράδειγμα, εάν η ποιοτική μεταβλητή αφορούσε τις καιρικές συνθήκες, ένας απλός διαχωρισμός θα μπορούσε να είναι ο εξής: όταν ο καιρός είναι αίθριος και εκτελούνται εργασίες, τότε η τιμή της μεταβλητής ισούται με 1, ενώ σε περίπτωση κακοκαιρίας (βροχόπτωση, χιονόπτωση) όπου απαιτείται η διακοπή των εργασιών, η τιμή της μεταβλητής είναι ίση με 0.

Ένα ακόμη σημαντικό σημείο στην στατιστική ανάλυση είναι οι έλεγχοι καλής προσαρμογής (goodness of fit) (Panas and Pantounakis, 2011). Η γραφική διερεύνηση της καλής προσαρμογής στηρίζεται στην εξέταση των διαγραμμάτων διασποράς (scatter diagrams), όπου οι τιμές κατά τον άξονα «X» αποτελούν τις προβλέψεις του μοντέλου και οι αντίστοιχες τιμές του άξονα «Y» είναι οι πραγματικές τιμές πεδίου. Στο διάγραμμα αποτυπώνεται η διαγώνιος, η οποία εκφράζει την ταύτιση της πραγματικής τιμής με την εκτιμηθείσα. Στην θεωρητική περίπτωση όπου η προσαρμογή είναι απόλυτη, όλα τα σημεία βρίσκονται επάνω στη διαγώνιο. Τέλος, πριν από τη στατιστική επεξεργασία ενός δείγματος θα πρέπει να εκτελεστεί μία ανάλυση για την εύρεση εκτόπων (outliers detection). Στο πλαίσιο της διατριβής χρησιμοποιούνται τρεις δείκτες για την εύρεση εκτόπων (απόσταση Mahalanobis, απόσταση Jackknife, στατιστικός δείκτης T^2).

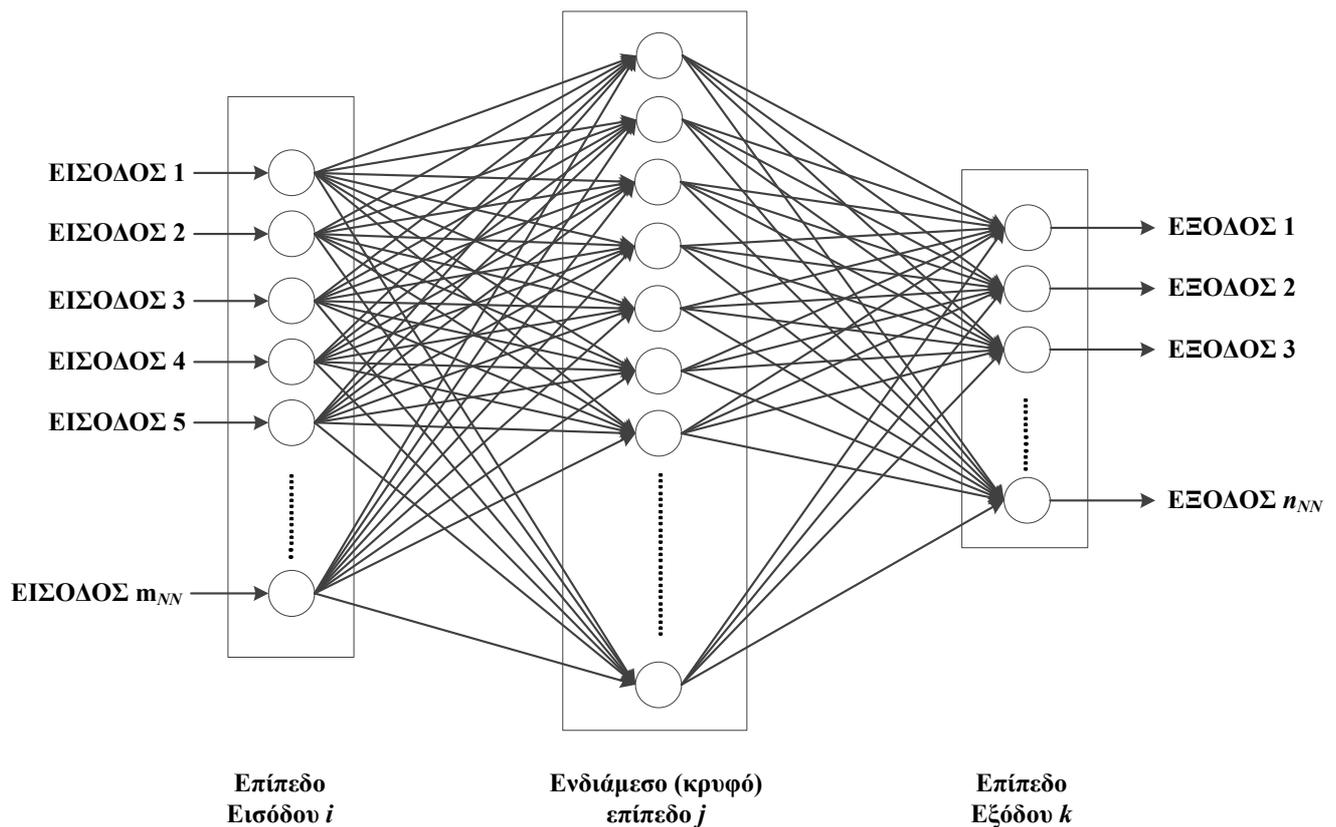
2.7.2. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ΤΝΔ) (artificial neural networks) ή απλώς νευρωνικά δίκτυα (neural networks) ανήκουν στην οικογένεια των μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence), οι οποίες προσπαθούν να μιμηθούν την ανθρώπινη ευφυΐα με τη χρήση υπολογιστών (Cheng et al., 2012). Τα νευρωνικά δίκτυα προσπαθούν να μοντελοποιήσουν τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου και ιδιαίτερα την ικανότητα μάθησης, σκέψης, αποθήκευσης και ανάκλησης πληροφοριών (Moselhi et al., 1991; Khosrowshahi, 2011). Οι περισσότερες ερευνητικές προσπάθειες στον τομέα της τεχνητής νοημοσύνης προσανατολίζονται στην ανάπτυξη προγραμμάτων τα οποία προσομοιάζουν στην ανθρώπινη συμπεριφορά, όπως λήψη αποφάσεων, προγραμματισμός, οπτική αναγνώριση, επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης (Kamarthi et al., 1992; Ok and Sinha, 2006). Το πεδίο εφαρμογής των τεχνητών νευρωνικών δικτύων καλύπτει ένα ευρύ φάσμα των έργων πολιτικού μηχανικού (Adeli, 2001), ενώ μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για τον υπολογισμό της παραγωγικότητας μηχανικού εξοπλισμού (Ok and Sinha, 2006; Tam et al., 2002;), την εκτίμηση της παραγωγικότητας σύνθετων κατασκευαστικών δραστηριοτήτων (Hola and Shabowicz, 2010; Zayed et al., 2005), την επιλογή της κατάλληλης κατασκευαστικής μεθόδου (Tam et al., 2005) και τον οικονομικό προγραμματισμό τεχνικών έργων (Chao and Chien, 2010; Cheng et al., 2009; Kim et al., 2004).

2.7.2.1. Βασικές έννοιες των νευρωνικών δικτύων

Τα νευρωνικά δίκτυα προσπαθούν να προσομοιάσουν στον τρόπο και στις μεθόδους επεξεργασίας πληροφοριών από τον ανθρώπινο εγκέφαλο (Kamarthi et al., 1992; Ok and Sinha, 2006). Τα νευρωνικά δίκτυα θεμελιώνονται θεωρητικά σε ένα απλοποιημένο μοντέλο της ανατομίας και φυσιολογίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Το μοντέλο αναπαριστά τον ανθρώπινο εγκέφαλο ως μία συλλογή από κύτταρα (νευρώνες – neurons) που συνδέονται μεταξύ τους με νεύρα (συνάψεις – synapses). Οι συνάψεις βοηθούν στην μεταφορά των σημάτων μεταξύ των νευρώνων. Οι νευρώνες ονομάζονται στοιχεία υπολογισμού (processing elements – PEs) (Zayed et al., 2005). Οι νευρώνες οργανώνονται σε επίπεδα (layers), ενώ τα επίπεδα συνδέονται μεταξύ τους με τυχαίο τρόπο (Tam et al., 2005). Η σύνδεση των επιπέδων επιτρέπει τη συστηματική επίλυση του δικτύου (Ezeldin and Sharara, 2006; Portas, 1996). Τα επίπεδα διαχωρίζονται σε επίπεδα εισόδου (input layer), επίπεδα εξόδου (output layer) και ενδιάμεσα ή κρυφά επίπεδα (middle ή hidden layer) (AbouRizk et al., 2001). Τα επίπεδα εισόδου αποτελούνται από τους νευρώνες εισόδου, ενώ το επίπεδο εξόδου από τους νευρώνες εξόδου αντίστοιχα. Τα ενδιάμεσα επίπεδα συνδέονται μόνο με το επίπεδο εισόδου και το επίπεδο εξόδου. Η τυπική δομή ενός νευρωνικού δικτύου φαίνεται στο Σχήμα 2.43. Σε κάθε σύνδεση μεταξύ δύο νευρώνων αντιστοιχεί και ένας συντελεστής βαρύτητας ή βάρος (weight). Τα νευρωνικά δίκτυα διακρίνονται σε αυτοσυσχετιστικά (autoassociative) ή ετεροσυσχετιστικά (heteroassociative), ανάλογα με τον αριθμό των νευρώνων στα επίπεδα εισόδου και εξόδου. Τα ετεροσυσχετιστικά δίκτυα έχουν διαφορετικό αριθμό νευρώνων στα επίπεδα εισόδου και εξόδου. Αντίθετα, τα αυτοσυσχετιστικά δίκτυα έχουν τον ίδιο αριθμό νευρώνων τόσο στα επίπεδα εισόδου, όσο και στα επίπεδα εξόδου (Tsoukalas and Uhrig, 1997). Εάν κάθε νευρώνας του δικτύου συνδέεται με όλους τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου, τότε το δίκτυο ονομάζεται πλήρως συνδεδεμένο (fully connected network). Εάν δεν υπάρχουν συνδέσεις μεταξύ νευρώνων ενός επιπέδου και νευρώνων προηγούμενου επιπέδου, τότε το δίκτυο ονομάζεται δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης ή δίκτυο με απλή τροφοδότηση (feedforward network) (Tsoukalas and Uhrig, 1997).

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα πραγματοποιούν δύο βασικές λειτουργίες: Μάθηση (learning) και ανάκληση (recall) (Cheng et al., 2009). Η μάθηση είναι η διαδικασία τροποποίησης των συντελεστών βαρύτητας του δικτύου, ώστε για δεδομένο διάνυσμα εισόδου να παραχθεί συγκεκριμένο διάνυσμα εξόδου. Με άλλα λόγια, το δίκτυο προσπαθεί να προσαρμόσει τα βάρη των συνδέσεων του δικτύου με σκοπό την πρόβλεψη του διανύσματος εξόδου (Schabowicz and Hola, 2007). Εάν τα διανύσματα εξόδου εισάγονται στο δίκτυο για την εκπαίδευσή του, τότε ο τύπος της μάθησης ονομάζεται «μάθηση υπό επίβλεψη» (supervised learning) (Shi, 1999b).



Σχήμα 2.43: Τυπική δομή ενός νευρωνικού δικτύου

Σε αντίθετη περίπτωση, δηλ. μάθηση χωρίς τη χρήση διανύσματος εξόδου, ο τύπος της μάθησης χαρακτηρίζεται ως «μάθηση χωρίς επίβλεψη» (unsupervised learning). Ανάκληση είναι η διαδικασία του υπολογισμού ενός διανύσματος εξόδου για συγκεκριμένο διάνυσμα εισόδου και τιμές βαρών. Σε αυτήν την περίπτωση το διάνυσμα εισόδου εισάγεται στο εκπαιδευμένο δίκτυο και το διάνυσμα εξόδου υπολογίζεται με βάση την εσωτερική δομή του δικτύου (Zayed and Halpin, 2005a). Το υπολογισθέν διάνυσμα εξόδου συγκρίνεται με το επιθυμητό ή πραγματικό διάνυσμα εξόδου, έτσι ώστε να υπολογιστεί το σφάλμα της πρόβλεψης (prediction error) (Yousefi et al., 2008). Το σφάλμα πρόβλεψης χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των βαρών του δικτύου, με σκοπό την αύξηση της ακρίβειάς του (prediction accuracy). Η συνάρτηση μετατροπής (scaling function) χρησιμοποιείται κατά την καταχώρηση των δεδομένων στον νευρωνικό δίκτυο, όπου οι τιμές μετατρέπονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να κυμαίνονται, είτε στο πεδίο τιμών $[0, 1]$, είτε στο αντίστοιχο πεδίο τιμών $[-1, 1]$ (Tam et al., 2005). Η συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) εφαρμόζεται κατά την εκτέλεση των υπολογισμών από το ένα επίπεδο στο άλλο. Για παράδειγμα, σε ένα νευρωνικό δίκτυο τριών επιπέδων οι συναρτήσεις ενεργοποίησης χρησιμοποιούνται κατά τον υπολογισμό των τιμών του ενδιάμεσου και του τελευταίου επιπέδου. Τέλος, η συνάρτηση μεταφοράς (transfer function) συμβάλλει στην παραγωγή των αποτελεσμάτων από το δίκτυο (Muqem et al., 2011). Για δίκτυα ενός επιπέδου, η συνάρτηση μεταφοράς είναι γραμμική, ενώ για δίκτυα πολλών επιπέδων η συνάρτηση μεταφοράς θα πρέπει να είναι μη-γραμμική.

2.7.2.2. Ο αλγόριθμος της οπισθοδιάδοσης του λάθους

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο συνήθως αποτελείται από τουλάχιστον τρία επίπεδα: ένα επίπεδο εισόδου, ένα επίπεδο εξόδου και ένα ενδιάμεσο ή κρυφό επίπεδο (Adeli, 2001; Moselhi et al., 2005). Το πλήθος των νευρώνων του κρυφού επιπέδου εξαρτάται από τις προτιμήσεις του σχεδιαστή του δικτύου. Οι Tsoukalas και Uhrig (1997) πρότειναν τη χρήση του θεωρήματος του Kolmogorov για τον προσδιορισμό του βέλτιστου πλήθους νευρώνων του κρυφού επιπέδου: Έστω τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με m_{NN} πλήθος νευρώνων στο επίπεδο εισόδου και n_{NN} πλήθος νευρώνων στο επίπεδο εξόδου, τότε το πλήθος των νευρώνων στο κρυφό επίπεδο δίνεται από τη σχέση: $2m_{NN}+1$.

Υπάρχουν πολλοί αλγόριθμοι για την μάθηση ενός δικτύου υπό επίβλεψη. Ο αλγόριθμος της οπισθοδιάδοσης του λάθους (back-propagation – BP) είναι πολύ διαδεδομένος σε μελέτες κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και μπορεί να εφαρμοστεί σε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με οποιοδήποτε πλήθος κρυμμένων επιπέδων (Adeli, 2001; Wilmot and Mei, 2005). Το δίκτυο τροφοδοτείται με μεγάλο αριθμό διανυσμάτων εισόδου και εξόδου που αποτελούν τα πρότυπα εκπαίδευσης του δικτύου (Holla and Schabowicz, 2010). Κάθε πρότυπο αποτελείται από ένα σύνολο δεδομένων εισόδου και τα αντίστοιχα δεδομένα εξόδου. Το σύνολο των ζευγών εισόδου/εξόδου ονομάζεται υπόδειγμα εκπαίδευσης (training set). Η διαδικασία εκπαίδευσης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα (Zayed et al., 2005; Holla and Schabowicz, 2010):

1. Επιλογή μικρών τιμών (θετικών και αρνητικών) για τα βάρη έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι το δίκτυο δεν θα κορεστεί λόγω αυξημένων τιμών των βαρών.
2. Επιλογή ενός ζεύγους εκπαίδευσης από το υπόδειγμα εκπαίδευσης.
3. Εφαρμογή του διανύσματος εισόδου στο δίκτυο.
4. Υπολογισμός των εξόδων του δικτύου.
5. Υπολογισμός του σφάλματος, δηλ. της διαφοράς μεταξύ της εξόδου του δικτύου και της επιθυμητής εξόδου.
6. Διόρθωση των βαρών έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα.
7. Επανάληψη των βημάτων 2 έως 6 για κάθε ζεύγος διανυσμάτων εισόδου και εξόδου του υποδείγματος εκπαίδευσης, έως ότου το σφάλμα του συστήματος διατηρηθεί σε αποδεκτά επίπεδα.

Η εκπαίδευση κάθε τεχνητού νευρωνικού δικτύου περιλαμβάνει δύο διαδικασίες: τον πρόσθιο υπολογισμό της εξόδου (forward output calculation) και τον ανάστροφο υπολογισμό του σφάλματος (backward error calculation), καθώς και την προσαρμογή των βαρών. Το αποτέλεσμα εξόδου του κάθε επιπέδου αποτελεί είσοδο για το επόμενο επίπεδο, έως ότου υπολογιστεί το αποτέλεσμα του επιπέδου εξόδου (τελευταίο επίπεδο του δικτύου).

2.8. Προσομοίωση

Παρά την μεγάλη ποικιλία και το πλήθος των αναλυτικών μεθόδων για την εκτίμηση και ανάλυση της παραγωγικότητας, η μελέτη της πολυπλοκότητας των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, καθώς και η αποτύπωση των δυναμικών αλληλεπιδράσεων των συντελεστών παραγωγικότητας δεν ήταν δυνατόν να εξεταστεί σε βάθος με τη χρήση στατιστικών ή παρεμφερών μεθόδων (Hajdasz, 2014). Αυτό έγινε εφικτό με την εφαρμογή προχωρημένων τεχνικών ανάλυσης, όπως η προσομοίωση (Zhang, 2008; Han and Halpin, 2005; Palaniappan et al., 2006; Said et al., 2009; Pantounakis and Panas, 2013; Panas and Pantounakis, 2014). Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι βασικές έννοιες της προσομοίωσης και περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησίμευσε για την ανάπτυξη του στοχαστικού μοντέλου παραγωγικότητας (αναλυτικότερα στο Κεφάλαιο 5).

2.8.1. Βασικές έννοιες της προσομοίωσης

Η προσομοίωση είναι ένα ισχυρό εργαλείο για την πρόβλεψη της παραγωγικότητας κατασκευαστικών δραστηριοτήτων (Lee et al., 2010), καθώς και για τη βελτιστοποίηση της χρήσης των μέσων παραγωγής (Hegazy and Kassab, 2003; Marzouk and Moselhi, 2004; Zhang, 2008).

2.8.1.1. Η έννοια του συστήματος και του μοντέλου προσομοίωσης

Η λύση ενός προβλήματος με τεχνικές προσομοίωσης προϋποθέτει την κατανόηση και τον καθορισμό του προβλήματος σε σχέση με το σύστημα στο οποίο εντάσσεται (Pritsker, et al., 1997; Law, 2007). Με άλλα λόγια, η δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης έχει ως βασικό σκοπό την επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με κατασκευαστικά συστήματα (Zhou et al., 2009). Συνεπώς, η δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης απαιτεί την ύπαρξη μίας οργανωμένης δομής για τη μελέτη των αλλαγών που εμφανίζονται στα κατασκευαστικά συστήματα (Pritsker et al., 1997). Στη συνέχεια, η γλώσσα της προσομοίωσης συνεισφέρει ώστε το μοντέλο προσομοίωσης να μεταφραστεί σε μία σειρά εντολών που είναι κατανοητές και μπορούν να εκτελεστούν με τη χρήση H/Y. Τι ορίζεται όμως ως «σύστημα» και τι ως «μοντέλο» στο πλαίσιο της προσομοίωσης;

Ως σύστημα ορίζεται «μία συλλογή οντοτήτων (π.χ. ανθρώπων, μηχανημάτων, εξοπλισμού) που δρουν συλλογικά και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με στόχο την επίτευξη ενός κοινού σκοπού» (§1.5) (Law, 2007).

Οι Halpin and Riggs (1992) όρισαν ως μοντέλο «την αναπαράσταση ενός συστήματος» (§1.5). Απαραίτητο στοιχείο για τη δημιουργία ενός μοντέλου είναι το πλαίσιο μέσα στο οποίο το σύστημα μπορεί να εξεταστεί και να αναλυθεί. Οι ίδιοι συγγραφείς υποστηρίζουν ότι ένα μοντέλο εμπεριέχει και απεικονίζει δεδομένα τα οποία θα πρέπει να ερμηνευτούν σύμφωνα με κάποιους κανόνες ή συμβάσεις, έτσι ώστε να προκύψουν πληροφορίες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στην λήψη των αποφάσεων. Οι Pritsker et al. (1997) ορίζουν ένα μοντέλο «ως περιγραφή ή απλοποίηση ενός συστήματος» και διευκρινίζουν ότι ένα μοντέλο ενδέχεται να είναι ένα φυσικό

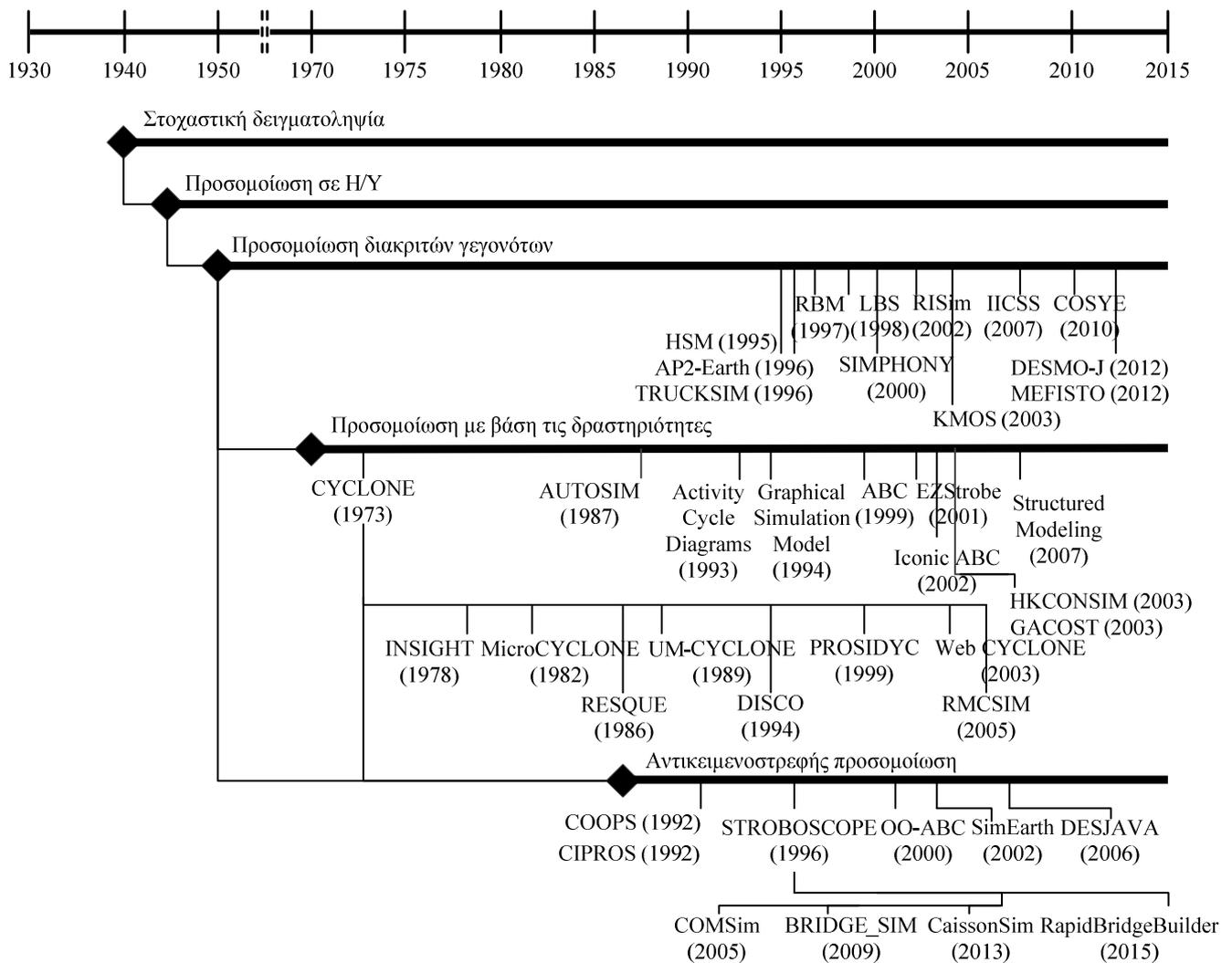
αντικείμενο υπό κλίμακα (π.χ. μία μακέτα), ένα σύνολο από μαθηματικές εξισώσεις ή συσχετίσεις (αφηρημένο μοντέλο – abstract model) ή μία γραφική απεικόνιση (οπτικό μοντέλο – visual model).

Σε αυτό το πλαίσιο, η προσομοίωση ορίζεται ως «η διαδικασία του σχεδιασμού ενός μοντέλου (σε H/Y) που απεικονίζει τη λειτουργία ενός πραγματικού συστήματος» (§1.5) (Pritsker et al., 1997). Συνεπώς, η διαδικασία της προσομοίωσης περιλαμβάνει αφενός τη δημιουργία του μοντέλου και αφετέρου τον σχεδιασμό και την εκτέλεση των απαραίτητων πειραμάτων πάνω στο μοντέλο.

Με αυτόν τον τρόπο εξετάζονται όλα τα πιθανά σενάρια προσομοίωσης, είτε αφορούν μοντέλα ντετερμινιστικής (deterministic simulation) ή στοχαστικής προσομοίωσης (stochastic simulation), είτε σχετίζονται με μοντέλα συνεχούς (continuous simulation) ή διακριτής προσομοίωσης (discrete simulation) (Law, 2007). Εάν ένα μοντέλο προσομοίωσης δεν περιέχει πιθανοτικά (π.χ. τυχαία) στοιχεία, τότε χαρακτηρίζεται ως ντετερμινιστικό. Συνήθως όμως, τα μοντέλα προσομοίωσης εμπεριέχουν κάποιο βαθμό τυχαιότητας στα δεδομένα εισόδου (γι' αυτό τον λόγο άλλωστε προτιμάται και η προσομοίωση ως τεχνική ανάλυσης συστημάτων), οπότε τα μοντέλα αυτά χαρακτηρίζονται ως στοχαστικά. Η διακριτή προσομοίωση ή αλλιώς και προσομοίωση διακριτών γεγονότων (discrete-event simulation), αφορά τη μοντελοποίηση συστημάτων οι μεταβλητές των οποίων δεν μεταβάλλονται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου, αλλά στιγμιαία, σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Με άλλα λόγια, το μοντέλο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων εμπεριέχει εξαρτημένες μεταβλητές, οι οποίες μεταβάλλονται σε προκαθορισμένες χρονικές στιγμές που ονομάζονται «γεγονότα» (events ή event times) (Pritsker et al., 1997). Αντίθετα, στα μοντέλα συνεχούς προσομοίωσης οι εξαρτημένες μεταβλητές του μοντέλου μεταβάλλονται με συνεχή τρόπο κατά τη διάρκεια του χρόνου της προσομοίωσης.

2.8.1.2. Η προσομοίωση στις κατασκευές

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.44, τεχνικές προσομοίωσης στις κατασκευές εφαρμόζονται ήδη από τις αρχές της δεκαετίας του 1970 με την εμφάνιση του συστήματος προσομοίωσης και της αντίστοιχης γλώσσας προσομοίωσης CYCLONE (Halpin and Woodhead, 1976; Martinez, 2010). Από τότε, η συστηματική εφαρμογή της προσομοίωσης στις κατασκευές, είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία πολλών επί μέρους συστημάτων και γλωσσών προσομοίωσης, όπως MicroCYCLONE, STROBOSCOPE, SIMPHONY, DISCO, UM-CYCLONE και COOPS (AbouRizk, 2010; Martinez, 2010). Στο Σχήμα 2.44 φαίνεται πως η προσομοίωση διακριτών γεγονότων αποτελεί τον βασικότερο τύπο προσομοίωσης με βάση το πλήθος των εφαρμογών που έχουν δημοσιευτεί στη βιβλιογραφία. Η πλειοψηφία των μοντέλων προσομοίωσης διακριτών γεγονότων απεικονίζονται γραφικά με τη χρήση δικτυωτών γραφημάτων στη βάση των Διαγραμμάτων Κύκλου Δραστηριοτήτων (ΔΚΔ) (Activity Cycle Diagrams).



Σχήμα 2.44: Χρονική εξέλιξη της ανάπτυξης μοντέλων προσομοίωσης στις κατασκευές

Όσον αφορά στον μηχανισμό δημιουργίας και διαχείρισης γεγονότων, ο «έλεγχος δραστηριοτήτων» (activity scanning) θεωρείται η καταλληλότερη τεχνική λόγω του ότι μπορεί και μοντελοποιεί σύνθετα συστήματα (Martinez and Ioannou, 1999; Pidd, 2004). Η τεχνική του ελέγχου δραστηριοτήτων προγραμματίζει και κατηγοριοποιεί την εκτέλεση των δραστηριοτήτων του μοντέλου προσομοίωσης με βάση την ικανοποίηση συγκεκριμένων κριτηρίων (π.χ. προτεραιότητα στην εκτέλεση των δραστηριοτήτων, διαθεσιμότητα μέσω παραγωγής) που έχουν καθοριστεί από τον συντάκτη του μοντέλου (Mohamed and AbouRizk, 2005). Τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εργαλεία σχεδιασμού και εκτίμησης της πορείας του έργου πριν από την έναρξή του, αλλά και ως εργαλεία ελέγχου κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του έργου (Martinez, 2010). Οι εφαρμογές της προσομοίωσης για τη μελέτη κατασκευαστικών δραστηριοτήτων έχουν αυξηθεί τα τελευταία χρόνια και οι λόγοι που οδήγησαν σε αυτή την αύξηση συνοψίζονται παρακάτω (AbouRizk, 2010; AbouRizk and Hague, 2009; Martinez, 2010):

- Επιτυχής εφαρμογή της προσομοίωσης στη βιομηχανία.

- Ένταση των προσπαθειών της ακαδημαϊκής κοινότητας για τη δημιουργία καλύτερων και αποδοτικότερων μοντέλων προσομοίωσης κατασκευαστικών δραστηριοτήτων.
- Οι περιορισμοί των κλασικών μεθόδων χρονικού προγραμματισμού (CPM, PERT) στην αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με το κατώτερο επίπεδο ανάλυσης μίας κατασκευαστικής διαδικασίας.
- Η ολοένα και αυξανόμενη αποδοχή των μοντέλων προσομοίωσης από επαγγελματίες του κλάδου των κατασκευών.
- Η τάση της κατασκευαστικής βιομηχανίας για αύξηση της παραγωγικότητας και της εξεύρεσης αποδοτικότερων τρόπων χρησιμοποίησης των μέσων παραγωγής.

Η προσομοίωση διακριτών γεγονότων έχει εφαρμοστεί εκτενώς για τη μελέτη κατασκευαστικών συστημάτων (Huang and Hsieh, 2005; Kim and Gibson, 2003; König and Habenicht, 2012; Martinez, 2010; Nasereddin et al., 2007; Sarker et al., 2012) και καλύπτει ένα μεγάλο εύρος έργων που κυμαίνονται από έργα υποδομών μεγάλης κλίμακας, όπως η κατασκευή γεφυρών (Said et al., 2009) και η υποδομή υπόγειων έργων (Luo and Najafi, 2007) ή λιμενικών εγκαταστάσεων (Rustom and Yahia, 2007). Η προσομοίωση καλύπτει την ανάλυση δραστηριοτήτων έντασης μηχανικού εξοπλισμού (Al-Hussein et al., 2006; Yang et al., 2003) καθώς και έντασης ανθρώπινου κεφαλαίου (Huang et al., 2004). Η χρήση εργαλείων προσομοίωσης επιτρέπει τη δημιουργία μοντέλων τα οποία αναπαριστούν τη λογική ή την αλληλουχία των διαφορετικών δραστηριοτήτων που είναι απαραίτητες για την κατασκευή ενός έργου, τα μέσα παραγωγής που είναι αναγκαία για την εκτέλεση των εργασιών (π.χ. συνεργεία, εξοπλισμός, διοίκηση) και το περιβάλλον υλοποίησης του έργου (π.χ. καιρικές συνθήκες, εδαφικές συνθήκες, εργασιακές συνθήκες, αγορά και προμήθεια υλικών) (AbouRizk, 2010; Zhang et al., 2007). Τα βασικά στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη είναι η στοχαστική φύση των μεταβλητών, τα μέσα παραγωγής και η δυναμική αλληλεπίδρασή τους κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης (Shi, 1998).

Η γλώσσα προσομοίωσης που χρησιμοποιείται στο πλαίσιο της διατριβής ονομάζεται STROBOSCOPE (Martinez, 1996) και αποτελεί εξέλιξη της γλώσσας προσομοίωσης CYCLONE (Martinez and Ioannou, 1999). Η επιλογή της συγκεκριμένης γλώσσας και μεθόδου προσομοίωσης τεκμηριώνεται από την γενικότερη αποδοχή της στην ακαδημαϊκή κοινότητα, όπως υποδηλώνεται από τα πολλά μοντέλα προσομοίωσης που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί σε τεχνικά έργα μικρής, μεσαίας και μεγάλης κλίμακας (AbouRizk et al., 2011). Από τότε που εμφανίστηκε η γλώσσα προσομοίωσης CYCLONE (Halpin, 1973), έχει σημειωθεί μεγάλη πρόοδος στην τεχνολογία και τις τεχνικές προσομοίωσης, με αποτέλεσμα τα τελευταία 40 χρόνια να έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα προσομοίωσης και αντίστοιχα λογισμικά προσομοίωσης με βάση τη CYCLONE. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι, αρχικά δημιουργήθηκαν τα μοντέλα προσομοίωσης INSIGHT, RESQUE, UM-CYCLONE και Micro-CYCLONE στη δεκαετία του '80 (Martinez and Ioannou, 1999; AbouRizk et al., 2011), ακολουθούμενα από τα μοντέλα COOPS, CIPROS, DISCO, SEACONS, STROBOSCOPE στη δεκαετία του '90 (Martinez, 1996; McCahill and Bernold, 1993), καταλήγοντας σε πιο πρόσφατα μοντέλα όπως τα ABC (Shi, 1999a), EZStrobe (Martinez, 2001), HKCONSIM (Lu et al., 2003), GACOST (Chuin and Feng, 2003),

RMCSIM (Tang et al., 2005), Bridge_SIM (Said et al., 2009) και RAPIDBRIDGEBUILDER (Ahn et al., 2015). Όσον αφορά στο πεδίο εφαρμογής των μοντέλων προσομοίωσης, τα μοντέλα που έχουν βασιστεί στη CYCLONE και STROBOSCOPE έχουν εφαρμοστεί ενδεικτικά στη μελέτη χωματουργικών δραστηριοτήτων (Lu, 2003; Marzouk and Moselhi, 2003), δραστηριοτήτων γεφυροποιίας (Ahn et al., 2015; Hong and Hastak, 2007; Said et al., 2009), κατασκευής δαπέδων (Hassan and Gruber, 2008), τοποθέτησης ξυλοτύπου (Huang et al., 2004), διάνοιξης πασσάλων (Zayed and Halpin, 2004a/b), διάνοιξης σηράγγων (Hajjar and AbouRizk, 2002; Mohamed and AbouRizk, 2005), κατασκευής δικτύου αποχέτευσης (Cheng and Feng, 2003), εργασιών ασφαλτόστρωσης (Nassar et al., 2003), εργασιών οδοποιίας (Zhang et al., 2002), εργασιών μεταφοράς και διάστρωσης σκυροδέματος (Zhang et al., 2005) καθώς και παραγωγής σκυροδέματος επί τόπου του έργου (Zayed and Halpin, 2001). Με βάση την ευρεία αποδοχή της γλώσσας CYCLONE / STROBOSCOPE από την ακαδημαϊκή κοινότητα, η έρευνα βασίστηκε στην πιο σύγχρονη εκδοχή της, που είναι το μοντέλο προσομοίωσης EZStrobe (Martinez, 2001), για την ανάπτυξη του στοχαστικού μοντέλου παραγωγικότητας. Περισσότερες λεπτομέρειες παρατίθενται στην επόμενη παράγραφο.

2.8.2. Το μοντέλο προσομοίωσης EZStrobe

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, πολλά από τα μοντέλα προσομοίωσης που έχουν δημοσιευθεί απευθύνονται ειδικά στη μελέτη κατασκευαστικών συστημάτων (Halpin and Riggs, 1992; Martinez, 1996; Martinez, 2010). Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούν τις αρχές των ΔΚΔ για την γραφική απεικόνιση των συστημάτων που αναπαριστούν και την τεχνική του ελέγχου δραστηριοτήτων ή, όπως αλλιώς ονομάζεται, του ελέγχου δραστηριοτήτων τριών φάσεων (three-phase activity scanning) (Pidd, 2004). Αυτά τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση απλών συστημάτων (CYCLONE), αλλά και πιο σύνθετων (STROBOSCOPE), έχουν όμως ένα βασικό μειονέκτημα: απαιτούν μεγάλο χρόνο εκμάθησης και ο χρήστης θα πρέπει να γράψει πολλές γραμμές κώδικα για να εκτελέσει ακόμη και απλά πειράματα προσομοίωσης. Γι' αυτό τον λόγο ο Martinez (2001) ανέπτυξε το μοντέλο προσομοίωσης EZStrobe που στηρίζεται στη γλώσσα προσομοίωσης STROBOSCOPE, αλλά λειτουργεί σε γραφικό περιβάλλον χρήστη (graphical user interface). Τα συστατικά μέρη και οι βασικές λειτουργίες του μοντέλου προσομοίωσης EZStrobe περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

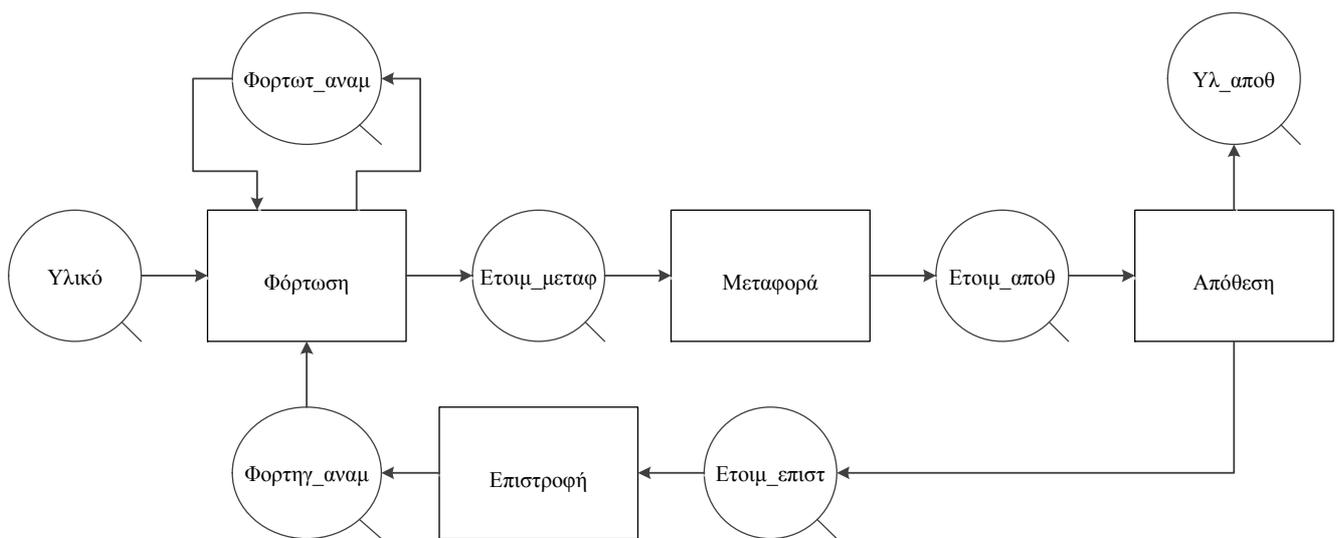
Τα μοντέλα ελέγχου δραστηριοτήτων δομούνται ανάλογα με τον αριθμό και το είδος των δραστηριοτήτων που συμμετέχουν στην κατασκευαστική διαδικασία. Τα σημεία στα οποία επικεντρώνεται η ανάλυση είναι ο καθορισμός των δραστηριοτήτων, οι συνθήκες που επιτρέπουν την εκτέλεση των δραστηριοτήτων, καθώς και το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσής τους. Σε αυτό το σημείο θα περιγραφεί ένα απλό σενάριο μίας χωματουργικής εργασίας, το οποίο θα αποτελέσει τη βάση αναφοράς για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του EZStrobe. Ας υποθεθεί ότι η χωματουργική εργασία περιλαμβάνει τη φόρτωση υλικού με τη χρήση φορτωτή σε φορτηγά οχήματα, τη μεταφορά του υλικού στον χώρο απόθεσης και την επιστροφή των φορτηγών οχημάτων

στον χώρο φόρτωσης για να επαναληφθεί η διαδικασία. Οι δραστηριότητες που περιλαμβάνονται στην εργασία, οι συνθήκες εκτέλεσής τους, καθώς και το αναμενόμενο αποτέλεσμα απεικονίζονται στον Πίνακα 2.38.

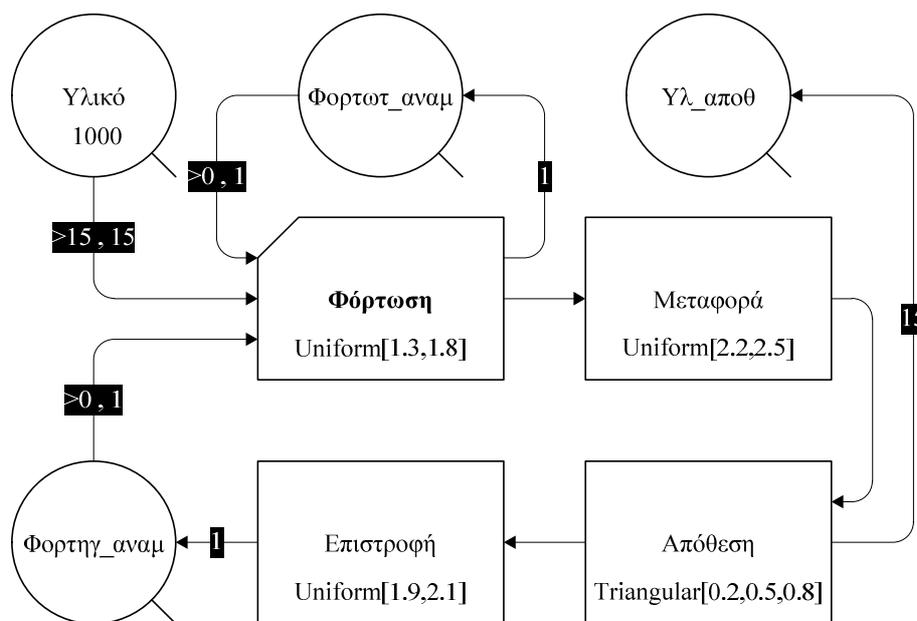
Πίνακας 2.38: Δραστηριότητες, συνθήκες εκτέλεσης και αποτέλεσμα δραστηριοτήτων του μοντέλου προσομοίωσης χωματουργικών εργασιών (προσαρμοσμένο από Martínez, 2001)

| Συνθήκες εκτέλεσης δραστηριοτήτων | Δραστηριότητα | Αποτέλεσμα δραστηριοτήτων |
|---|---------------|--|
| Φορτωτής διαθέσιμος στον χώρο φόρτωσης. Αναμονή άδειου φορτηγού στον χώρο φόρτωσης. Επαρκής ποσότητα υλικού στον χώρο φόρτωσης. | Φόρτωση | Φορτωτής διαθέσιμος στον χώρο φόρτωσης. Φορτωμένο φορτηγό όχημα έτοιμο προς αναχώρηση και μεταφορά. |
| Φορτωμένο φορτηγό όχημα έτοιμο προς αναχώρηση και μεταφορά. | Μεταφορά | Φορτωμένο φορτηγό όχημα έτοιμο προς απόθεση. |
| Φορτωμένο φορτηγό όχημα έτοιμο προς απόθεση. | Απόθεση | Υλικό έχει αποθεθεί. Άδειο φορτηγό έτοιμο προς επιστροφή. |
| Άδειο φορτηγό έτοιμο προς επιστροφή. | Επιστροφή | Αναμονή άδειου φορτηγού στον χώρο φόρτωσης. |

Το ΔΚΔ για την παραπάνω εργασία φαίνεται στο Σχήμα 2.45. Τα παραλληλόγραμμα στοιχεία αντιπροσωπεύουν τις δραστηριότητες (δηλ. υποδηλώνουν τη συνέργεια των μέσων παραγωγής για την ολοκλήρωση της δραστηριότητας), τα κυκλικά στοιχεία αντιπροσωπεύουν τις ουρές αναμονής (δηλ. υποδηλώνουν μέσα παραγωγής που βρίσκονται σε αδράνεια) και τα βέλη που συνδέουν τα στοιχεία μεταξύ τους αντιπροσωπεύουν τη ροή του υλικού μέσα από το μοντέλο (δηλ. τη σταδιακή μεταφορά του υλικού από τον χώρο φόρτωσης στον χώρο απόθεσης). Το ΔΚΔ απεικονίζει τα βασικά στοιχεία του μοντέλου προσομοίωσης, ενώ άλλα δεδομένα, όπως οι συνθήκες εκκίνησης μίας δραστηριότητας, που δεν σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα των μέσων παραγωγής, παραλείπονται. Το ΔΚΔ «μετατρέπεται» μέσω της γλώσσας προσομοίωσης STROBOSCOPE σε εκτελέσιμο κώδικα για να εκτελεστεί το πείραμα της προσομοίωσης. Τα ΔΚΔ του μοντέλου προσομοίωσης EZStrobe αποτελούν ουσιαστικά επέκταση της κλασικής μορφής των ΔΚΔ που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Για παράδειγμα, το ΔΚΔ του EZStrobe για την παραπάνω χωματουργική εργασία φαίνεται στο Σχήμα 2.46. Σε μία πρώτη εκτίμηση, το δίκτυο του Σχήματος 2.46 είναι πιο συμπυκνωμένο από αυτό του Σχήματος 2.45. Παρατηρείται αρχικά ότι κάποιες ουρές αναμονής, όπως η «Έτοιμο_προς_μεταφορά» (Ετοιμ_μεταφ) είναι περιττές, επειδή συνδέουν δραστηριότητες, η εκτέλεση των οποίων δεν απαιτεί την ικανοποίηση κάποιας συνθήκης. Τέτοιες ουρές παραλείπονται, αφού η συνθήκη εκτέλεσης της δραστηριότητας που έπεται είναι το αποτέλεσμα της δραστηριότητας που προηγείται.



Σχήμα 2.45: Συμβατική απεικόνιση ΔΚΔ για μία χωματουργική εργασία (προσαρμοσμένο από Martinez, 2001)

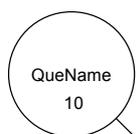


Σχήμα 2.46: Απεικόνιση της διαδικασίας της Σχήματος 2.12 με χρήση στοιχείων μοντελοποίησης EZStrobe (προσαρμοσμένο από Martinez, 2001)

Έτσι, στο προηγούμενο παράδειγμα η δραστηριότητα «Μεταφορά» θα εκτελεστεί «αυτόματα» αμέσως μετά το πέρας της δραστηριότητας «Φόρτωση», συνεπώς δεν χρειάζεται να προστεθούν στο μοντέλο φορτηγά οχήματα σε κατάσταση «Έτοιμο_προς_μεταφορά» (Ετοιμ_μεταφ). Σε αντίθεση με το ΔΚΔ του Σχήματος 2.45, τα στοιχεία μοντελοποίησης του συστήματος EZStrobe καθιστούν το δίκτυο μία πλήρη και μονοσήμαντη αναπαράσταση του συστήματος. Για παράδειγμα, ο αριθμός «1000» που αναγράφεται στην ουρά αναμονής «Υλικό», υποδηλώνει πως στην αρχή της προσομοίωσης η συγκεκριμένη ουρά θα περιέχει 1000 κυβικά μέτρα εδαφικού υλικού. Το πρώτο μέρος της παράστασης πάνω στο βέλος που συνδέει το «Φορτηγό_σε_αναμονή»

(Φορτηγ_αναμ) με την δραστηριότητα «Φόρτωση» ($\langle \langle 0 \rangle \rangle$) υποδηλώνει ότι μία από τις συνθήκες που είναι απαραίτητες για να ξεκινήσει η «Φόρτωση» είναι η ύπαρξη τουλάχιστον μίας μονάδας (δηλ. ενός φορτηγού) στην ουρά αναμονής «Φορτηγό_σε_αναμονή» (Φορτηγ_αναμ). Οι άλλες δύο συνθήκες που είναι απαραίτητες για να ξεκινήσει η «Φόρτωση» είναι η ύπαρξη τουλάχιστον 15 μονάδων υλικού (ουρά αναμονής «Υλικό») καθώς και η ύπαρξη μίας τουλάχιστον μονάδας (δηλ. ενός φορτωτή) στην ουρά αναμονής «Φορτωτής_σε_αναμονή» (Φορτωτ_αναμ). Το δεύτερο μέρος της παράστασης στα παρόμοια βέλη («,1», «,15», και «,1») υποδηλώνει ότι θα αφαιρεθούν 1, 15, και 1 μονάδα αντίστοιχα (εάν αυτό είναι δυνατόν) από τις ουρές αναμονής «Φορτηγό_σε_αναμονή» (Φορτηγ_αναμ), «Υλικό» και «Φορτωτής_σε_αναμονή» (Φορτωτ_αναμ) κάθε φορά που εκκινεί η «Φόρτωση». Η έκφραση «Uniform[1.3,1.8]» μέσα στη δραστηριότητα «Φόρτωση» υποδηλώνει ότι η διάρκεια της δραστηριότητας προκύπτει από την ομοιόμορφη κατανομή με ελάχιστη τιμή 1,3 και μέγιστη τιμή 1,8 (λεπτά της ώρας). Ο αριθμός «15» που φαίνεται πάνω στο βέλος σύνδεσης της δραστηριότητας «Απόθεση» με την ουρά αναμονής «Υλικό_σε_απόθεση» (Υλ_αποθ) υποδηλώνει ότι ένα από τα αποτελέσματα της δραστηριότητας «Απόθεση» είναι η προσθήκη 15 μονάδων υλικού στην ουρά αναμονής «Υλικό_σε_απόθεση» (Υλ_αποθ).

Στα μοντέλα προσομοίωσης EZStrobe όλες οι συνθήκες έναρξης των δραστηριοτήτων, καθώς και τα αποτελέσματά τους μετρώνται σε όρους μονάδων υλικού ή άλλων πόρων. Οι πόροι που εμπεριέχονται στα στοιχεία μοντελοποίησης θεωρούνται αλληλοσυμπληρούμενοι, ομοιόμορφοι και λαμβάνουν συνεχείς τιμές (δηλ. οι τιμές τους είναι πραγματικοί αριθμοί και όχι μόνο ακέραιοι). Ο τύπος των πόρων που χρησιμοποιούνται καθώς και η μονάδα μέτρησης εξαρτώνται από τον συντάκτη του μοντέλου, ο οποίος είναι υπεύθυνος και για την διατήρηση της λογικής συνέπειας του μοντέλου προσομοίωσης. Οι επόμενες παράγραφοι αναφέρουν τα βασικά στοιχεία μοντελοποίησης του μοντέλου EZStrobe, τις συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται στο μοντέλο, καθώς και την σημασία κάθε στοιχείου ξεχωριστά.



Η **ουρά αναμονής (Queue)** είναι ένα στοιχείο μοντελοποίησης που περιέχει αδρανείς πόρους. Η ονομασία της ουράς αναγράφεται στο κέντρο του στοιχείου μοντελοποίησης. Κατά την έναρξη της προσομοίωσης κάθε ουρά αναμονής περιέχει πεπερασμένο αριθμό πόρων, ο οποίος αναγράφεται κάτω από την ονομασία της ουράς. Οι πόροι τοποθετούνται στις ουρές όταν αποδεσμεύονται από προηγούμενες δραστηριότητες. Αντίστοιχα, οι πόροι αφαιρούνται από τις ουρές όταν προηγούνται δραστηριοτήτων υπό αίρεση (conditional activity). Οι ουρές έπονται οποιουδήποτε στοιχείου μοντελοποίησης εκτός από μία άλλη ουρά και προηγούνται μόνο δραστηριοτήτων υπό αίρεση.

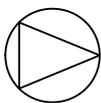


Η **δραστηριότητα υπό αίρεση (Conditional activity ή Combi)** είναι ένα στοιχείο μοντελοποίησης που αναπαριστά δραστηριότητες οι οποίες ξεκινούν όταν οι διαθέσιμοι πόροι στις ουρές είναι επαρκείς για να ικανοποιηθούν οι συνθήκες εκκίνησης. Η ονομασία

της δραστηριότητας υπό αίρεση αναγράφεται στο κέντρο του στοιχείου μοντελοποίησης. Ο αριθμός που αναγράφεται στο επάνω μέρος υποδηλώνει την προτεραιότητα της δραστηριότητας στη δέσμευση πόρων σε περίπτωση που ένας πόρος ενδέχεται να τροφοδοτεί περισσότερες της μίας δραστηριότητες υπό αίρεση. Η δραστηριότητα με τον μεγαλύτερο αριθμό έχει προτεραιότητα. Η προτεραιότητα μπορεί να είναι και αρνητικός αριθμός, ενώ η τυπική τιμή είναι μηδενική (π.χ. όταν δεν καθορίζεται η προτεραιότητα, τότε θεωρείται ότι είναι ίση με μηδέν). Η μαθηματική έκφραση στο κάτω μέρος της δραστηριότητας εκφράζει την χρονική διάρκεια του γεγονότος που αναπαριστά η δραστηριότητα. Συνήθως, η χρονική διάρκεια προκύπτει μέσω δειγματοληψίας από κάποια πιθανοτική συνάρτηση. Συνεπώς, διαφορετικά γεγονότα της ίδιας δραστηριότητας ενδέχεται να έχουν διαφορετική διάρκεια. Οι δραστηριότητες υπό αίρεση έπονται των ουρών αναμονής και μπορούν να τοποθετηθούν πριν από οποιοδήποτε στοιχείο μοντελοποίησης, εκτός από άλλες δραστηριότητες υπό αίρεση.

NormalName
Uniform[10,20]

Η **δεσμευμένη δραστηριότητα (Bound activity ή Normal)** είναι ένα στοιχείο μοντελοποίησης το οποίο αντιπροσωπεύει δραστηριότητες, οι οποίες εκκινούν όταν ολοκληρωθεί μία από τις δραστηριότητες που προηγούνται. Η ονομασία της δεσμευμένης δραστηριότητας αναγράφεται στο κέντρο του στοιχείου μοντελοποίησης. Η μαθηματική έκφραση στο κάτω μέρος της δραστηριότητας εκφράζει την χρονική διάρκεια του γεγονότος που αναπαριστά η δραστηριότητα. Συνήθως, η χρονική διάρκεια προκύπτει μέσω δειγματοληψίας από κάποια πιθανοτική συνάρτηση. Συνεπώς, διαφορετικά γεγονότα της ίδιας δραστηριότητας ενδέχεται να έχουν διαφορετική διάρκεια. Οι δεσμευμένες δραστηριότητες έπονται οποιοδήποτε στοιχείου μοντελοποίησης, εκτός από την ουρά αναμονής και μπορούν να τοποθετηθούν πριν από οποιοδήποτε στοιχείο μοντελοποίησης εκτός από άλλες δεσμευμένες δραστηριότητες.



Ο **διακλαδωτής (Fork)** είναι ένα πιθανοτικό στοιχείο μοντελοποίησης που κατευθύνει πόρους του μοντέλου προσομοίωσης. Συνήθως, έπεται μίας δραστηριότητας, αλλά μπορεί και να ακολουθεί μετά από άλλον διακλαδωτή. Όταν ολοκληρωθεί η δραστηριότητα που προηγείται, ο διακλαδωτής επιλέγει μία πιθανή διαδρομή για τους πόρους του μοντέλου. Εάν το επιλεγμένο στοιχείο είναι ουρά αναμονής, τότε η ουρά δέχεται τους πόρους που κατευθύνονται μέσα από τον διακλαδωτή. Εάν το επιλεγμένο στοιχείο είναι ένας άλλος διακλαδωτής, τότε ο δεύτερος διακλαδωτής θα επιλέξει το επόμενο στοιχείο μοντελοποίησης. Η σχετική πιθανότητα επιλογής ενός στοιχείου εκφράζεται από την τιμή «P» που αναγράφεται επάνω στο βέλος που συνδέει τον διακλαδωτή με το στοιχείο.

- **>0, 1** → Ο **σύνδεσμος δέσμευσης (Draw link)** συνδέει την ουρά αναμονής με την δραστηριότητα υπό αίρεση. Ο σύνδεσμος δέσμευσης περιέχει δύο είδη πληροφορίας που διαχωρίζονται με κόμμα: Το πρώτο μέρος εκφράζει την συνθήκη που πρέπει να ικανοποιηθεί για να εκκινήσει η δραστηριότητα ως συνάρτηση των περιεχόμενων πόρων της ουράς. Για παράδειγμα, η τιμή «>0» υποδηλώνει ότι η ουρά θα πρέπει να περιέχει τουλάχιστον μία μονάδα για να ξεκινήσει η δραστηριότητα υπό αίρεση. Το δεύτερο μέρος υποδηλώνει την ποσότητα των πόρων που θα αφαιρεθούν από την ουρά αναμονής όταν εκκινήσει η δραστηριότητα. Εάν η ποσότητα υπερβαίνει το περιεχόμενο της ουράς, τότε θα αφαιρεθεί το σύνολο των πόρων από την ουρά αναμονής.
- **1** → Ο **σύνδεσμος αποδέσμευσης (release link)** συνδέει μία δραστηριότητα με οποιοδήποτε άλλο στοιχείο μοντελοποίησης εκτός από την δραστηριότητα υπό αίρεση. Ο αριθμός που αναγράφεται επάνω στο βέλος υποδηλώνει τον αριθμό των πόρων που θα αφαιρεθούν κάθε φορά που ολοκληρώνεται η προηγούμενη δραστηριότητα.
- **P1** → Ο **σύνδεσμος διακλάδωσης (branch link)** συνδέει έναν διακλαδωτή με οποιοδήποτε άλλο στοιχείο μοντελοποίησης εκτός από την δραστηριότητα υπό αίρεση. Η μαθηματική έκφραση που αναγράφεται επάνω στο βέλος υποδηλώνει την σχετική πιθανότητα επιλογής του στοιχείου μοντελοποίησης κάθε φορά που ένας συγκεκριμένος αριθμός πόρων βρίσκεται στον διακλαδωτή.

2.9. Σύνοψη κεφαλαίου

Η ενότητα αυτή αναφέρθηκε στις βασικές έννοιες της παραγωγικότητας, καθώς και στις κυριότερες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της επίδρασής της στις κατασκευαστικές δραστηριότητες. Τεκμηριώθηκε η επιλογή του παραγοντικού μοντέλου και αναλύθηκε ο τρόπος υπολογισμού της παραγωγικότητας σε δραστηριότητες έντασης εργασίας και εξοπλισμού με χρήση δεκατεσσάρων (14) μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας. Δόθηκε έμφαση στα ακόλουθα μηχανήματα έργων, όπως αυτά αναφέρονται στην Euroliste (2015): μηχανήματα μεταφοράς και διανομής σκυροδέματος (αντλία σκυροδέματος), ανυψωτικά μηχανήματα (δομικός πυργογερανός), χωματουργικά μηχανήματα (εκσκαφέας, φορτωτής, προωθητής, αποξεστικό, ισοπεδωτής) και μεταφορικά οχήματα (φορτηγό αυτοκίνητο). Περιγράφηκαν οι συνηθέστερα εφαρμοζόμενες μέθοδοι μέτρησης της παραγωγικότητας και επιλέχθηκε το ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας ως το προτιμώμενο εργαλείο συλλογής δεδομένων πεδίου. Η ανάλυση των συντελεστών παραγωγικότητας διακρίθηκε σε δύο κατηγορίες, τους τεχνικούς συντελεστές και τον συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα, όπως εκφράζεται από τον ρυθμό μάθησης. Τέλος, περιγράφηκε το θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη στατιστικών μοντέλων, τεχνητών νευρωνικών δικτύων ενώ έγινε ειδική αναφορά στην προσομοίωση διακριτών γεγονότων με χρήση της γλώσσας προσομοίωσης STROBOSCOPE και του μοντέλου προσομοίωσης EZStrobe.

Κεφάλαιο 3 Ερευνητική μεθοδολογία

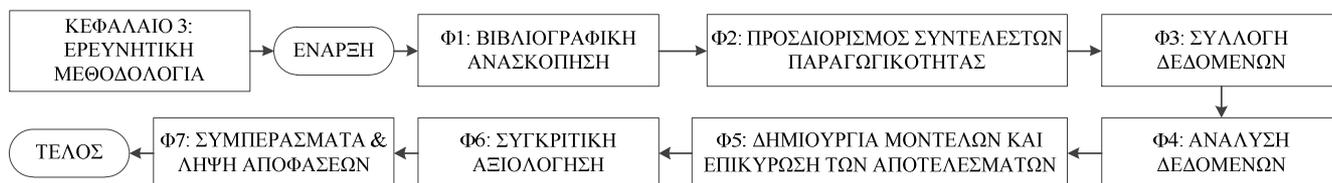
3.1. Σκοπός

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα βήματα της ερευνητικής μεθοδολογίας. Σκοπός είναι η καλύτερη κατανόηση του μεθοδολογικού πλαισίου που θα εφαρμοστεί για την εκτέλεση της έρευνας (Walker, 1997).

3.2. Φάσεις της έρευνας

Το Σχήμα 3.1 αποτελεί την γραφική απεικόνιση των βημάτων της έρευνας, η οποία αποτελείται από επτά φάσεις:

1. Βιβλιογραφική ανασκόπηση
2. Προσδιορισμός συντελεστών παραγωγικότητας
3. Συλλογή δεδομένων
4. Ανάλυση δεδομένων
5. Δημιουργία μοντέλων και επικύρωση των αποτελεσμάτων
6. Συγκριτική αξιολόγηση
7. Συμπεράσματα και λήψη αποφάσεων



Σχήμα 3.1: Φάσεις της ερευνητικής μεθοδολογίας

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται λεπτομερώς το περιεχόμενο κάθε μίας από τις προαναφερθείσες φάσεις.

3.2.1. Φάση 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση ολοκληρώθηκε στο Κεφάλαιο 2. Το κεφάλαιο αποτελείται από τρεις κύριες ενότητες (Σχήμα 2.1). Οι ενότητες καλύπτουν διαφορετικές ανάγκες της έρευνας. Κάθε ενότητα περιγράφει το θεωρητικό υπόβαθρο και τις κυριότερες εφαρμογές που σχετίζονται με το αντικείμενο που πραγματεύεται (Fellows and Liu, 2008; Harriss, 1998; Seymour et al., 1997). Όπου απαιτείται, διενεργείται συγκριτική αξιολόγηση της βιβλιογραφίας (π.χ. πολλαπλασιαστικό ή παραγοντικό μοντέλο παραγωγικότητας, μέθοδοι εκτίμηση παραγωγικότητας υδραυλικού εκσκαφέα, μέθοδοι μέτρησης της παραγωγικότητας), έτσι ώστε να

τεκμηριωθεί η επιλογή των μεθόδων και τεχνικών που εφαρμόστηκαν στο πλαίσιο της διατριβής (Fenn 1997; Hughes, 1994).

3.2.2. Φάση 2: Προσδιορισμός συντελεστών παραγωγικότητας

Οι κυριότεροι συντελεστές παραγωγικότητας προσδιορίστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Η εκτενής μελέτη της βιβλιογραφίας, οι συνεντεύξεις με ανώτερα στελέχη κατασκευαστικών εταιρειών, καθώς και η αλληλουχία εκτέλεσης κρίσιμων δραστηριοτήτων σε μεγάλο έργο υποδομής που αποτέλεσε βασική πηγή δεδομένων πεδίου για την έρευνα βοήθησαν στον προσδιορισμό του υποσυνόλου των συντελεστών παραγωγικότητας και των αντίστοιχων δραστηριοτήτων στις οποίες επικεντρώθηκε η μελέτη (Grix, 2001; Yin, 2013), όπως φαίνεται στον παρακάτω Πίνακα 3.1. Πιο συγκεκριμένα, στο πλαίσιο της αξιολόγησης της έρευνας (Κεφάλαιο §6), εξετάστηκαν η γωνία στροφής και το βάθος εκσκαφής για εκσκαφές με χρήση υδραυλικού εκσκαφέα (§ 6.3), το πλάτος και μήκος εργασίας για εργασίες που αφορούν στην σκυροδέτηση δαπέδων βαρέως τύπου από οπλισμένο σκυρόδεμα (§ 6.4), η αλληλουχία εκτέλεσης των δραστηριοτήτων, ο ρυθμός ολίσθησης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μηχανικού εξοπλισμού (§ 6.5), καθώς και ο συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα (όπως εκφράζεται από τον ρυθμό μάθησης) (§ 6.6), για την κατασκευή κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου (caissons). Ο τρόπος εξέτασης αυτών των συντελεστών και ένταξής τους στην μελέτη της παραγωγικότητας αναλύεται στα αντίστοιχα κεφάλαια.

Πίνακας 3.1: Εργασίες, συντελεστές παραγωγικότητας και κεφάλαιο αναφοράς

| Δραστηριότητες υπό μελέτη | Συντελεστές παραγωγικότητας | Κεφάλαιο αναφοράς |
|---|--|-------------------|
| Χωματουργικές / εκσκαφές | Βάθος εκσκαφής | §6.3 |
| | Γωνία στροφής | |
| Σκυροδέτηση δαπέδων βαρέως τύπου | Μήκος εργασίας | §6.4 |
| | Πλάτος εργασίας | |
| Κατασκευή κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson) με χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου | Αλληλουχία εκτέλεσης δραστηριοτήτων | §6.5 |
| | Στρατηγική απασχόλησης συνεργείων | |
| | Παράλληλη εκτέλεση δραστηριοτήτων | |
| | Ρυθμός ολίσθησης | |
| | Τεχνικά χαρακτηριστικά μηχανικού εξοπλισμού | |
| | Συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα (ρυθμός μάθησης της εργασίας) | §6.6 |

3.2.3. Φάση 3: Συλλογή δεδομένων

Η συλλογή των δεδομένων γίνεται με πολλές μεθόδους: απευθείας παρατήρηση (direct observation) και επίβλεψη των δραστηριοτήτων που μελετώνται, βιντεοσκόπηση και φωτογράφιση με τεχνικές στοπ-καρέ (time lapse), συνεντεύξεις με στελέχη έργου ή εταιρειών, μελέτη συμβατικών τευχών, σχεδίων, επιμετρήσεων (Bernold and Lee, 2010). Ειδικά για τη συλλογή δεδομένων παραγωγικότητας χρησιμοποιήθηκαν ένυπες και ηλεκτρονικές φόρμες (ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας), οι οποίες συμπληρώνονταν σε ημερήσια βάση (δες σχετικά §2.5). Πιο συγκεκριμένα, το ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας για την κατασκευή των δαπέδων βαρέως τύπου φαίνεται στο Σχήμα 3.2. Αντίστοιχα, για την κατασκευή των caisson, συμπληρώνεται το ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας για κάθε ημέρα εργασίας (Σχήμα 3.3), ενώ όποτε εκτελείται ολίσθηση, τότε συμπληρώνεται το κατάλληλο ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας, όπου σημειώνεται η πρόοδος των εργασιών ανά 0,50m ολίσθησης (Σχήμα 3.4)

3.2.4. Φάση 4: Ανάλυση δεδομένων

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αναλύθηκαν με τη χρήση στατιστικών μεθόδων. Σκοπός ήταν η κατάλληλη προετοιμασία τους για την μετέπειτα τροφοδότησή τους σε στατιστικά μοντέλα, μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων καθώς και μοντέλα προσομοίωσης (Lucko and Mitchell, 2010). Για τη δραστηριότητα της κατασκευής των δαπέδων βαρέως τύπου, τα κύρια ποσοτικά δεδομένα των στατιστικών μοντέλων ήταν το πλάτος και μήκος εργασίας, καθώς και η παραγωγικότητα μετρούμενη σε εργατοώρες ανά m^3 διαστρωμένου σκυροδέματος. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα που σχετίζονταν με το πλήθος των συνεργείων, καθώς και τον αριθμό των εργατών σε κάθε ένα από αυτά, το άμεσο εργατικό κόστος και δευτερεύοντα δεδομένα, όπως οι καιρικές συνθήκες και το χρονικό πλαίσιο αναφοράς. Τα ίδια δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν και στην κατάστρωση των νευρωνικών δικτύων. Για την προσομοίωση της κατασκευής των caisson, τα δεδομένα διαφοροποιήθηκαν, καθώς απαιτούνταν εκτεταμένη στατιστική επεξεργασία, ώστε να εξεταστεί η στοχαστικότητά τους (Martinez, 2010). Συνεπώς, πέραν των δεδομένων που φαίνονται στα Σχήματα 3.3 και 3.4, κάθε σύνολο ημερήσιων στοιχείων δεδομένων περιελάμβανε τον αριθμό του υπό κατασκευή caisson, ημερομηνία και ώρα μέτρησης, το είδος της εργασίας, τον αριθμό των εργατών του κάθε συνεργείου, τη στάθμη μέτρησης, κοστολογικά δεδομένα εργασίας και τις καιρικές συνθήκες (Yin, 2013). Ο τύπος της καταλληλότερης κατανομής, καθώς και οι βασικές παράμετροί της προσδιορίστηκαν μετά από στατιστικό έλεγχο. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι περισσότερες λεπτομέρειες για τον τρόπο διαχείρισης των δεδομένων αναφέρονται στα αντίστοιχα κεφάλαια του Πίνακα 3.1.

3.2.5. Φάσεις 5, 6 και 7: Σχεδιασμός της έρευνας

Ο σχεδιασμός της ερευνητικής προσέγγισης για τη δημιουργία των μοντέλων και την επικύρωση των αποτελεσμάτων (Φάση 5), τη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων (Φάση 6) και την εξαγωγή συμπερασμάτων, καθώς και τη λήψη αποφάσεων (Φάση 7), διαφοροποιήθηκε ανάλογα με την τεχνική ανάλυσης (στατιστική, νευρωνικά δίκτυα, προσομοίωση) που υιοθετήθηκε σε κάθε στάδιο της έρευνας (Abowitz and

Toole, 2010; Dainty, 2008; Rooke and Kagioglou, 2007). Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η ερευνητική προσέγγιση για κάθε μία από τις προαναφερθείσες τεχνικές ανάλυσης.

ΕΡΓΟ: ██████████

Αριθμός Φύλλου :

ΔΕΛΤΙΟ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΑΠΟΔΟΣΕΩΝ

| | | | |
|------------------|---------------------|--|--|
| ΗΜ/ΝΙΑ: | | ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ: | |
| ΚΑΙΡΟΣ: | | ΩΡΑ ΕΝΑΡΞΗΣ: | |
| ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ: | | ΩΡΑ ΛΗΞΗΣ: | |
| ΥΓΡΑΣΙΑ: | | Χ.Θ. ΕΝΑΡΞΗΣ : (π.χ. Χ.Θ.120 - 1.1) | |
| | | Χ.Θ. ΛΗΞΗΣ : (π.χ. Χ.Θ.160 - 1.1) | |
| ΕΡΓΑΣΙΑ: | ΣΚΥΡΟΔΕΤΗΣΗ ΔΑΠΕΔΩΝ | | |
| ΥΠΕΡΓΟΛΑΒΟΣ : | | | |
| ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΡΓΑΤΩΝ: | | | |
| ΜΗΧΑΝΗΜΑΤΑ : | | | |

| ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ | ΠΛΑΤΟΣ (m) | ΜΗΚΟΣ (m) | ΠΑΧΟΣ (m) | ΣΥΝΤ.ΣΥΝ. | ΙΣΟΔ. ΠΟΣΟΤΗΤΑ (m ³) |
|-------------------------------|------------|-----------|-----------|---------------|----------------------------------|
| ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ - ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΑ | | | | 10,00% | |
| ΔΙΑΣΤΡΩΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ | | | | 40,00% | |
| ΕΛΙΚΟΠΤΕΡΑΚΙ- ΒΟΥΡΤΣΑ | | | | 20,00% | |
| ΕΠΙΠΑΣΗ | | | | 20,00% | |
| ΑΡΜΟΚΟΠΗ | | | | 10,00% | |
| | | | | ΣΥΝΟΛΟ | |

Μέσο πάχος όπου δεν αναφέρεται: 0,30m

ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΕΙΣ:
(π.χ. 2 ώρες Χ 2 εργάτες)

**ΛΟΓΟΣ
ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ:**
(π.χ. ελάττω μηχανήματος)

ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΧΟΛΙΑ**ΕΡΓΟΤΑΞΙΑΡΧΗΣ****ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΜΗΧ/ΚΟΥ**

Σχήμα 3.2: Ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας για την κατασκευή δαπέδων

GLEITPROTOKOLL FÜR STANDARD GLEITSCHALUNG SLIPFORM REPORT FOR STANDARD SLIPFORM EQUIPMENT

| | | |
|---|--|--|
| Akt Nr./Baustelle: File no./Project: 2677 Caissons Port | Kunde/Customer | Kontaktperson beim Kunden: Contact at customer: |
| Bauleiter: Site manager: <i>Planner Alois</i> | Projektleiter: Mr. Fuchs Project manager: | Projektassistent: Mr. Kern Project ass.: |
| Bauteil: Phase: <i>Caisson 31</i> | Blatt Nr.: Sheet no.: <i>4</i> von | Datum: Date: <i>05.08.2012</i> |

Gleithöhe Schichtanfang:
Slipform start elevation: *+9.700* um: *07:00*

Gleithöhe Schichtende:
Slipform end elevation: *+10.700* um: *19:00*

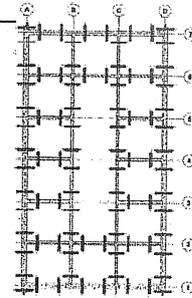
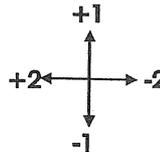
Gleitleistung: *1.00 m*
Slidingheight:

LOT / LASER- PROTOKOLL :
Optical Pump / Laser reading report (all measurements in mm !!)

Typical layout:

Only for Conical Slipform:

Height: m
Theoretical Diameter: m
Measured Diameter: m



| Zeit Time: | Höhe-m Elevation | A | | B | | C | | D | | E | | F | | G | | H | |
|---------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| <i>16:00</i> | <i>10.100</i> | <i>-6</i> | <i>-5</i> | <i>0</i> | <i>-2</i> | <i>-1</i> | <i>-4</i> | <i>0</i> | <i>0</i> | | | | | | | | |
| <i>18:00</i> | <i>10.600</i> | <i>-2</i> | <i>0</i> | <i>+2</i> | <i>0</i> | <i>+2</i> | <i>+2</i> | <i>-1</i> | <i>-1</i> | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Betriebsstörungen/Bemerkungen:

Special occurrences: *Start Concrete 12:20*

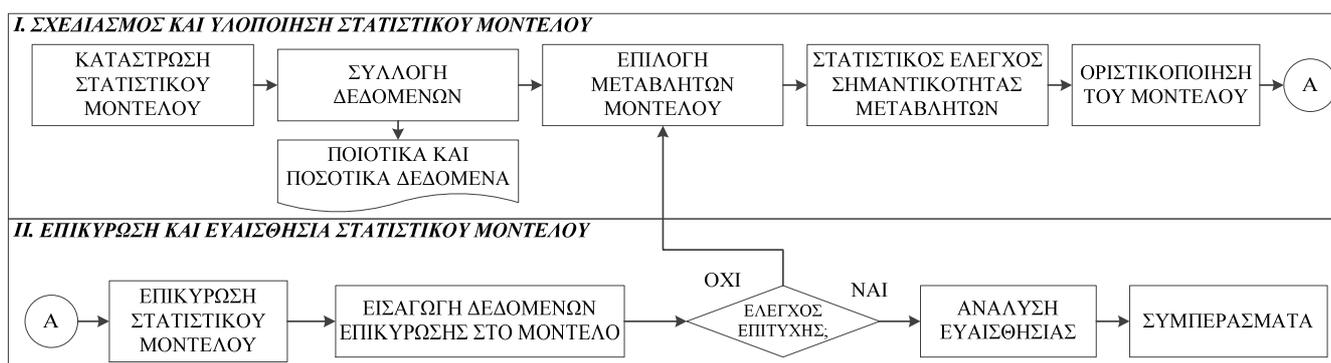
[Signature]
Datum, Unterschrift für den Kunden
Date, Signature for customer

[Signature]
Datum, Unterschrift für GBG
Date, Signature for GBG

Σχήμα 3.4: Δελτίο ημερήσιας καταγραφής παραγωγικότητας για την ολίσθηση του μεταλλότυπου των caisson

3.2.5.1. Στατιστικό μοντέλο

Η ερευνητική μεθοδολογία για τη δημιουργία του στατιστικού μοντέλου φαίνεται στο Σχήμα 3.5 παρακάτω. Η διαδικασία εκκινεί με τη συλλογή των δεδομένων, που μπορεί να αφορούν τόσο σε ποσοτικά, όσο και σε ποιοτικά δεδομένα (Raftery et al., 1997). Αφού επιλεγθούν οι μεταβλητές του μοντέλου (δες Πίνακα 3.1) πραγματοποιείται στατιστικός έλεγχος της σημαντικότητας των μεταβλητών. Η οριστικοποίηση της δομής του στατιστικού μοντέλου επιτρέπει την εκκίνηση της διαδικασίας επικύρωσής του (Flood and Issa, 2010). Η επικύρωση περιλαμβάνει την τροφοδοσία του μοντέλου με τα δεδομένα της επικύρωσης και τον στατιστικό έλεγχο της αξιοπιστίας του. Εάν ο έλεγχος κριθεί επιτυχής, τότε πραγματοποιείται η ανάλυση ευαισθησίας για την αξιολόγηση της απόκρισης του μοντέλου υπό διαφορετικές συνθήκες (Lucko and Rojas, 2010). Τέλος, τα αποτελέσματα του μοντέλου χρησιμοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων. Περισσότερες λεπτομέρειες παρέχονται στην παράγραφο §4.4.2.

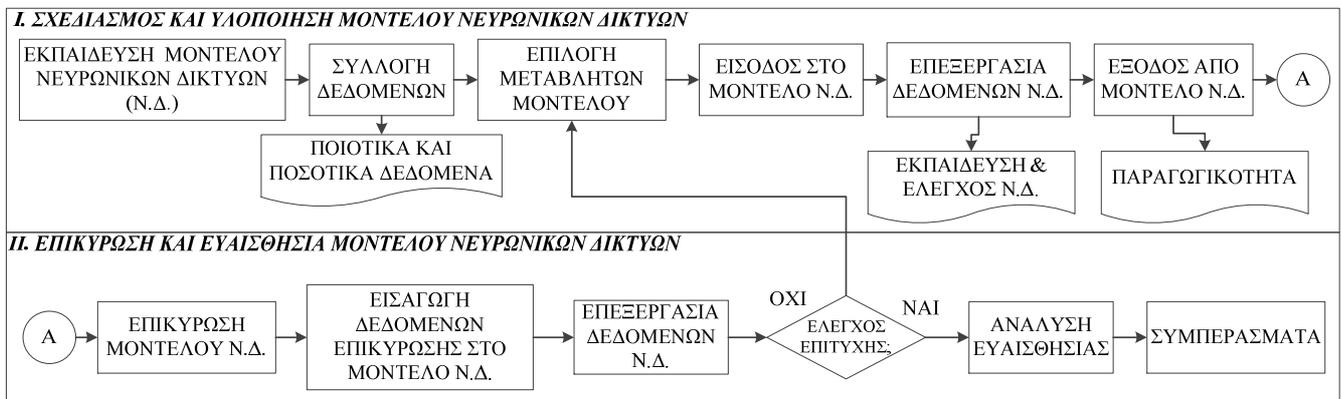


Σχήμα 3.5: Ερευνητική μεθοδολογία για την κατάστρωση του στατιστικού μοντέλου

3.2.5.2. Μοντέλο Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Η διαδικασία δημιουργίας, εκπαίδευσης και επικύρωσης του μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Η συλλογή των δεδομένων και η επιλογή των μεταβλητών γίνεται με παρόμοιο τρόπο σε σχέση με το στατιστικό μοντέλο. Η δομή του μοντέλου αφορά την επιλογή του πλήθους των ενδιάμεσων επιπέδων, τον αριθμό νευρώνων του κάθε επιπέδου, καθώς και των βασικών παραμέτρων (π.χ. συνάρτηση ενεργοποίησης, συνάρτηση κλίμακας, αρχικός βαθμός μάθησης, συντελεστές αδράνειας, συντελεστές αρχικών βαρών) (Flood and Issa, 2010). Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου γίνεται με χρήση ενός υποσυνόλου (58%) του συνόλου δεδομένων πεδίου που έχουν συλλεχθεί. Το εκπαιδευμένο δίκτυο ελέγχεται με χρήση του 15% του συνόλου των δεδομένων και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των νευρώνων εξόδου (π.χ. παραγωγικότητα) αποθηκεύονται. Η επικύρωση του δικτύου βασίζεται στο 27% του συνόλου των δεδομένων και όταν κριθεί ότι ικανοποιούνται τα στατιστικά κριτήρια σημαντικότητας των αποτελεσμάτων, το δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να

αξιολογηθεί η ευαισθησία του μοντέλου και να ληφθούν οι αποφάσεις που αφορούν στο έργο που μελετάται (Lucko and Rojas, 2010). Περισσότερες λεπτομέρειες παρέχονται στην παράγραφο §4.4.3.



Σχήμα 3.6: Ερευνητική μεθοδολογία για την κατάσρωση του μοντέλου νευρωνικών δικτύων

3.2.5.3. Στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης

Δεν υπάρχει μονοσήμαντος τρόπος ή μέθοδος για την εκτέλεση μίας μελέτης προσομοίωσης, καθώς εξαρτάται από τη φύση των δραστηριοτήτων που μελετώνται καθώς και τους στόχους της μελέτης (Martinez, 2010). Στο πλαίσιο της διατριβής αναπτύχθηκε στοχαστικό μοντέλο παραγωγικότητας και πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης. Η γενική προσέγγιση που εφαρμόστηκε για τον σχεδιασμό και την εκτέλεση των πειραμάτων της προσομοίωσης περιγράφονται παρακάτω (Σχήμα 3.7):

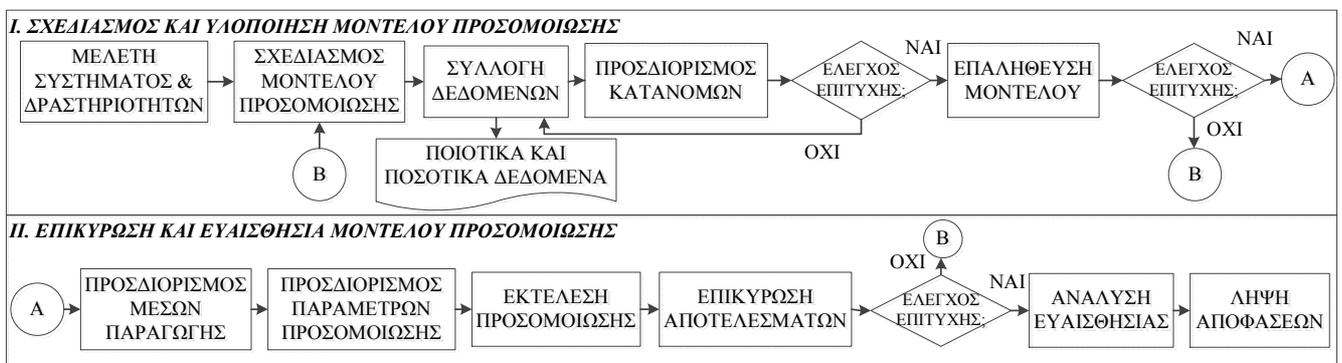
- **Βήμα 1:** Αρχικά, δημιουργείται το μοντέλο της προσομοίωσης μετά από προσεκτική μελέτη του συστήματος και των δραστηριοτήτων που αυτό περιλαμβάνει (Flood and Issa, 2010). Σκοπός είναι η κατανόηση του συστήματος, ο προσδιορισμός των ορίων του, των συστατικών του μερών, καθώς και των συσχετίσεων μεταξύ τους (AbouRizk, 2010).
- **Βήμα 2:** Δημιουργία του μοντέλου προσομοίωσης για μία συγκεκριμένη δραστηριότητα. Αυτή η φάση περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του επιπέδου ανάλυσης του μοντέλου, τον καθορισμό των στοιχείων μοντελοποίησης που θα δομήσουν το μοντέλο (π.χ. μέσα παραγωγής, επιμέρους δραστηριότητες και εργασίες), καθώς και την ορθή αποτύπωση της κατασκευαστικής μεθόδου. Στο πλαίσιο της διατριβής το μοντέλο της δραστηριότητας καταστρώνεται με την χρήση της γλώσσας προσομοίωσης STROBOSCOPE και των στοιχείων μοντελοποίησης του EZStrobe (Martinez, 2001), τα οποία βοηθούν στην οπτική αναπαράσταση του συστήματος που μελετάται. Η δομή του μοντέλου καθορίζεται από την τεχνική περιγραφή η οποία προσδιορίζει τον τύπο και την αλληλουχία των εργασιών που εμπλέκονται στην δραστηριότητα.
- **Βήμα 4:** Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της επεξεργασίας των δεδομένων εισόδου, που προέρχονται από στατιστικά έγκυρα ιστορικά δεδομένα ή από απευθείας μελέτη των δραστηριοτήτων που ενδιαφέρουν (δες Σχήμα 3.3 και Σχήμα 3.4) σε συνδυασμό με δευτερεύουσες πηγές (π.χ. συνεντεύξεις με εξειδικευμένο τεχνικό προσωπικό), έτσι ώστε να ενισχυθεί η αξιοπιστία των δεδομένων που συλλέγονται. Στη συνέχεια

αξιολογείται η ανεξαρτησία (sample independence) και η ομοιογένεια του δείγματος (sample homogeneity). Η ανεξαρτησία του δείγματος αξιολογείται με τη χρήση διαγραμμάτων διάταξης ή διασποράς. Η ομοιογένεια του δείγματος είναι κρίσιμη παράμετρος της διαδικασίας εισόδου και αξιολογείται με βάση τον έλεγχο υποθέσεων Kruskal-Wallis (Law, 2007). Οι πιθανές συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας και οι αντίστοιχες παράμετροί τους επιλέγονται με βάση τα συνοπτικά στατιστικά στοιχεία (summary statistics) (π.χ. τεταρτημόρια, διάγραμμα πλαισίου-απολήξεων) (Martinez, 2010). Ο έλεγχος καλής προσαρμογής των επιλεγμένων κατανομών αξιολογείται στη βάση συγκεκριμένων διαγραμμάτων (π.χ. διαγράμματα Q-Q ή P-P) σε συνδυασμό με στατιστικούς ελέγχους (π.χ. χ -τετράγωνο, Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling) (AbouRizk and Halpin, 1990; Graham et al., 2005; Maio et al., 2000).

- **Βήμα 5:** Έτσι, ξεκινάει μία επαναληπτική διαδικασία μέχρι να προσδιοριστεί η καταλληλότερη κατανομή. Εάν οι στατιστικοί έλεγχοι είναι επιτυχείς, διασφαλίζεται ότι το μοντέλο έχει επαληθευθεί, δηλ. ότι πράγματι αντιπροσωπεύει το σύστημα που ο αναλυτής είχε στο μυαλό του (Shi, 2002). Η επαλήθευση (verification) του μοντέλου και των βασικών του παραδοχών γίνεται για να εξασφαλιστεί ότι η υπολογιστική υλοποίηση του μοντέλου είναι απαλλαγμένη λαθών (Rooske et al., 1997).
- **Βήμα 6:** Όταν επαληθευθεί το μοντέλο, εκτελείται η προσομοίωση με την χρήση του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης. Αρχικά, γίνονται δοκιμαστικές εκτελέσεις της προσομοίωσης (pilot simulation runs) για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του μοντέλου. Εάν είναι ικανοποιητικές, προσδιορίζεται ο αριθμός των ανεξάρτητων επαναλήψεων (independent replications) και καταστρώνεται το πείραμα της προσομοίωσης. Μετά ακολουθεί η επικύρωση (validation) του μοντέλου, όπου τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα για να εξασφαλιστεί ότι ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα. Η επικύρωση περιλαμβάνει τον ακριβή προσδιορισμό των μέσων παραγωγής (τύπος, πλήθος) που περιλαμβάνονται στο μοντέλο (Lucko and Rojas, 2010). Όταν ένα μοντέλο έχει επαληθευτεί, τότε μέσω της επικύρωσης διασφαλίζεται ότι ο μελετητής έχει όντως κατανοήσει το πραγματικό σύστημα που μελετάται. Εάν τα αποτελέσματα της επικύρωσης δεν είναι ικανοποιητικά, το μοντέλο θα πρέπει να τροφοδοτηθεί με καινούρια δεδομένα για να βελτιωθεί η ακρίβειά του.
- **Βήμα 7:** Το πείραμα της προσομοίωσης μπορεί να ξεκινήσει αφού προσδιοριστούν οι βασικές του παράμετροι: αριθμός επαναλήψεων, διάστημα εμπιστοσύνης, συνθήκες τερματισμού της προσομοίωσης (AbouRizk, 2010).
- **Βήμα 8:** Ανάλυση της εξόδου των πειραμάτων για κάθε εναλλακτικό σχεδιασμό του συστήματος ή για την επιλογή της βέλτιστης λύσης ανάμεσα σε πεπερασμένο αριθμό εναλλακτικών. Τα αποτελέσματα του μοντέλου συγκρίνονται με τα πραγματικά δεδομένα πεδίου και αξιολογείται η εκτιμητική ακρίβεια του πειράματος.
- **Βήμα 9:** Στη συνέχεια, διενεργείται ανάλυση ευαισθησίας για να προσδιοριστεί η συμπεριφορά του μοντέλου υπό διαφορετικές τιμές των κρίσιμων παραμέτρων του (Hong and Hastak, 2007).

- Βήμα 10:** Εφαρμογή των αποτελεσμάτων στην λήψη των αποφάσεων, όσον αφορά στην χρήση των μέσων παραγωγής και στην στρατηγική ροής της εργασίας (workflow strategy). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η διαδικασία λήψης αποφάσεων απαιτεί την εξέταση εναλλακτικών σεναρίων (π.χ. χρήση διαφορετικών κατασκευαστικών μεθόδων και τεχνικών). Εάν απαιτείται η εφαρμογή ενός τέτοιου σεναρίου, θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στη δομή του μοντέλου, έτσι ώστε να ενσωματωθούν οι διαφοροποιήσεις στη λειτουργική του διάταξη.

Η παραπάνω διαδικασία εφαρμόστηκε για την προσομοίωση της δραστηριότητας κατασκευής κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson) με χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου, όπως θα περιγραφεί λεπτομερέστερα στα Κεφάλαια 5 και 6.



Σχήμα 3.7: Ερευνητική μεθοδολογία για την κατάστροση του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης

3.3. Σύνοψη κεφαλαίου

Η ενότητα παρουσίασε τα βασικά σημεία της ερευνητικής μεθοδολογίας που εφαρμόζεται για κάθε αναλυτική μέθοδο εκτίμησης της παραγωγικότητας (στατιστική, νευρωνικά δίκτυα, προσομοίωση). Τα επί μέρους στάδια της ερευνητικής μεθοδολογίας επεξηγήθηκαν διαγραμματικά, έτσι ώστε να αποτυπωθεί η συνολική ερευνητική προσέγγιση της διατριβής.

Κεφάλαιο 4 Εκτίμηση και συγκριτική αξιολόγηση της παραγωγικότητας

4.1. Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η διατύπωση μεθοδολογίας (α) για την ανάλυση των δημοσιευμένων μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας με σκοπό τη συγκριτική τους αξιολόγηση και (β) αντίστοιχης μεθοδολογίας για την μέτρηση των συντελεστών παραγωγικότητας με στατιστικά έγκυρο τρόπο σε εργοταξιακές συνθήκες για μετέπειτα χρήση τους στις μεθόδους εκτίμησης της παραγωγικότητας.

4.2. Εισαγωγή

Σε κάθε τεχνικό έργο, όπως έχει αναφερθεί και στο κεφάλαιο 2, η αναμενόμενη παραγωγή ανά μονάδα χρόνου (ώρα ή ημέρα), που ονομάζεται παραγωγικότητα, καθορίζει το κόστος και τη διάρκεια των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων (Park, 2006). Για λόγους χρονικού και οικονομικού προγραμματισμού, ο μηχανικός θα πρέπει να αποφασίσει αφενός ποιοι είναι οι βασικοί συντελεστές παραγωγικότητας που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και αφετέρου ποια μέθοδος εκτίμησης της παραγωγικότητας ή τεχνική μοντελοποίησης θα πρέπει να εφαρμοστεί (Song and AbouRizk, 2008). Για παράδειγμα, στις κατασκευαστικές δραστηριότητες, η παραγωγικότητα επηρεάζεται από ελεγχόμενους παράγοντες (controllable factors), που σχετίζονται με το τεχνικό αντικείμενο του έργου (π.χ. βάθος εκσκαφής, όγκος σκυροδέτησης) και από μη ελεγχόμενους παράγοντες (uncontrollable factors), οι οποίοι αντιπροσωπεύουν τη διαχειριστική επάρκεια, την ικανότητα του ανθρώπινου δυναμικού, καθώς και απρόβλεπτα γεγονότα (π.χ. καιρικές συνθήκες, ικανότητα χειριστή μηχανήματος) (Tam et al., 2002).

Σε αντιστοιχία με όσα αναφέρθηκαν την παράγραφο §2.6 οι ελεγχόμενοι παράγοντες εκφράζονται από τους εσωτερικούς συντελεστές παραγωγικότητας, ενώ οι μη ελεγχόμενοι παράγοντες εκφράζονται από τους εξωτερικούς συντελεστές παραγωγικότητας. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ελεγχόμενοι παράγοντες καθορίζονται από το τεχνικό αντικείμενο και είναι χρονικά μεταβαλλόμενοι. Γι' αυτό τον λόγο ο καθορισμός τους γίνεται σύμφωνα με εκτιμήσεις της αναμενόμενης τιμής τους σε σχέση με την τεχνική περιγραφή της δραστηριότητας (π.χ. εκσκαφή στα 3m βάθος και με γωνία στροφής 70°). Από την άλλη, το εύρος των μη ελεγχόμενων παραγόντων είναι άγνωστο και συνήθως λαμβάνεται υπόψη στα μοντέλα παραγωγικότητας με μία σταθερή τιμή. Όταν είναι διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία από παρόμοιες δραστηριότητες, τότε η παραγωγικότητα εκτιμάται με τη χρήση μεθόδων, οι οποίες βασίζονται σε αυστηρές μαθηματικές σχέσεις και είναι γνωστές ως «μέθοδοι προσανατολισμένες στα δεδομένα» (data-oriented methods) (Zayed και Halpin, 2004a). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτής της κατηγορίας μεθόδων είναι τα στατιστικά μοντέλα, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και η προσομοίωση διακριτών γεγονότων, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2. Όμως, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία, τότε θα πρέπει να εφαρμόζονται γενικευμένες μέθοδοι που είναι γνωστές ως «μέθοδοι προσανατολισμένες στη διαδικασία υπολογισμού» (process-oriented methods)

(Schexnayder, 1997). Σε αυτή την κατηγορία εμπίπτουν οι δημοσιευμένες μέθοδοι που αναφέρθηκαν στην παράγραφο §2.5 και αφορούν στην εκτίμηση της ωριαίας παραγωγικότητας υδραυλικού εκσκαφέα.

Η ντετερμινιστική προέλευση αυτών των μεθόδων έχει δεχθεί κριτική κυρίως για το γεγονός ότι υπεραπλουστεύει την πραγματικότητα, όμως ακόμη και σήμερα τυγχάνουν ευρείας εφαρμογής στην κοστολόγηση και τον προγραμματισμό των έργων πολιτικού μηχανικού, καθώς αντικατοπτρίζουν τις φυσικές διαστάσεις του τεχνικού προβλήματος και γι' αυτό τον λόγο είναι πολύ πιο κατανοητές από τους μηχανικούς (Schexnayder, 1997; Zayed and Halpin, 2005c). Επιπρόσθετα, όταν δεν είναι διαθέσιμα ιστορικά στοιχεία παραγωγικότητας, ο κοστολόγος μηχανικός δεν έχει άλλη εναλλακτική από την εφαρμογή τέτοιων μεθόδων, καθώς σε διαφορετική περίπτωση η διαδικασία εκτίμησης της παραγωγικότητας θα πρέπει να στηριχθεί μόνο στην προσωπική του κρίση (Song and AbouRizk, 2008). Με σκοπό την αύξηση της αξιοπιστίας της ανάλυσης και για να ξεπεραστεί η διστακτικότητα της άκριτης αποδοχής των αποτελεσμάτων μίας οποιασδήποτε μεθόδου, θα ήταν χρήσιμο να είναι δυνατή η σύγκριση των αποτελεσμάτων περισσότερων της μίας μεθόδου. Φυσικά, με δεδομένη την υποκειμενικότητα των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, η πρόβλεψη της παραγωγικότητας είναι ως ένα βαθμό μία διαδικασία προσδιορισμού της «βέλτιστης εκτίμησης» (best guess), καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων αυτών καθ' εαυτών εξαρτάται από την ικανότητα πρόβλεψης κάθε μεθόδου. Όμως, η συγκριτική αξιολόγηση παρέχει τουλάχιστον μία βάση αναφοράς για να διερευνηθεί η εφαρμογή εναλλακτικών κατασκευαστικών μεθόδων.

4.3. Μεθοδολογία για την συγκριτική αξιολόγηση γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας

Συνεπώς, σκοπός αυτής της ενότητας είναι να προτείνει ένα πλαίσιο το οποίο (α) θα μετασχηματίζει ένα σενάριο εργασίας σε ισοδύναμα και συγκρίσιμα μαθηματικά μοντέλα διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας και (β) θα αξιολογεί την ευαισθησία κάθε μεθόδου κάτω από διαφορετικές συνθήκες εκτέλεσης των εργασιών, έτσι όπως αυτές εκφράζονται από τους αντίστοιχους συντελεστές παραγωγικότητας.

Η προτεινόμενη συγκριτική μεθοδολογία παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Ουσιαστικά είναι μία διαδικασία τριών φάσεων, που επεξηγούνται στις επόμενες παραγράφους.

Φάση 1 – Μαθηματική μοντελοποίηση και κανονικοποίηση των μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας

Η πρώτη φάση ξεκινάει με τον καθορισμό της τεχνικής περιγραφής των δραστηριοτήτων (π.χ. όγκος υλικού που θα εκσκαφθεί στην περίπτωση χωματουργικών εργασιών, τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού). Στη συνέχεια, καθορίζεται ο αριθμός των μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας (n_e) που θα εφαρμοστούν για τη συγκεκριμένη δραστηριότητα. Για κάθε μέθοδο καθορίζεται ο συνολικός αριθμός συντελεστών παραγωγικότητας (n) και το πεδίο τιμών τους. Σε αυτό το σημείο είναι απαραίτητη η κανονικοποίηση των μαθηματικών τύπων υπολογισμού, έτσι ώστε να είναι σε συγκρίσιμη μορφή. Θεωρώντας ότι οι συντελεστές

παραγωγικότητας ουσιαστικά διορθώνουν τον θεωρητικό χρόνο κύκλου, έτσι ώστε να αντικατοπτρίζει τις πραγματικές συνθήκες εργασίας, όλοι οι μαθηματικοί τύποι υπολογισμού της παραγωγικότητας μπορούν γενικά να διατυπωθούν μέσω των εξ. 4.1 και 4.2, όπου ο όρος $\prod_{x=1}^n f_{norm}$ εκφράζει το γινόμενο των κανονικοποιημένων

διορθωτικών πολλαπλασιαστών (n_{norm}) που λαμβάνονται υπόψη. Με αυτόν τον τρόπο, η βασική εξ. 2.5 του παραγοντικού μοντέλου μετασχηματίζεται για δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού και έντασης εργασίας αντίστοιχα ως εξής (εξ. 4.1 και εξ. 4.2):

$$\text{Δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού} \quad Q_{eff} = Q_{th} \times \prod_{x=1}^n f_x = \frac{V_{th}}{t_{th}} \times \prod_{x=1}^n f_x = \frac{V_{th}}{t_{th} \times \prod_{x=1}^n f_{norm}} \quad (\text{εξ. 4.1})$$

$$\text{Δραστηριότητες έντασης εργασίας} \quad Q_{eff} = Q_{th} \times \prod_{x=1}^n f_x = \frac{t_{th}}{V_{th}} \times \prod_{x=1}^n f_x = \frac{t_{th} \times \prod_{x=1}^n f_{norm}}{V_{th}} \quad (\text{εξ. 4.2})$$

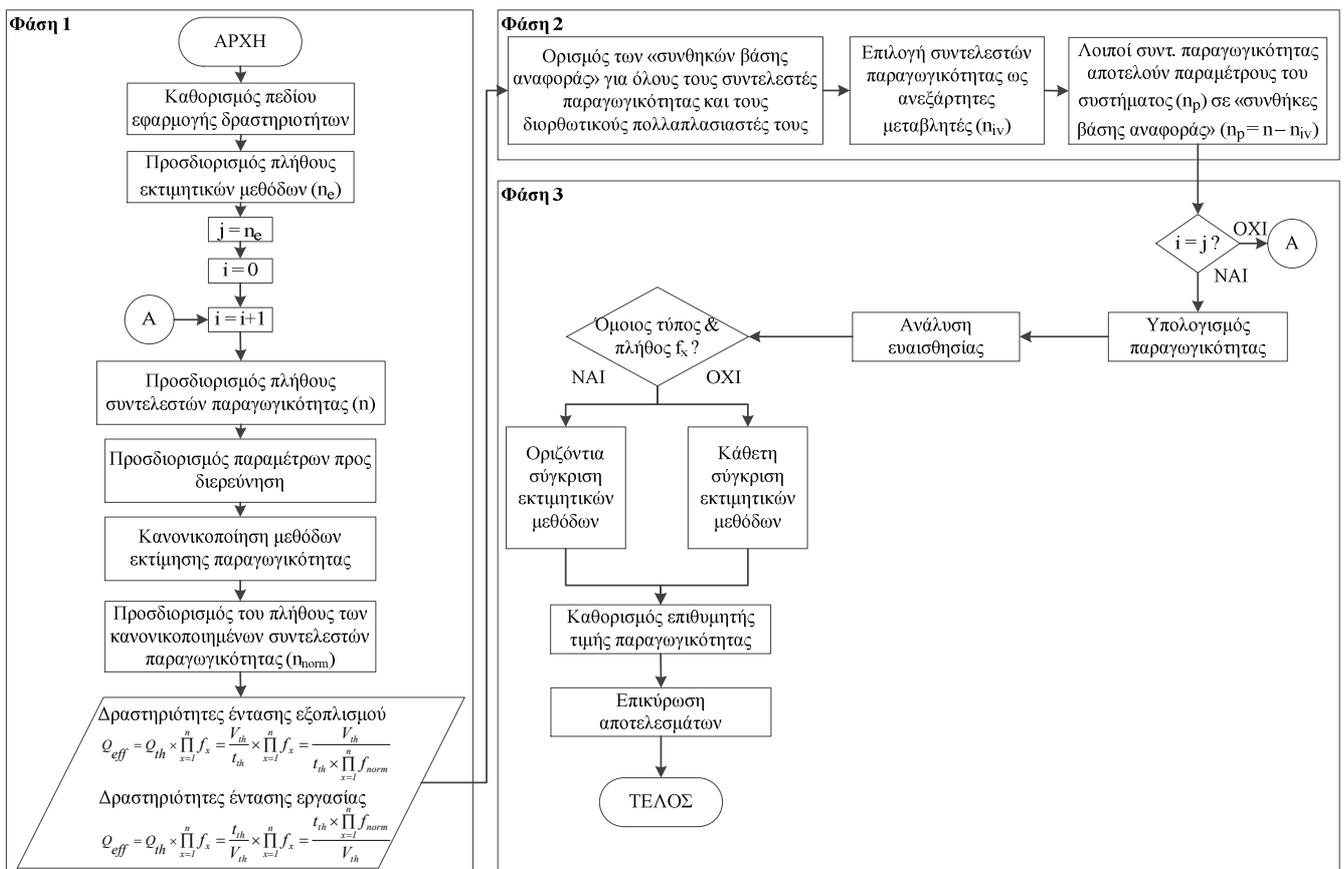
Φάση 2 – Καθορισμός των συνθηκών βάσης αναφοράς

Ακόμα και σε κανονικοποιημένη μορφή, η απευθείας συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας δεν είναι έγκυρη, καθώς κάθε μέθοδος μπορεί να καθορίζει διαφορετικό πλήθος, τύπο και τιμές για τους διορθωτικούς πολλαπλασιαστές, οι οποίοι αντικατοπτρίζουν και διαφορετικές συνθήκες εργασίας. Συνεπώς, εισάγεται η έννοια των «συνθηκών βάσης αναφοράς» (ΣΒΑ) (baseline reference conditions) για να ξεπεραστεί η δυσκολία της σύγκρισης. Η λογική είναι ότι ο κάθε διορθωτικός πολλαπλασιαστής μπορεί να πάρει την τιμή της μονάδας ($f_x = 1,00$) κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, οι οποίες επιτρέπουν να αγνοηθεί η επίδρασή του στην παραγωγικότητα. Στη συνέχεια, από το σύνολο των συντελεστών παραγωγικότητας επιλέγονται ένας ή περισσότεροι για να εξεταστεί η ευαισθησία τους στο πλαίσιο μίας ή περισσοτέρων γνωστών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας (όπως οι μέθοδοι που περιγράφηκαν στην §2.5). Αυτοί οι συντελεστές αποτελούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές του μοντέλου (n_n). Οι υπόλοιποι συντελεστές παραγωγικότητας (άρα και οι αντίστοιχοι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές τους) θα πρέπει να θεωρηθούν, αναπόφευκτα, παράμετροι του συστήματος (n_p) σε κατάσταση «συνθηκών βάσης αναφοράς» ($n_p = n - n_n$). Όταν ένα σύστημα βρίσκεται σε συνθήκες βάσης αναφοράς, τότε η μόνη επιρροή στην παραγωγικότητα προέρχεται από την δυνατότητα παραγωγής σε δεδομένο χρονικό διάστημα (π.χ. ημέρα, ώρα). Για παράδειγμα, στην περίπτωση του υδραυλικού εκσκαφέα, όταν όλοι οι συντελεστές παραγωγικότητας βρίσκονται σε συνθήκες βάσης αναφοράς, τότε η παραγωγικότητα εξαρτάται μόνο από την εκτίμηση του χρόνου κύκλου και την χωρητικότητα του κάδου του εκσκαφέα.

Φάση 3 – Ανάλυση ευαισθησίας και συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

Η διεξαγωγή της ανάλυσης για κάθε πιθανό σενάριο και κάθε μέθοδο εκτίμησης της παραγωγικότητας επιτρέπει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Διαχωρίζονται δύο περιπτώσεις: Εάν οι παραδοχές είναι οι ίδιες για περισσότερες της μίας μεθόδους (δηλ. ίδιος αριθμός και τύπος συντελεστών παραγωγικότητας), τότε αυτές οι μέθοδοι μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους σύμφωνα με την επιλεγμένη τεχνική ανάλυσης (ντετερμινιστική ή

στοχαστική). Με άλλα λόγια, για συντελεστές παραγωγικότητας που είναι κοινοί σε περισσότερες της μίας μεθόδους και με την προϋπόθεση ότι όλοι οι υπόλοιποι, μη κοινοί συντελεστές έχουν τεθεί σε συνθήκες βάσης αναφοράς (άρα, αγνοούνται στην ανάλυση), η οριζόντια σύγκριση των μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας είναι εφικτή (π.χ. συγκριτική ανάλυση των μεθόδων της BML (1983) και Komatsu (2013)). Σε κάθε άλλη περίπτωση, μία τέτοια σύγκριση θα ήταν στατιστικά άκυρη, καθώς η ανάλυση θα έπρεπε να περιοριστεί σε μία κάθετη σύγκριση της υπολογιστικής διαδικασίας για μία συγκεκριμένη μέθοδο (π.χ. ανάλυση της μεθόδου BML (1983) με ντετερμινιστικό και στοχαστικό τρόπο). Η καλύτερη εκτίμηση μπορεί να επιλεγεί στη βάση κάποιας διαδικασίας κατάταξης (ranking process) ή με βάση την κρίση του μηχανικού.



Σχήμα 4.1: Προτεινόμενη μεθοδολογία για τη συγκριτική αξιολόγηση γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας

Η διερεύνηση της εφαρμοσιμότητας της μεθοδολογίας θα γίνει μέσα από την συγκριτική αξιολόγηση δύο μεθόδων εκτίμησης παραγωγικότητας χωματουργικών εργασιών (BML 1983; Komatsu, 2013), με ιδιαίτερη έμφαση στις εκσκαφές με χρήση υδραυλικού εκσκαφέα εφαρμόζοντας την εξ. 4.1. Περισσότερα αναφέρονται στην παράγραφο §6.3.

4.4. Μεθοδολογία για την μέτρηση και συγκριτική αξιολόγηση άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας

Παρά το πλήθος των δημοσιεύσεων που αφορούν στην παραγωγικότητα κατασκευαστικών δραστηριοτήτων, η αξιόπιστη μέτρηση των συντελεστών παραγωγικότητας και των αντίστοιχων διορθωτικών πολλαπλασιαστών τους παραμένει ακόμη ένα ανοικτό, ερευνητικό, θέμα για δύο κυρίως λόγους: Πρώτον, δεν έχει διατυπωθεί ένα δομημένο μεθοδολογικό πλαίσιο για την στατιστικά έγκυρη μέτρησή τους. Συνήθως, οι μελέτες παραγωγικότητας εξυπηρετούν συγκεκριμένες ανάγκες (π.χ. διεξαγωγή μελέτης παραγωγικότητας κατόπιν υποδείξεως του ΚτΕ) και η ερευνητική μεθοδολογία που εφαρμόζεται εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του έργου (Kiziltas and Akinici, 2009; Moselhi and Khan, 2012). Ως αποτέλεσμα, η ποσοτική σχέση μεταξύ των διορθωτικών πολλαπλασιαστών και της παραγωγικότητας δεν είναι απολύτως κατανοητή (O'Connor and Huh, 2006). Ακόμη, ο τύπος και το εύρος τιμών των διορθωτικών πολλαπλασιαστών εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη μέθοδο εκτίμησης της παραγωγικότητας, όπως αναφέρθηκε λεπτομερώς στο Κεφάλαιο 2.

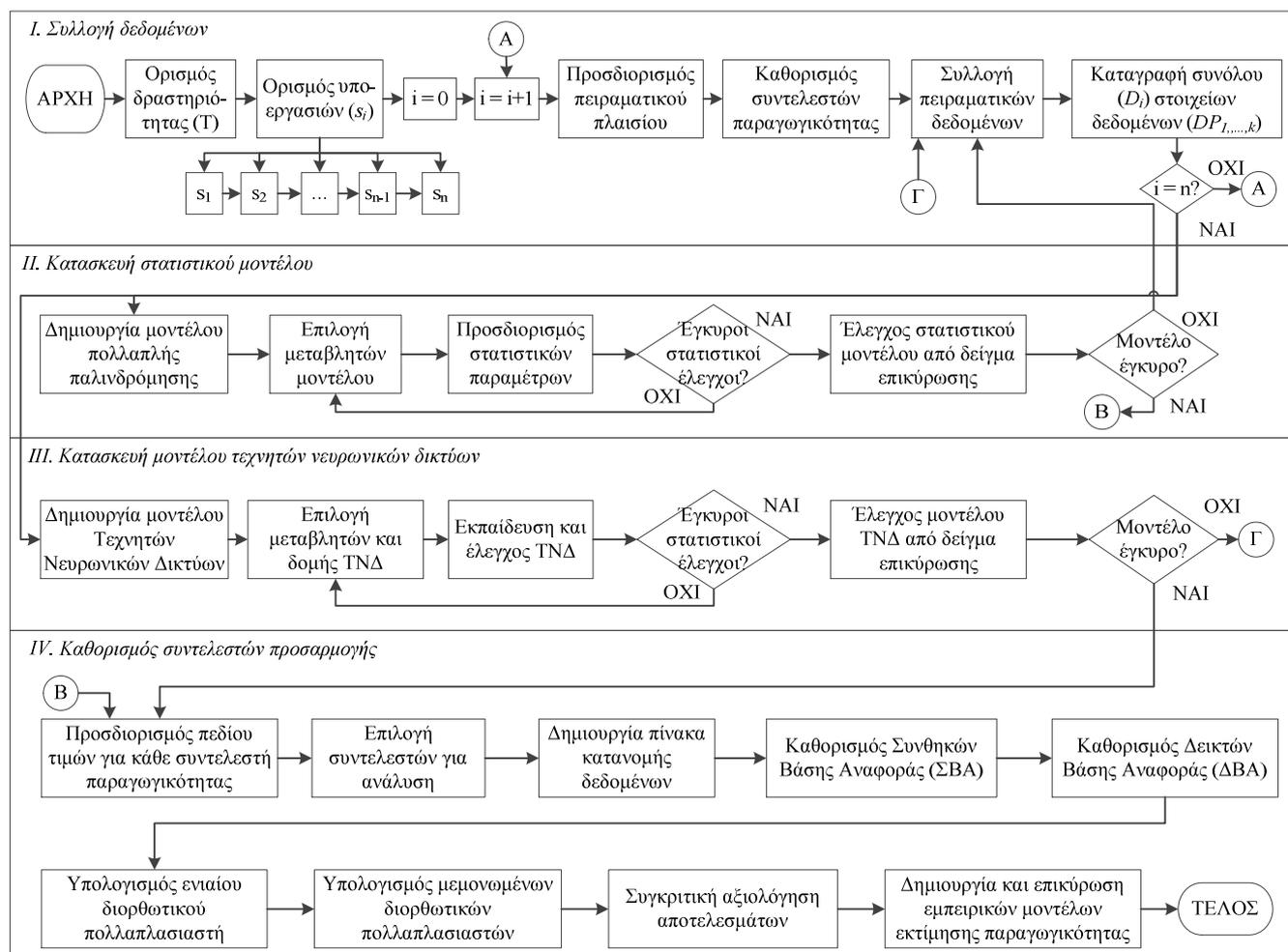
Όμως θα πρέπει να αναλογιστεί κάποιος τις δυσκολίες που θα πρέπει να ξεπεραστούν στο στάδιο του προγραμματισμού ενός έργου, όταν οι δραστηριότητες που περιλαμβάνονται σε αυτό δεν περιγράφονται από κάποια δημοσιευμένη ή γενικότερα γνωστή μέθοδο εκτίμησης παραγωγικότητας. Τέτοιες περιπτώσεις συναντώνται όταν υπάρχουν δραστηριότητες που εκτελούνται για πρώτη φορά ή όταν γνωστές δραστηριότητες εκτελούνται σε ένα καινούριο λειτουργικό πλαίσιο για το οποίο δεν υπάρχουν ιστορικά δεδομένα παραγωγικότητας. Η επιτυχία του χρονικού και οικονομικού προγραμματισμού σε τέτοιες περιπτώσεις εξαρτάται από τη δυνατότητα ενσωμάτωσης νέων, άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας και των αντίστοιχων διορθωτικών πολλαπλασιαστών τους, σε ένα επιστημονικά έγκυρο πλαίσιο υπολογισμού της παραγωγικότητας. Αυτός είναι ο βασικός ερευνητικός στόχος αυτής της ενότητας, καθώς η στατιστικά έγκυρη μέτρηση νέων διορθωτικών πολλαπλασιαστών αποτελεί ακόμη και σήμερα μία διαρκή πρόκληση της διαδικασίας εκτίμησης της παραγωγικότητας (Jang et al., 2011; Moselhi and Khan, 2012).

Ο δεύτερος λόγος αφορά την απουσία ενός μεθοδολογικού πλαισίου για την συγκριτική αξιολόγηση των μετρηθέντων διορθωτικών πολλαπλασιαστών. Έχει διαπιστωθεί ότι σε αρκετές περιπτώσεις οι μελέτες εκτίμησης της παραγωγικότητας εκπονούνται χωρίς σαφή καθορισμό του πλαισίου της ερευνητικής μεθοδολογίας οδηγώντας σε αμφίβολα αποτελέσματα χωρίς πρακτική αξία (Panas and Pantouvakis, 2010a). Συνέπεια αυτής της έλλειψης είναι η παροχή αποσπασματικών αποτελεσμάτων και ο υπολογισμός τιμών παραγωγικότητας χωρίς να είναι δυνατή η αποτίμηση του εύρους εφαρμογής τους. Η αναξιπιστία αυτών των τιμών παραγωγικότητας δεν επιτρέπει την χρήση τους για την κοστολόγηση και τον προγραμματισμό των έργων (O'Connor and Huh, 2006). Επιπρόσθετα, η συγκριτική αξιολόγηση των διορθωτικών πολλαπλασιαστών για μία ή περισσότερες δραστηριότητες ή ακόμη και έργα είναι δυσχερής, καθώς δεν είναι δυνατόν να εκτιμηθεί εάν οι τιμές των διορθωτικών πολλαπλασιαστών αντικατοπτρίζουν τις ίδιες λειτουργικές συνθήκες. Η γνώση των λειτουργικών συνθηκών είναι απαραίτητη, έτσι ώστε να είναι δυνατή η κατανόηση του λειτουργικού πλαισίου

από το οποίο προέκυψαν οι τιμές παραγωγικότητας. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να αξιολογηθεί κατά πόσον μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία συγκεκριμένη τιμή παραγωγικότητας για να εκτιμηθεί το κόστος ή ο χρόνος ολοκλήρωσης μίας δραστηριότητας (Kiziltas and Akinci, 2009).

Συνεπώς, οι επόμενες παράγραφοι αποσκοπούν στην αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος μέσω της διατύπωσης μίας μεθοδολογίας, η οποία επιτρέπει την κατανόηση, ποσοτικοποίηση και ενσωμάτωση στην υπολογιστική διαδικασία συγκεκριμένων συντελεστών παραγωγικότητας που επηρεάζουν την παραγωγικότητα με τη μορφή διορθωτικών πολλαπλασιαστών.

Το διάγραμμα ροής της προτεινόμενης μεθοδολογίας απεικονίζεται στο Σχήμα 4.2. Κάθε φάση αναλύεται στις επόμενες παραγράφους με περισσότερη λεπτομέρεια. Σκοπός είναι η μέτρηση και η συγκριτική αξιολόγηση των συντελεστών f_x για μία συγκεκριμένη κατασκευαστική δραστηριότητα.



Σχήμα 4.2: Προτεινόμενη μεθοδολογία για τη μέτρηση και συγκριτική αξιολόγηση άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας

4.4.1. Συλλογή δεδομένων

Το πρώτο βήμα στη διαδικασία συλλογής των δεδομένων είναι ο καθορισμός των δραστηριοτήτων που θα μελετηθούν. Κάθε δραστηριότητα απεικονίζεται με τη χρήση διαγραμμάτων ροής και αναλύεται στις επιμέρους εργασίες που την αποτελούν. Στη συνέχεια καθορίζεται το εύρος του πειραματικού πλαισίου για κάθε υπο-εργασία, συμπεριλαμβανομένης κάθε χρήσιμης πληροφορίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση, όπως ο τρόπος πραγματοποίησης του έργου, τα χαρακτηριστικά του, τα χρησιμοποιούμενα μέσα παραγωγής κ.ο.κ. (Song and AbouRizk, 2005). Μετά τον καθορισμό του πλαισίου της έρευνας, ορίζονται οι εσωτερικοί και εξωτερικοί συντελεστές παραγωγικότητας. Τέτοιοι συντελεστές μπορεί να είναι οι κλιματολογικές συνθήκες (καιρικές συνθήκες, θερμοκρασία περιβάλλοντος) (Yiang and Wu, 2007), κατασκευαστικές ή λειτουργικές μεταβλητές (κατασκευαστικές μέθοδοι, τύπος δομικών στοιχείων, γεωμετρικά χαρακτηριστικά) (Vandenbossche et al., 2011), καθώς και παράγοντες που σχετίζονται με το ύψος της διοίκησης (αποδοτικότητα της επίβλεψης, επίπεδο υγείας και ασφάλειας) (Abdel-Razek et al., 2007; Nunally, 2007).

Το επόμενο βήμα είναι η συλλογή δεδομένων μελέτης της εργασίας (work study data) σε καθημερινή βάση, μέσω της απευθείας παρατήρησης ή επίβλεψης των εργασιών, όπου το ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας συμπληρώνεται για κάθε δραστηριότητα ξεχωριστά. Επιπλέον αξιοποιούνται βοηθητικές πηγές δεδομένων, όπως συμβατικά έγγραφα, αναφορές έργου, εντολές πληρωμής, παρουσιολόγια εργατών, συνεντεύξεις με στελέχη του έργου κ.ά. Κάθε ημερήσια μέτρηση μίας υπο-εργασίας (s_i) αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο δεδομένων (datapoint – DP) και το άθροισμα όλων των συλλεχθέντων στοιχείων ή δεδομένων για μία συγκεκριμένη υπο-εργασία αποτελεί ένα σύνολο δεδομένων (dataset – D) (εξ. 4.3):

$$\forall s_i \Rightarrow D_i = \{DP_1, DP_2, \dots, DP_m\}, i \leq n, i, n, m \in N \quad (\text{εξ. 4.3})$$

Όσον αφορά στο μέγεθος του δείγματος, όσο αυξάνεται ο αριθμός των στοιχείων που εμπεριέχονται σε κάθε σύνολο δεδομένων, τόσο βελτιώνεται δυνητικά η αξιοπιστία της ανάλυσης.

4.4.2 Κατασκευή στατιστικού μοντέλου

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, τα μοντέλα παλινδρόμησης (regression models) είναι στατιστικά μοντέλα που βασίζονται στη συσχέτιση συλλεχθέντων δεδομένων, χωρίς να αναλύεται η διαδικασία παραγωγής των δεδομένων. Μετασχηματίζοντας την εξ. 2.38 σε μία πιο απλοποιημένη μορφή, διατυπώνεται η εξ. 4.4 για το μοντέλο γραμμικής πολλαπλής παλινδρόμησης που θα εφαρμοστεί στην ανάλυση:

$$Y_i = b_0 + b_1 \times X_1 + b_2 \times X_2 + \dots + b_k \times X_k \quad (\text{εξ. 4.4})$$

όπου: Y_i = εξαρτημένη μεταβλητή, X_1, X_2, \dots, X_k = ανεξάρτητες μεταβλητές, b_0 = συντελεστής παρεμβολής; b_1, b_2, \dots, b_k = συντελεστές παλινδρόμησης.

Η γραμμική πολλαπλή παλινδρόμηση θα εφαρμοστεί για τη δημιουργία εμπειρικών μοντέλων εκτίμησης της παραγωγικότητας. Αρχικά, επιλέγονται οι ανεξάρτητες και οι εξαρτημένες μεταβλητές από τη βάση δεδομένων

που έχει δημιουργηθεί και, αφού εξεταστεί η σημαντικότητά τους, στη συνέχεια εκτιμώνται οι συντελεστές της παλινδρόμησης. Χρησιμοποιείται μία σειρά από στατιστικές διαδικασίες και δείκτες (όπως έχει ήδη αναφερθεί στα Κεφάλαια 2 και 3) για να ελεγχθεί η στατιστική εγκυρότητα, τόσο των μοντέλων όσο και των παραμέτρων τους. Δημιουργούνται διαγράμματα διασποράς για τον οπτικό έλεγχο των δεδομένων και υπολογίζεται το σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων ή απλά υπόλοιπο (residual). Υπολογίζεται η παράμετρος « p » του t-test για τους συντελεστές του μοντέλου παλινδρόμησης, έτσι ώστε να αξιολογηθεί η καταλληλότητά τους. Πιθανότητες μικρότερες από 0,05 θεωρούνται σημαντικές ενδείξεις πως οι συντελεστές παλινδρόμησης είναι διάφοροι του μηδενός. Οι στατιστικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της στατιστικής εγκυρότητας του μοντέλου είναι (α) ο δείκτης R^2 (R-square ή συντελεστής προσδιορισμού) (β) ο προσαρμοσμένος δείκτης R^2 (adjusted R-square) και (γ) το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (root mean square error). Περισσότερες λεπτομέρειες για τους στατιστικούς δείκτες και τη σημασία τους δίνονται από τους Kutner et al. (2005). Το στατιστικό πακέτο JMP® έκδοση 10 από την SAS® χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία και την επικύρωση όλων των μοντέλων.

Η διαδικασία της επικύρωσης αφορά στην σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των πραγματικών δεδομένων πεδίου. Γι' αυτό τον λόγο το δείγμα χωρίζεται σε ένα υποσύνολο δεδομένων για τη δημιουργία του μοντέλου (70%) και ένα υποσύνολο δεδομένων για την επικύρωσή του (30%) με τυχαία επιλογή. Επιπρόσθετα, ανεξάρτητα από τη σημασία τους, τα αποτελέσματα του μοντέλου πρέπει να επικυρωθούν και να συγκριθούν με πραγματικά δεδομένα, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι το μοντέλο είναι κατάλληλο για να εφαρμοστεί στην πράξη. Έτσι, σαν δεδομένα εισόδου στα μοντέλα χρησιμοποιούνται δεδομένα από τη διαδικασία επικύρωσης, ώστε να συγκριθούν οι προβλέψεις της παραγωγικότητας με τις πραγματικές μετρήσεις. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας επικύρωσης απεικονίζονται στα «διαγράμματα επικύρωσης» (validation charts). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η διακύμανση (variance) των συντελεστών παλινδρόμησης που εκτιμώνται με βάση το υποσύνολο δεδομένων για τη δημιουργία του μοντέλου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη διακύμανση, εάν είχε συμπεριληφθεί όλο το δείγμα. Γι' αυτό τον λόγο, μετά την τελική επικύρωση του μοντέλου, οι οριστικοί συντελεστές της παλινδρόμησης υπολογίζονται με βάση όλο το δείγμα.

4.4.3 Κατασκευή μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Μετά την οριστικοποίηση του στατιστικού μοντέλου, καταστρώνεται το μοντέλο Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Το σύνολο δεδομένων πεδίου που χρησιμοποιήθηκε για το στατιστικό μοντέλο εφαρμόζεται και για το μοντέλο ΤΝΔ. Οι συντελεστές παραγωγικότητας που αποτέλεσαν τις μεταβλητές εισόδου του στατιστικού μοντέλου χρησιμοποιούνται ως μεταβλητές εισόδου στο μοντέλο των ΤΝΔ. Στη συνέχεια προσδιορίζεται η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου, όσον αφορά στον αριθμό των νευρώνων εισόδου / εξόδου, τον αριθμό των κρυμμένων επιπέδων και των αντίστοιχων νευρώνων τους, τις συναρτήσεις μετατροπής και ενεργοποίησης, καθώς και τις κύριες παραμέτρους του μοντέλου. Ταυτόχρονα, καθορίζεται η διαδικασία της εκπαίδευσης (training) και του ελέγχου (testing) που θα αξιολογήσουν τον βαθμό μάθησης του δικτύου (learning efficiency).

Αφού καθοριστούν τα κριτήρια της εκπαίδευσης και του ελέγχου του δικτύου, μπορεί να εκκινήσει η διαδικασία της μάθησης. Όταν ικανοποιηθούν οι συνθήκες τερματισμού, γίνεται στατιστικός έλεγχος και εάν τα αποτελέσματα είναι αποδεκτά, ακολουθεί η διαδικασία επικύρωσης. Το υποσύνολο δεδομένων επικύρωσης καθορίζει και τις δυνατότητες γενίκευσης του νευρωνικού δικτύου. Το τελευταίο στάδιο της ανάλυσης είναι ο καθορισμός των διορθωτικών πολλαπλασιαστών, όπως θα εξηγηθεί αναλυτικότερα στην επόμενη παράγραφο.

4.4.4. Προσδιορισμός διορθωτικών πολλαπλασιαστών

Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζεται το πειραματικό πλαίσιο που θα εφαρμοστεί για την κατηγοριοποίηση και την ανάλυση των δεδομένων στο πλαίσιο των στατιστικών μοντέλων και των μοντέλων τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Καταρχήν, κάθε συντελεστής παραγωγικότητας χωρίζεται σε κατηγορίες ή ομάδες δεδομένων (data clusters), οι οποίες έχουν προκαθορισμένο εύρος. Τα όρια που διαχωρίζουν τις ομάδες μεταξύ τους εξαρτώνται από τις ελάχιστες και τις μέγιστες τιμές των ποσοτικών (π.χ. ελάχιστη και μέγιστη τιμή πλάτους εργασίας) ή ποιοτικών συντελεστών παραγωγικότητας (π.χ. ινοπλισμένο ή συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα). Ένα υποσύνολο των μετρούμενων συντελεστών παραγωγικότητας επιλέγεται ανά ζεύγη για περαιτέρω ανάλυση. Στη συνέχεια, δημιουργείται ένας πίνακας κατανομής δεδομένων για τα στοιχεία του υποσυνόλου δεδομένων μίας συγκεκριμένης δραστηριότητας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Πίνακας κατανομής δεδομένων

| Συντελεστής παραγωγικότητας 1 | Συντελεστής παραγωγικότητας 2 | | |
|-------------------------------|-------------------------------|-----|-------------------------|
| Ομάδα 1.1 | Ομάδα 2.1 | ... | Ομάδα 2.r |
| ... | $D_{1,l} \subseteq D_i$ | ... | $D_{1,r} \subseteq D_i$ |
| ... | ... | ... | ... |
| Ομάδα 1.v | $D_{v,l} \subseteq D_i$ | ... | $D_{v,r} \subseteq D_i$ |

Για λόγους λογικής συνέπειας και στατιστικής επικύρωσης, όλα τα υποσύνολα δεδομένων που περιέχονται σε κάθε κελί του πίνακα θα πρέπει να αθροίζονται στο αρχικό σύνολο δεδομένων (εξ. 4.5):

$$D_{1,l} \cup \dots \cup D_{1,r} \cup \dots \cup D_{v,l} \cup \dots \cup D_{v,r} = D_i, \quad \forall v, r \in N \quad (\text{εξ. 4.5})$$

Η ουσία του πίνακα κατανομής δεδομένων έγκειται στον διαχωρισμό κάθε συνόλου δεδομένων παραγωγικότητας σε συγκεκριμένα λειτουργικά σενάρια (operational scenarios), δηλ. ανά ζεύγη συνδυασμούς των διορθωτικών πολλαπλασιαστών που αντιστοιχούν στους συντελεστές παραγωγικότητας. Έτσι, κάθε κελί του πίνακα αντιπροσωπεύει μία μοναδική λειτουργική διάταξη (operational setting), αναδεικνύοντας με αυτόν τον τρόπο τη σημασία που έχει το πλαίσιο αναφοράς του κάθε στοιχείου δεδομένων. Δεν υπάρχει κάποιος συγκεκριμένος κανόνας σχετικά με το πόσα στοιχεία δεδομένων θα πρέπει να περιέχονται σε κάθε ομάδα ή κελί του πίνακα. Είναι ξεκάθαρο, όμως, πως όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του δείγματος, τόσο πιο έγκυρα είναι τα συμπεράσματα που εξάγονται από την επεξεργασία του. Για λόγους παρουσίασης και ευκρίνειας της

ανάλυσης, ο πίνακας κατανομής των δεδομένων έχει δύο διαστάσεις. Όμως, η ανάλυση θα μπορούσε να επεκταθεί για να συμπεριλάβει τρεις ή περισσότερες παραμέτρους. Σε αυτή την περίπτωση οι διαφορετικοί συνδυασμοί των παραγόντων θα μπορούσαν να απεικονιστούν καλύτερα με δενδροειδή διαγράμματα.

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός των «συνθηκών βάσης αναφοράς» (baseline reference conditions – BRC), δηλ. εκείνων των συνθηκών υπό τις οποίες η επιρροή των συντελεστών παραγωγικότητας μπορεί να αγνοηθεί (§4.3, Φάση 2). Θεωρητικά, κάτι τέτοιο σημαίνει ότι $f_x = 1,00, \forall i \in N$, συνεπώς η θεωρητική και η αναμενόμενη παραγωγικότητα ταυτίζονται (Panas and Pantounakis, 2010b). Ουσιαστικά, οι συνθήκες βάσης αναφοράς (ΣΒΑ) αντιπροσωπεύουν μία συγκεκριμένη λειτουργική διάταξη και, σε σχέση με τον Πίνακα 4.1, οι ΣΒΑ αντικατοπτρίζουν ένα συγκεκριμένο κελί. Η επιλογή του σεναρίου που θα αποτελέσει τις ΣΒΑ εξαρτάται από τις προτιμήσεις του αναλυτή. Ένας πρακτικός κανόνας θα μπορούσε να καθορίζει τις ΣΒΑ ως το κελί με τα περισσότερα δεδομένα, καθώς έτσι αντιπροσωπεύεται το σενάριο που συναντάται συχνότερα στην πράξη (δες εξ. 4.6).

Μετά τον καθορισμό των ΣΒΑ, ορίζονται οι «δείκτες βάσης αναφοράς» (Baseline Reference Metrics – BRM) (ΔΒΑ), δηλ. οι τιμές της παραγωγικότητας που αντιστοιχούν στο σενάριο των ΣΒΑ. Όταν δεν είναι διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα, οι ΔΒΑ μπορούν να προσδιοριστούν από εγχειρίδια κατασκευαστών ή από τα αρχεία μίας εταιρείας. Όταν υπάρχουν δεδομένα πεδίου, τότε οι ΔΒΑ σχετίζονται άμεσα με τον πίνακα κατανομής δεδομένων, καθώς υπολογίζονται ως ο μέσος όρος των τιμών ΣΒΑ στα αντίστοιχα κελιά του πίνακα (εξ. 4.6 και 4.7).

$$BRC = \max\{D_{1,l}, \dots, D_{1,r}, \dots, D_{v,l}, \dots, D_{v,r}\} \quad (\text{εξ. 4.6})$$

$$BRM = \langle \max\{D_{1,l}, \dots, D_{1,r}, \dots, D_{v,l}, \dots, D_{v,r}\} \rangle \quad (\text{εξ. 4.7})$$

Για παράδειγμα, εάν υποθεθεί ότι η πλειοψηφία των δεδομένων βρίσκεται στην σειρά «w» και στην στήλη «z», τότε το κελί που περιέχει το υποσύνολο δεδομένων $D_{w,z}$ θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει τις συνθήκες βάσης αναφοράς, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2 παρακάτω:

Πίνακας 4.2: Πίνακας προσδιορισμού των Δεικτών Βάσης Αναφοράς (ΔΒΑ)

| Συντ/ης παραγ/ας 1 | Συντελεστής παραγωγικότητας 2 | | | | |
|--------------------|-------------------------------|-----|-------------------------|-----|-------------------------|
| Ομάδα 1.1 | Ομάδα 2.1 | ... | Ομάδα 2.z | ... | Ομάδα 2.r |
| ... | $D_{1,1} \subseteq D_i$ | ... | $D_{1,z} \subseteq D_i$ | ... | $D_{1,r} \subseteq D_i$ |
| Ομάδα 1.w | ... | ... | $D_{w,z} \subseteq D_i$ | ... | $D_{w,r} \subseteq D_i$ |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Ομάδα 1.v | $D_{v,1} \subseteq D_i$ | ... | $D_{v,z} \subseteq D_i$ | ... | $D_{v,r} \subseteq D_i$ |

Με αυτόν τον τρόπο, οι ΔΒΑ για τα συλλεχθέντα δεδομένα παραγωγικότητας υπολογίζονται ως ο μέσος όρος όλων των δεδομένων που εμπεριέχονται στο υποσύνολο $D_{w,z}$ (εξ. 4.8):

$$BRM = \langle D_{w,z} \rangle \quad (\text{εξ. 4.8})$$

Η ανάλυση ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό των διορθωτικών πολλαπλασιαστών για τους αντίστοιχους συντελεστές παραγωγικότητας, όπως ορίστηκαν στην εξ. 2.5. Οι συντελεστές f_x υπολογίζονται για κάθε ομάδα δεδομένων του πίνακα VxR όπως φαίνεται παρακάτω (εξ. 4.9):

$$\underline{\underline{F}} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} f_{1,l} & \dots & f_{1,z} & \dots & f_{1,r} & \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \\ f_{w,l} & \dots & f_{w,z} & \dots & f_{w,r} & \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \\ f_{v,l} & \dots & f_{v,z} & \dots & f_{v,r} & \end{array} \right] = \left[\begin{array}{ccc|ccc} \frac{\langle D_{1,l} \rangle}{BRM} & \dots & \frac{\langle D_{1,z} \rangle}{BRM} & \dots & \frac{\langle D_{1,r} \rangle}{BRM} & \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots & \\ \frac{\langle D_{w,l} \rangle}{BRM} & \dots & \frac{BRM}{BRM} & \dots & \frac{\langle D_{w,r} \rangle}{BRM} & \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots & \\ \frac{\langle D_{v,l} \rangle}{BRM} & \dots & \frac{\langle D_{v,z} \rangle}{BRM} & \dots & \frac{\langle D_{v,r} \rangle}{BRM} & \end{array} \right] \quad (\text{εξ. 4.9})$$

Όπως έχει αναφερθεί, οι ΔΒΑ πρέπει να ισούνται με 1,00. Επίσης, οι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές των διανυσμάτων της σειράς ΔΒΑ ($f_{w,l}, \dots, f_{w,z}, \dots, f_{w,r}$) και της αντίστοιχης στήλης ($f_{1,z}, \dots, f_{w,z}, \dots, f_{v,z}$) υποδεικνύουν την διακύμανση της παραγωγικότητας κάτω από την ξεχωριστή επιρροή του συντελεστή παραγωγικότητας 2 στον συντελεστή παραγωγικότητας 1 και αντίστροφα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τον προσδιορισμό ενός έγκυρου πειραματικού πλαισίου μέτρησης των συντελεστών σε εργοταξιακές συνθήκες, σε περίπτωση που η μελέτη της παραγωγικότητας αφορά έναν συγκεκριμένο συντελεστή παραγωγικότητας. Με άλλα λόγια, εάν η επιρροή του συντελεστή παραγωγικότητας 1 στην παραγωγικότητα πρέπει να εξεταστεί ανεξάρτητα από την επιρροή κάθε άλλου συντελεστή παραγωγικότητας, τότε οι μετρήσεις θα γίνουν για διαφορετικές ομάδες δεδομένων του συντελεστή παραγωγικότητας 1, αρκεί οι αντίστοιχες τιμές του συντελεστή παραγωγικότητας 2 να ήταν αυστηρά περιορισμένες στα κελιά της στήλης 2.z. Τα υπόλοιπα στοιχεία του πίνακα υποδεικνύουν τη διακύμανση της παραγωγικότητας υπό τον συνδυασμό και των δύο συντελεστών παραγωγικότητας.

Όταν υπολογιστούν όλοι οι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές f_x , μπορεί να γίνει η συγκριτική αξιολόγηση της διακύμανσης των ΔΒΑ ανά σειρά ή ανά στήλη του πίνακα. Η διακύμανση υποδεικνύει την ευαισθησία του δείγματος στις αλλαγές της λειτουργικής διάταξης ή του τρόπου εκτέλεσης της εργασίας. Η διαφοροποίηση των θεωρητικών ΔΒΑ σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα οπτικοποιείται με τη χρήση διαγραμμάτων που επιτρέπουν μία εποπτικότερη μελέτη της δραστηριότητας που μελετάται, ενώ παράλληλα καθιστούν εφικτή τη διατύπωση εμπειρικών τύπων υπολογισμού παραγωγικότητας της μορφής (εξ. 4.10):

$$Q_{eff} = Q_{th} \times \underline{\underline{F}} \quad (\text{εξ. 4.10})$$

Η εξ. 4.10 δεν εκφράζει μία μαθηματικά πολύπλοκη σχέση, αλλά ένα απλό και χρήσιμο εργαλείο εκτίμησης παραγωγικότητας, με βάση το οποίο είναι δυνατή η αξιολόγηση πραγματικών μετρήσεων επί τόπου του έργου. Τέλος, αφού ελεγχθεί η στατιστική και πρακτική εγκυρότητα των μοντέλων, τότε αυτά μπορούν να

εφαρμοστούν στη διαδικασία της εκτίμησης παραγωγικότητας των τεχνικών έργων. Θα πρέπει να τονιστεί, όμως, πως το πεδίο εφαρμογής των υπολογισθέντων διορθωτικών πολλαπλασιαστών δεν μπορεί να επεκταθεί πέραν του πεδίου εφαρμογής του αντίστοιχου πειραματικού πλαισίου από το οποίο προέκυψαν (Panas and Pantounakis, 2015).

Η τεκμηρίωση της εφαρμοσιμότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας εξετάζεται μέσα από μία μελέτη περίπτωσης που αφορά σε έργο υποδομής μεγάλης κλίμακας και συγκεκριμένα στην κατασκευή δαπέδων βαρέως τύπου από ινοπλισμένο σκυρόδεμα και η οποία παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο §6.

4.5. Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάστηκαν δύο μεθοδολογίες εκτίμησης και συγκριτικής αξιολόγησης της παραγωγικότητας, τόσο για γνωστούς όσο και για άγνωστους συντελεστές παραγωγικότητας για μία δεδομένη κατασκευαστική δραστηριότητα. Αντικείμενο της έρευνας δεν ήταν η ανάπτυξη ενός ακόμα μοντέλου παραγωγικότητας. Η βασική ερευνητική συμβολή είναι η ανάπτυξη μίας μεθοδολογίας υπολογισμού της παραγωγικότητας, η οποία επιτρέπει την ποσοτική αξιολόγηση της επιρροής των δυναμικά μεταβαλλόμενων συντελεστών παραγωγικότητας στην απόδοση του συστήματος. Επιπρόσθετα, η έρευνα συμβάλλει στην ανάπτυξη του γνωστικού πεδίου καθώς (α) διατυπώνει το υπολογιστικό πλαίσιο που επιτρέπει τον προσδιορισμό στατιστικά έγκυρων διορθωτικών πολλαπλασιαστών που ποσοτικοποιούν την επιρροή των συντελεστών παραγωγικότητας στην απόδοση του συστήματος και (β) εφαρμόζει την έννοια των «συνθηκών βάσης αναφοράς», έτσι ώστε να εκτιμηθούν επί μέρους διορθωτικοί πολλαπλασιαστές για κάθε μεταβλητή. Στην περίπτωση των γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας, η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτρέπει τον μαθηματικό μετασχηματισμό διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης παραγωγικότητας (π.χ. BML, Caterpillar, Komatsu) σε μαθηματικά ισοδύναμα σενάρια που καθιστούν δυνατή την απευθείας σύγκριση των αποτελεσμάτων τους. Στην περίπτωση νέων εργασιών, η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτρέπει τον καθορισμό του εύρους επιρροής συγκεκριμένων συντελεστών παραγωγικότητας και προσδιορίζει το πειραματικό πλαίσιο για την μέτρηση και περαιτέρω επικύρωσή τους. Έτσι, η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτρέπει την επικύρωση ή βελτίωση των αποτελεσμάτων παλαιότερων μελετών παραγωγικότητας, καθώς και των αντίστοιχων τιμών των διορθωτικών πολλαπλασιαστών που προκύπτουν από την επεξεργασία ιστορικών δεδομένων.

Κεφάλαιο 5 Ανάπτυξη στοχαστικού μοντέλου και πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης (CaissonSim)

5.1. Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου είναι (α) η διατύπωση στοχαστικού μοντέλου για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της επιρροής των συντελεστών παραγωγικότητας με χρήση πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης και (β) η ενσωμάτωση του ρυθμού μάθησης στο στοχαστικό μοντέλο για την καλύτερη απεικόνιση της επιρροής του ανθρώπινου παράγοντα.

5.2. Εισαγωγή

Παρά τα προφανή της πλεονεκτήματα, η προσομοίωση έχει δεχθεί κριτική ως μία πολύπλοκη μέθοδος ανάλυσης που οδηγεί σε παραπλανητικά ή μη εφαρμόσιμα αποτελέσματα (Al-Hussein et al., 2006). Γι' αυτό τον λόγο, οι μηχανικοί και η κατασκευαστική βιομηχανία φαίνονται διστακτικοί όσον αφορά στα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή της προσομοίωσης για την μοντελοποίηση και την ανάλυση των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων (AbouRizk, 2010). Ένας από τους κυριότερους λόγους αμφισβήτησης της αποτελεσματικότητας της προσομοίωσης ως εργαλείο λήψης αποφάσεων είναι το γεγονός ότι στην προσομοίωση δεν εξηγείται σαφώς και επαρκώς ο ρόλος των φυσικών παραμέτρων που επηρεάζουν με άμεσο τρόπο την παραγωγικότητα (Schexnayder, 1997). Επίσης, αρκετά συχνά στις μελέτες προσομοίωσης δεν αναφέρονται οι βασικές παραδοχές της εκτέλεσής της, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η επαναληψιμότητα των σχετικών πειραμάτων για λόγους επικύρωσης. Ακόμη, η πρακτική αξία της προσομοίωσης μειώνεται όταν τα αποτελέσματα δεν ερμηνεύονται στη βάση του πειραματικού πλαισίου που διέπει τη μελέτη, αλλά ανάλογα με τις δραστηριότητες που μελετώνται και το εύρος της εφαρμογής τους (Lu et al., 2009a/b). Το τελευταίο είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την φάση της μελέτης του έργου, καθώς το πλαίσιο μέσα στο οποίο αξιολογούνται τα δεδομένα παραγωγικότητας και κόστους καθορίζει το πεδίο εφαρμογής τους στον χρονικό και οικονομικό προγραμματισμό των έργων (Kiziltas and Akinici, 2009). Η κατανόηση και η ερμηνεία στατιστικών αποτελεσμάτων προσομοίωσης που δεν είναι σαφώς συσχετισμένα με το λειτουργικό πλαίσιο των εργασιών, ειδικά σε περιπτώσεις όπου το υπό μελέτη σύστημα είναι πολύπλοκο, μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα δύσκολη και να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα, όπως αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο (Hong et al., 2002).

Συνεπώς, ο σκοπός του κεφαλαίου είναι η διατύπωση ενός στοχαστικού μοντέλου και η ανάπτυξη αντίστοιχου λογισμικού προσομοίωσης που επιτρέπει την στατιστικά έγκυρη ανάλυση των κατασκευαστικών δραστηριοτήτων και τον ακριβέστερο προσδιορισμό της επιρροής των συντελεστών παραγωγικότητας. Το στοχαστικό μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί για να εξισώσει την πολυπλοκότητα της διαδικασίας μοντελοποίησης κατά την προσομοίωση με την υπεραπλούστευση που συνεπάγεται η εφαρμογή της ντετερμινιστικής

προσέγγισης για την προκοστολόγηση και τον προγραμματισμό των έργων. Η μελέτη δεν αποσκοπεί στην δημιουργία ενός ακόμη μοντέλου προσομοίωσης, ούτε στην επίδειξη των υπολογιστικών δυνατοτήτων της προσομοίωσης, καθώς αμφότερα έχουν διερευνηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, όπως έχει ήδη αναφερθεί (δες Κεφάλαιο 2). Ο σκοπός είναι να τονιστεί το εννοιολογικό πλαίσιο που είναι απαραίτητο για την εξαγωγή αξιόπιστων αποτελεσμάτων. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατή η λήψη αποφάσεων στη βάση έγκυρης πληροφορίας για την εκτέλεση δραστηριοτήτων μεγάλης κλίμακας (π.χ. μεγάλα έργα υποδομής), όπου η διαφοροποίηση σε βασικές λειτουργικές παραμέτρους μπορεί να επιφέρει σημαντικές διαφοροποιήσεις στην πρόβλεψη του κόστους και της παραγωγικότητας.

5.3. Κατασκευή κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson)

5.3.1. Κατασκευή caisson και προσομοίωση

Οι ανωδομές των σύγχρονων λιμένων κατασκευάζονται από κυψελωτά κιβώτια οπλισμένου σκυροδέματος που ονομάζονται «caisson». Ενδεικτικές εφαρμογές των caisson συναντώνται στην κατασκευή κυματοθραυστών, προβλητών, μαρίνων και σταθμών εμπορευματοκιβωτίων (Halpin and Martinez, 1999) (δες Σχήμα 5.1). Λόγω του μεγάλου μεγέθους της επένδυσης που συνεπάγεται η κατασκευή τους, η εφαρμογή τεχνικών ανάλυσης υψηλού επιπέδου, όπως η προσομοίωση, για την μελέτη της κατασκευαστικής διαδικασίας, εξασφαλίζει την εγκυρότητα των προτεινόμενων κατασκευαστικών λύσεων και ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο προβλημάτων της μελέτης, που ενδεχομένως να επηρεάσουν τη λειτουργία του έργου, όταν πια αυτό θα έχει ολοκληρωθεί. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως η κατασκευαστική διαδικασία απαιτεί τη λήψη αποφάσεων που βασίζονται σε αξιόπιστες πληροφορίες, τα μοντέλα της προσομοίωσης μπορούν να συνεισφέρουν στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, καθώς επιτρέπουν την λεπτομερή διερεύνηση των χαρακτηριστικών των συστημάτων που μοντελοποιούνται (AbouRizk et al., 2011).

Η κατασκευή caisson υπό το πρίσμα της παραγωγικότητας με χρήση τεχνικών προσομοίωσης δεν έχει εξεταστεί επαρκώς στην βιβλιογραφία μέχρι σήμερα. Οι Halpin και Martinez (1999) αναφέρονται σε μία σχετική ερευνητική προσπάθεια, όπου το εργαλείο προσομοίωσης με τον τίτλο PROSIDYC χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση διαδικασιών κατασκευής caisson (Martinez and Rodriguez, 1997). Όμως, οι συγγραφείς αναφέρονται γενικά στα οφέλη της εφαρμογής της προσομοίωσης για την κάλυψη συγκεκριμένων αναγκών της εταιρείας που χρηματοδότησε την έρευνα. Συνεπώς, η ανάλυσή τους είναι περιορισμένη, καθώς (α) δεν περιγράφονται τα συστατικά στοιχεία ή η δομή του συστήματος προσομοίωσης, εκτός από μία γενική παράθεση των κύριων χαρακτηριστικών του, (β) η ανάλυση περιορίζεται στην σκυροδέτηση του caisson, ενώ το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε δεν επεξηγείται, ούτε τεκμηριώνεται και (γ) αναφέρεται ότι η παραγωγικότητα αυξήθηκε ως αποτέλεσμα αλλαγών στον τρόπο εκτέλεσης της σκυροδέτησης, αλλά δεν παρέχονται σαφείς πληροφορίες του πλαισίου πραγματοποίησης της εργασίας, ούτε αναλύονται τα δεδομένα εισόδου, εξόδου και η υπολογιστική διαδικασία.



Σχήμα 5.1: Τοποθέτηση caisson για την κατασκευή κρηπιδότοιχου

Γι' αυτούς τους λόγους, η ενότητα προσπαθεί να θεραπεύσει αυτές τις αδυναμίες και να διατυπώσει ένα ολοκληρωμένο και αναλυτικό πλαίσιο ανάλυσης του κύκλου παραγωγής των caisson, όπως θα φανεί στις επόμενες παραγράφους. Επιπρόσθετα, η μέθοδος προσομοίωσης των Martinez και Rodriguez (1997) διαφέρει από αυτήν που εφαρμόζεται σε αυτή την ενότητα, κάτι το οποίο αποτελεί ένα ακόμη σημείο διαφοροποίησης της προσέγγισης σε σχέση με άλλες ερευνητικές προσπάθειες.

5.3.2. Περιγραφή της μεθόδου κατασκευής caisson

Τα caisson αναφέρονται στην βιβλιογραφία ως «πλωτά κιβώτια σκυροδέματος» (floating box caissons) και συνήθως κατασκευάζονται σε πλωτές αυτοβυθιζόμενες δεξαμενές. Όταν ολοκληρωθεί η κατασκευή τους, τα caisson μεταφέρονται στην τελική τους θέση με ρυμουλκά και οι κυψέλες πληρώνονται αρχικά με νερό και στη συνέχεια με κοκκώδες υλικό, έτσι ώστε να εναποτεθούν στην υποθαλάσσια βάση έδρασης (δες Σχήμα 5.1). Ο κύκλος παραγωγής των caisson ξεκινάει με την κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης (foundation slab) που απαιτεί την χρήση συνεργείων τοποθέτησης ξυλοτύπου, τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού και σκυροδέτησης. Οι

εργασίες εκτελούνται πάνω σε πλωτή αυτοβυθιζόμενη δεξαμενή. Όταν κατασκευαστεί η βάση του caisson, τοποθετείται ο δευτερεύων σιδηρός οπλισμός (π.χ. διανομές, ματίσεις, δεσίματα) και ξεκινάει η φάση της σκυροδέτησης των τοιχίων του caisson.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως εξαιτίας του τυποποιημένου σχήματος των caisson, αλλά και της επαναληπτικής φύσης των εργασιών, αφού τα caisson κατασκευάζονται συνήθως κατά ομάδες, η σκυροδέτησή τους γίνεται με χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου. Ο ολισθαίνων μεταλλότυπος (slipform equipment) είναι μία μέθοδος που εφαρμόζεται στην κατασκευή κάθετων δομικών στοιχείων και ο αναγνώστης παραπέμπεται στους Zayed et al. (2008) για περισσότερες λεπτομέρειες. Το επίπεδο εξειδίκευσης της εργασίας του ολισθαίνοντα μεταλλότυπου εξαρτάται από τον τύπο του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των Martinez και Rodríguez (1997) τα caisson κατασκευάζονται σε πλωτή δεξαμενή που έχει διαμορφωθεί ειδικά για αυτόν τον σκοπό και το σκυρόδεμα διακινείται μέσα από ένα δίκτυο σωληνώσεων που είναι ενσωματωμένο στην δεξαμενή. Τέτοιες λύσεις είναι κοστοβόρες και απαιτούν την επένδυση μεγάλων χρηματικών ποσών για την υλοποίησή τους. Η απόσβεση τέτοιων επενδύσεων απαιτεί την πραγματοποίηση μεγάλης κλίμακας έργων και γι' αυτό δεν είναι ελκυστικές για εργοληπτικές εταιρείες μεσαίου ή μικρού μεγέθους. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστεί μία πιο γενική προσέγγιση, όπου η ανάλυση αφορά στην κατασκευή caisson σε πλωτή αυτοβυθιζόμενη δεξαμενή και το σκυρόδεμα αντλείται κατευθείαν στα caisson με χρήση πρέσας.

Στην γενική περίπτωση, η σκυροδέτηση και η ολίσθηση του μεταλλότυπου περιλαμβάνει τρεις φάσεις (δες Σχήμα 5.2): (α) συναρμολόγηση εξοπλισμού ολίσθησης, (β) ολίσθηση και (γ) αποσυναρμολόγηση εξοπλισμού ολίσθησης. Στη φάση της συναρμολόγησης εξοπλισμού ολίσθησης τοποθετούνται μεταλλικά κιβώτια μεταλλότυπου σε κάθε κελί του caisson από εξειδικευμένο συνεργείο και ακολουθεί η τοποθέτηση των εξωτερικών τοιχίων του μεταλλότυπου. Γίνεται τοπογραφική αποτύπωση όλων των μεταλλικών κιβωτίων και στη συνέχεια τοποθετούνται ειδικές αρπάγες (yokes) επάνω στις οποίες προσαρμόζεται υδραυλικό σύστημα σωληνώσεων. Ακολούθως, ξεκινάει η προετοιμασία της φάσης της ολίσθησης με την πραγματοποίηση ελέγχων ασφαλείας σε όλα τα υδραυλικά συστήματα, ενώ τοποθετούνται κουπαστές και προστατευτικές μπάρες σε όλα τα εξωτερικά τμήματα του μεταλλότυπου περιμετρικά του caisson για την προστασία του εργατικού προσωπικού. Μετά την οριστική παραλαβή του σιδηρού οπλισμού και τον τελικό έλεγχο όλου του εξοπλισμού ξεκινάει η ολίσθηση. Η φάση της αρχικής σκυροδέτησης περιλαμβάνει την σκυροδέτηση σε στρώσεις των 200mm έως 250mm, με ανοχή στα 50mm. Μετά την αρχική σκλήρυνση του σκυροδέματος και την παρέλευση 7-8 ωρών, ξεκινάει η καθ' ύψος ολίσθηση του μεταλλότυπου. Το μέτρο της ολίσθησης ή ο ρυθμός ολίσθησης (sliding rate) μετράται σε m/h ή cm/h και αποτελεί βασικό συντελεστή παραγωγικότητας. Το εύρος του εξαρτάται από τις ιδιότητες του σκυροδέματος, τις καιρικές συνθήκες και την ικανότητα του συνεργείου. Κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, όπου τα τοιχία του caisson κατασκευάζονται καθ' ύψος, τα συνεργεία σκυροδέτησης και τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού εργάζονται συνεχώς. Όταν ολοκληρωθεί η σκυροδέτηση μέχρι ένα συγκεκριμένο ύψος, ο μεταλλότυπος ολισθαίνει ~60cm πάνω από την τελική επιφάνεια και ειδικό συνεργείο καθαρισμού απομακρύνει τυχόν υπολείμματα σκυροδέματος με υδροβολή. Η πλωτή δεξαμενή βυθίζεται στο

νερό, το caisson καθελκύεται με τη χρήση ρυμουλκών και ξεκινάει η φάση της αποσυναρμολόγησης. Το συνεργείο της αποσυναρμολόγησης μετακινεί τον εξοπλισμό της ολίσθησης με τη χρήση οικοδομικών γερανών και εκτελούνται εργασίες συντήρησης και καθαρισμού του μεταλλότυπου. Μετά την ολοκλήρωση και αυτής της φάσης, ο κύκλος παραγωγής επαναλαμβάνεται ξεκινώντας με την κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης.



Σχήμα 5.2: Κύκλος παραγωγής των caisson

Η προηγούμενη διαδικασία μπορεί να διαφοροποιηθεί και να γίνει πιο πολύπλοκη σε περίπτωση που η κατασκευή ενός caisson δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί εξ' ολοκλήρου στην πλωτή δεξαμενή λόγω περιορισμού στην φέρουσα ικανότητά της. Αυτό το ενδεχόμενο συναντάται συχνά, καθώς οι διαθέσιμες πλωτές δεξαμενές σε μία δεδομένη χρονική περίοδο μπορεί να μην ανταποκρίνονται πλήρως στις απαιτήσεις της μελέτης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των caisson. Σε αυτή την περίπτωση, η ολίσθηση πραγματοποιείται σε δύο φάσεις: Η πρώτη φάση ολοκληρώνεται όταν η ολίσθηση σταματήσει σε συγκεκριμένο ύψος του caisson που συναρτάται με την φέρουσα ικανότητα της δεξαμενής. Τότε, το caisson καθαρίζεται και καθελκύεται από την πλωτή δεξαμενή και η ολίσθηση συνεχίζεται (δεύτερη φάση) εν πλω μέχρι την ολοκλήρωση του κύκλου παραγωγής τους. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η δεύτερη φάση της ολίσθησης δεν μπορεί να εκτελεστεί τις νυχτερινές ώρες, γι' αυτό τον λόγο οι εργασίες της υδροβολής θα πρέπει να ολοκληρωθούν εγκαίρως, έτσι ώστε να αποφευχθούν καθυστερήσεις (π.χ. εάν η υδροβολή ολοκληρωθεί κατά τις νυχτερινές ώρες, τότε η ολίσθηση θα πρέπει να ξεκινήσει τον επόμενο πρωί). Ένα ακόμα κρίσιμο σημείο της κατασκευής των caisson σε δύο φάσεις είναι το γεγονός πως η πλωτή δεξαμενή είναι και πάλι διαθέσιμη αμέσως μετά την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης. Συνεπώς, η κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης του επόμενου caisson μπορεί να εκτελεστεί παράλληλα με τις εργασίες σκυροδέτησης του caisson που βρίσκεται εν πλω, αρκεί να επαρκούν τα μέσα παραγωγής (π.χ. συνεργεία, σκυρόδεμα).

5.4. Διατύπωση του στοχαστικού μοντέλου και λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim*

Οι επόμενες παράγραφοι περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο η διαδικασία παραγωγής των caisson, όπως παρουσιάστηκε πιο πριν, αρχικά αποτυπώθηκε σε ένα στοχαστικό μοντέλο παραγωγικότητας, και στη συνέχεια ενσωματώθηκε στο πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης *CaissonSim*.

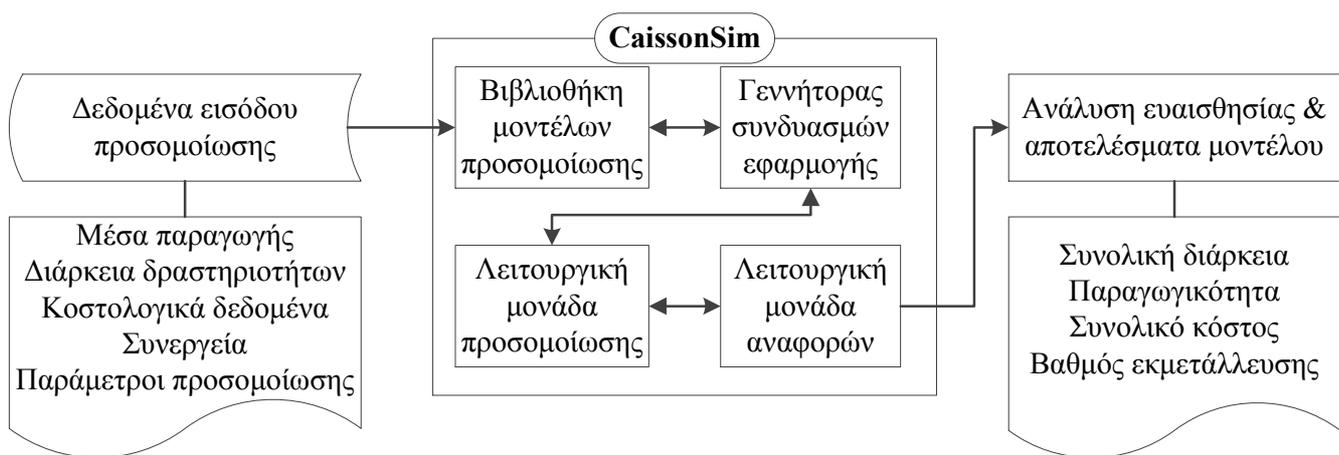
Το στοχαστικό μοντέλο εκτίμησης της παραγωγικότητας αναπτύχθηκε με βάση τα στοιχεία μοντελοποίησης EZStrobe (δες §2.8.2), όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Το διάγραμμα του Σχήματος 5.3 παρουσιάζει την γενική περίπτωση, όπου τα caisson κατασκευάζονται σε δύο φάσεις (όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο §5.3.2), ενώ τα στοιχεία μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν για να κατασκευαστεί το διάγραμμα του μοντέλου, καθώς και η επεξήγηση της σημασίας καθενός από αυτά απεικονίζονται στον Πίνακα 5.1. Το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης ενσωματώθηκε στο πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης που δημιουργήθηκε με βάση την γλώσσα προσομοίωσης STROBOSCOPE, ενώ ο πρόσθετος κώδικας για την υλοποίησή του είναι γραμμένος στη γλώσσα C#. Η βασική δομή του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim*, καθώς και τα βασικά συστατικά του μέρη φαίνονται στο Σχήμα 5.4, ενώ στις επόμενες παραγράφους αναλύεται κάθε λειτουργική μονάδα με περισσότερη λεπτομέρεια.

Πίνακας 5.1: Στοιχεία μοντελοποίησης και ερμηνεία τους για το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης κατασκευής caisson

| Στοιχείο μοντέλου | Τύπος στοιχείου | Περιγραφή |
|-------------------|-----------------|--|
| Act1 (Act1Dur) | Combi (Δ.Ε. *) | Κατασκευή ξυλοτύπου θεμελίωσης (διάρκεια) |
| Act2 (Act2Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Τοποθέτηση σιδηρού οπλισμού θεμελίωσης (διάρκεια) |
| Act3 (Act3Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Σκυροδέτηση πλάκας θεμελίωσης (διάρκεια) |
| Act4 (Act4Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Τοποθέτηση δευτερεύοντος σ.ο. θεμελίωσης (διάρκεια) |
| Act5 (Act5Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Συναρμολόγηση εξοπλισμού ολίσθησης (διάρκεια) |
| Act6 (Act6Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Προετοιμασία αρχικής σκυροδέτησης – Φάση Α (διάρκεια) |
| Act7 (Act7Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Έλεγχος ασφαλείας – Φάση Α (διάρκεια) |
| Act8 (Act8Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Αρχική σκυροδέτηση – Φάση Α (διάρκεια) |
| Act9 (Act9Dur) | Normal (Δ.Ε.) | Ολίσθηση – Φάση Α (διάρκεια) |
| Act10 (Act10Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Ελεύθερη ολίσθηση – Φάση Α (διάρκεια) |
| Act11 (Act11Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Καθαρισμός – υδροβολή (διάρκεια) |
| Act12 (Act12Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Καθέλκυση (διάρκεια) |
| Act13 (Act13Dur) | Normal (Δ.Ε.) | Σταλία νυκτός (διάρκεια) |
| Act14 (Act14Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Προετοιμασία αρχικής σκυροδέτησης – Φάση Β (διάρκεια) |
| Act15 (Act15Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Έλεγχος ασφαλείας – Φάση Β (διάρκεια) |
| Act16 (Act16Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Αρχική σκυροδέτηση – Φάση Β (διάρκεια) |
| Act17 (Act17Dur) | Normal (Δ.Ε.) | Ολίσθηση – Φάση Β (διάρκεια) |
| Act18 (Act18Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Ελεύθερη ολίσθηση – Φάση Β (διάρκεια) |
| Act19 (Act19Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Αποσυναρμολόγηση (διάρκεια) |
| q1 | Queue | Σιδηρός οπλισμός βάσης θεμελίωσης – έτοιμος |
| q2 | Queue | Σκυροδέτηση βάσης – έτοιμη |
| q3 | Queue | Δευτερέων σ.ο. έτοιμος για ολίσθηση – Φάση Α |
| q4 | Queue | Συναρμολόγηση – έτοιμη |
| q5 | Queue | Προετοιμασία αρχικής σκυροδέτησης – Φάση Α – έτοιμη |
| q6 | Queue | Έτοιμη για έλεγχο ασφαλείας πριν την ολίσθηση – Φάση Α |
| q7 | Queue | Έτοιμη για αρχική σκυροδέτηση – Φάση Α |
| q8 | Queue | Έτοιμη για ελεύθερη ολίσθηση – Φάση Α |
| q9 | Queue | Έτοιμη για καθαρισμό – υδροβολή |
| q10 | Queue | Έτοιμη για καθέλκυση |

| | | |
|------------|-------|--|
| q11 | Queue | Προετοιμασία αρχικής σκυροδέτησης – Φάση Β – έτοιμη |
| q12 | Queue | Έτοιμη για έλεγχο ασφαλείας πριν την ολίσθηση – Φάση Β |
| q13 | Queue | Έτοιμη για αρχική σκυροδέτηση – Φάση Β |
| q14 | Queue | Έτοιμη για ελεύθερη ολίσθηση – Φάση Β |
| q15 | Queue | Έτοιμη για αποσυναρμολόγηση |
| AblCrew | Queue | Συνεργείο συναρμολόγησης |
| BeginSim | Queue | Εκκίνηση προσομοίωσης |
| CncrCrew | Queue | Συνεργείο σκυροδέτησης |
| DsmntlCrew | Queue | Συνεργείο αποσυναρμολόγησης |
| EqAvl | Queue | Εξοπλισμός ολίσθησης – διαθέσιμος |
| FlDockAvl | Queue | Πλωτή δεξαμενή – διαθέσιμη |
| FormCrew | Queue | Συνεργείο τοποθέτησης ξυλοτύπου |
| RebarCrew | Queue | Συνεργείο τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού |
| RmvlCrew | Queue | Συνεργείο καθέλκυσης |
| SCncrCrew | Queue | Συνεργείο ολίσθησης |
| SftCrew | Queue | Συνεργείο ελέγχου ασφαλείας |
| SRebarCrew | Queue | Συνεργείο τοποθέτησης σ.ο. κατά την ολίσθηση |
| WashCrew | Queue | Συνεργείο καθαρισμού - υδροβολής |
| nAbl | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων συναρμολόγησης |
| nCaisson | Δ.Ε. | Αριθμός caisson που θα κατασκευαστούν |
| nCncr | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων σκυροδέτησης |
| nDock | Δ.Ε. | Αριθμός πλωτών δεξαμενών |
| nDsmntl | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων αποσυναρμολόγησης |
| nEq | Δ.Ε. | Αριθμός σετ εξοπλισμού ολίσθησης |
| nForm | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων τοποθέτησης ξυλοτύπου |
| nRebar | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων τοποθέτησης σ.ο. |
| nRmvl | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων καθέλκυσης |
| nSCncr | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων σκυροδέτησης κατά την ολίσθηση |
| nSft | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων ασφαλείας |
| nSRebar | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων τοποθέτησης σ.ο. κατά την ολίσθηση |
| nWash | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων καθαρισμού – υδροβολής |

*Δ.Ε. = Δεδομένα Εισόδου



Σχήμα 5.4: Βασικά συστατικά μέρη του συστήματος *CaissonSim*

5.4.1. Βιβλιοθήκη μοντέλων προσομοίωσης

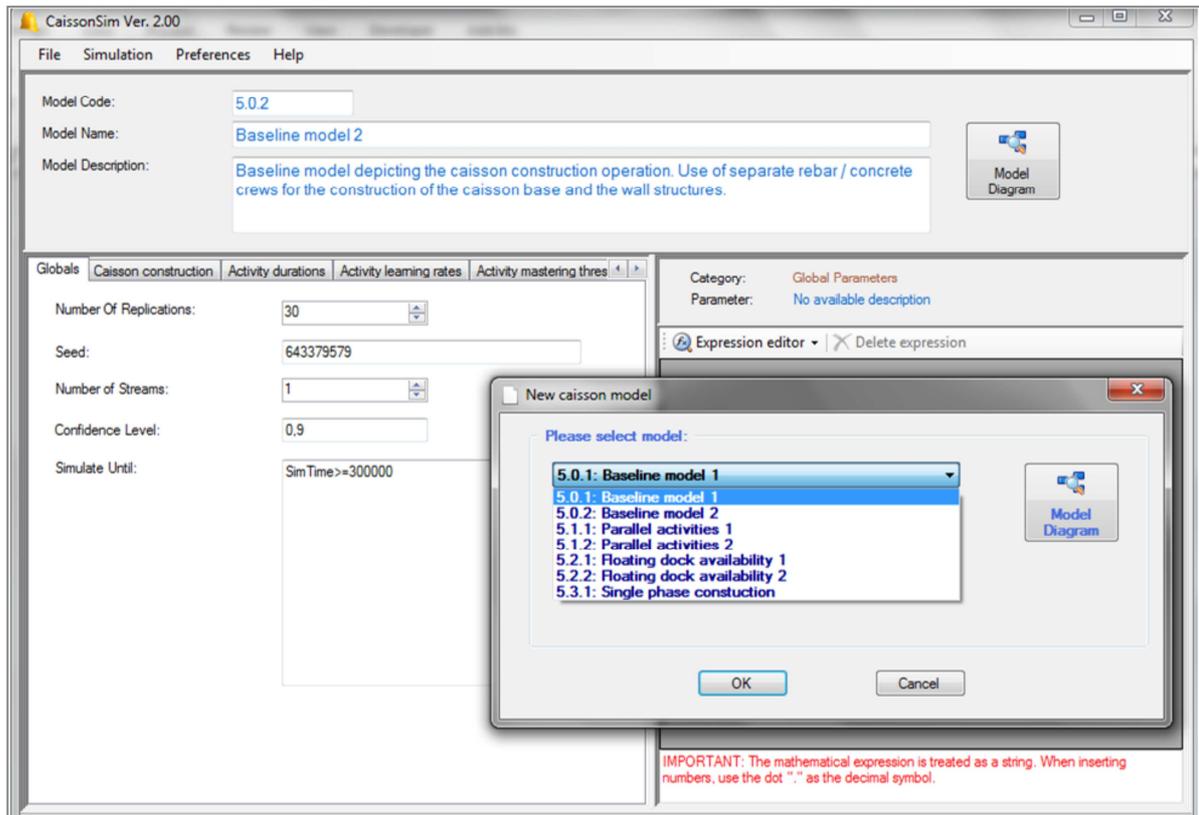
Το πρώτο τμήμα του λογισμικού αποτελείται από τη διεπιφάνεια εισαγωγής δεδομένων (input interface), όπου ο χρήστης μπορεί να επιλέξει το προτιμώμενο μοντέλο προσομοίωσης από μία βιβλιοθήκη πρότυπων μοντέλων (templates) προσομοίωσης caisson (Σχήμα 5.5). Κάθε πρότυπο μοντέλο αντιπροσωπεύει και μία διαφορετική λειτουργική διάταξη. Στο αρχικό μοντέλο προσομοίωσης του Σχήματος 5.3 προστέθηκαν άλλα έξι πρότυπα μοντέλα, τα οποία επεξηγούνται συνολικά παρακάτω:

1. **Μοντέλα «5.0.1» / «5.0.2»:** Κατασκευή caisson σε πλωτή δεξαμενή σε δύο φάσεις. Στο πρότυπο «5.0.1» χρησιμοποιούνται τα ίδια συνεργεία σκυροδέτησης και τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού για την κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης, καθώς και των τοιχίων του caisson. Εναλλακτικά, στο πρότυπο «5.0.2» χρησιμοποιούνται διαφορετικά συνεργεία σκυροδέτησης και τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού για την κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης καθώς και των τοιχίων του caisson. Το πρότυπο «5.0.2» απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3.
2. **Μοντέλα «5.1.1» / «5.1.2»:** Σε αυτήν την οικογένεια προτύπων τα μοντέλα της προσομοίωσης αντιπροσωπεύουν τη διαδικασία κατασκευής που περιγράφηκε πιο πάνω με μία αλλαγή στην ροή της εργασίας: υποτίθεται ότι οι εργασίες καθαρισμού (υδροβολής) και καθέλκυσης μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης φάσης εκτελούνται παράλληλα και όχι σειριακά. Η διαφοροποίηση στα πρότυπα «.1» και «.2» είναι η ίδια, όπως και στα προηγούμενα μοντέλα.
3. **Μοντέλα «5.2.1» / «5.2.2»:** Ομοίως με παραπάνω, με τη διαφορά πως η πλωτή δεξαμενή είναι διαθέσιμη με την ολοκλήρωση της κατασκευής των τοιχίων του caisson. Με άλλα λόγια, η κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης του επόμενου caisson δεν μπορεί να ξεκινήσει μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής του προηγούμενου caisson. Η διαφοροποίηση στα πρότυπα «.1» και «.2» είναι η ίδια με τα προηγούμενα μοντέλα.

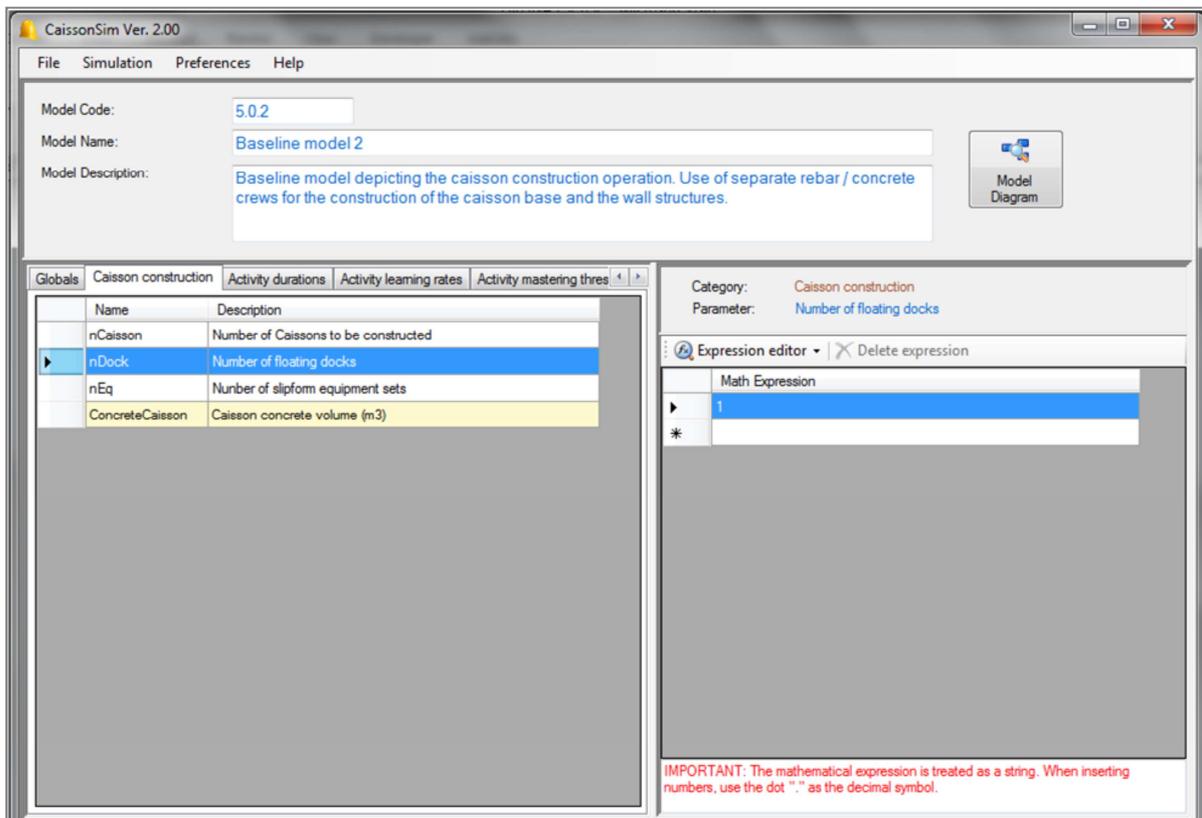
4. **Μοντέλο «5.3.1»:** Εκφράζει την κατασκευή των caisson στην πλωτή δεξαμενή σε μία φάση, δηλ. τα caisson καθελκύονται από την δεξαμενή όταν έχει ολοκληρωθεί ο κύκλος παραγωγής τους. Χρησιμοποιούνται τα ίδια συνεργεία σκυροδέτησης και τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού, τόσο για την πλάκα θεμελίωσης, όσο και για τα τοιχία των caisson.

Τα μοντέλα προσομοίωσης έχουν δομηθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην προσθέτουν περιττή πολυπλοκότητα στην διαδικασία, αλλά και να μην υπεραπλουστεύουν το σύστημα, που θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας τους. Η βασική αρχή που διέπει την διαδικασία δημιουργίας του μοντέλου είναι η «αρχή της φειδούς» (law of parsimony), που υποδηλώνει ότι απλούστερα μοντέλα τα οποία καταφέρνουν να εξηγούν το σύστημα με επάρκεια είναι προτιμότερα από πιο πολύπλοκα συστήματα που δεν συνεισφέρουν ουσιαστικά στην εννοιολογική αξία του μοντέλου (Wang and Halpin, 2004). Η επαλήθευση των μοντέλων επιτεύχθηκε μέσω της πραγματοποίησης πιλοτικών προσομοιώσεων με εναλλαγή των παραμέτρων εισόδου και αξιολόγηση της συνέπειας των αντίστοιχων αποτελεσμάτων. Η φαινομενική εγκυρότητα (face validity) των μοντέλων ελέγχθηκε μέσω της διεξαγωγής ειδικών συνεδριών (workshops) με επιστήμονες (π.χ. λιμενολόγους μηχανικούς) και επαγγελματίες (π.χ. διευθυντές λιμενικών έργων) που είχαν επίγνωση των εργασιών που μοντελοποιήθηκαν και πολύχρονη εμπειρία στην πραγματοποίηση σχετικών τεχνικών έργων (Law, 2007).

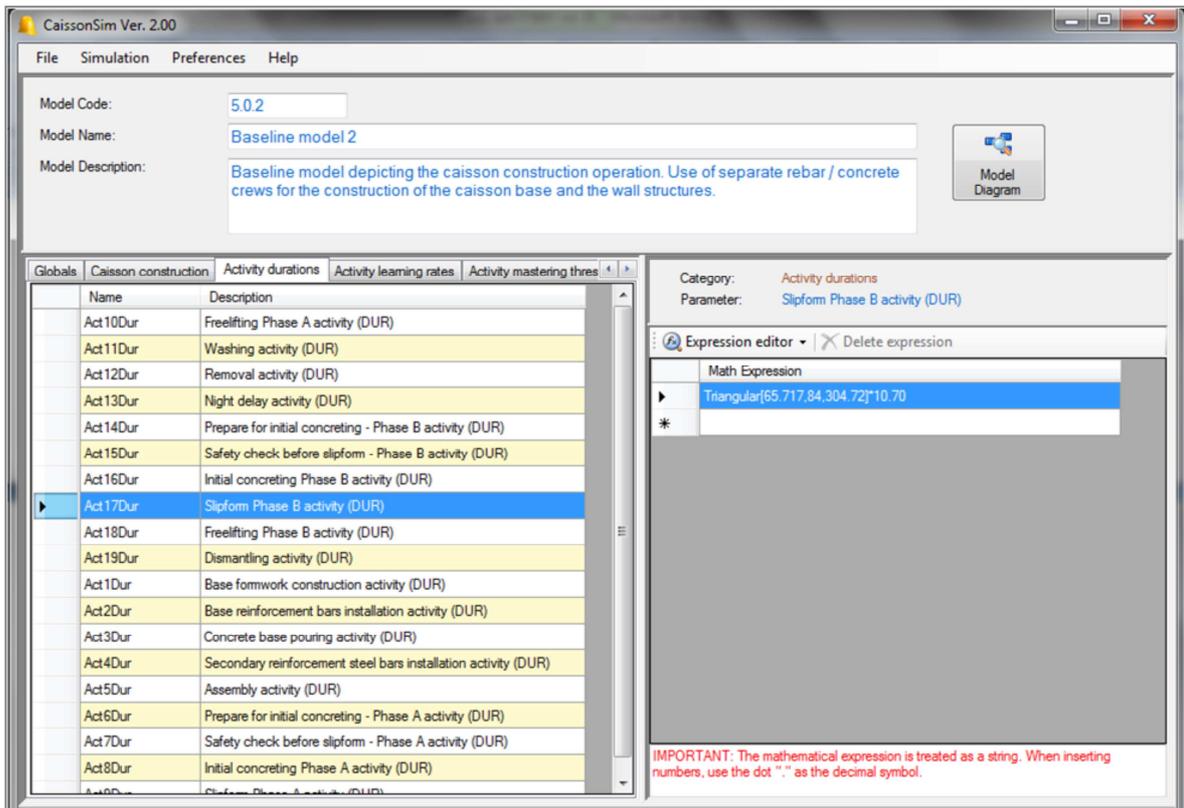
Για κάθε επιλεγμένο υπόδειγμα, ο χρήστης μπορεί να καθορίσει παραμέτρους, όπως τα μέσα παραγωγής του έργου (π.χ. αριθμός των caisson που θα κατασκευαστούν, πλήθος σετ μεταλλότυπων ή/και πλωτών δεξαμενών, όγκος σκυροδέματος ανά caisson) (Σχήμα 5.6), τη διάρκεια των δραστηριοτήτων (Σχήμα 5.7), τον αριθμό των συνεργείων (Σχήμα 5.8) και κοστολογικά δεδομένα (π.χ. εργατικό κόστος, κόστος εξοπλισμού, γενικά έξοδα) (Σχήμα 5.9). Το λογισμικό διαθέτει ενσωματωμένο επεξεργαστή μαθηματικών παραστάσεων που βοηθάει τους χρήστες στη χρησιμοποίηση προκαθορισμένων μαθηματικών, στοχαστικών, στατιστικών και τριγωνομετρικών συναρτήσεων που αναγνωρίζονται από τη γλώσσα προσομοίωσης STROBOSCOPE για τον καθορισμό των δεδομένων εισόδου των μοντέλων (Σχήμα 5.10). Επιπρόσθετα, μπορούν να καθοριστούν βασικές παράμετροι της προσομοίωσης (π.χ. αριθμός επαναλήψεων, αρχική τιμή της γεννήτριας τυχαίων αριθμών (seed number), επίπεδο εμπιστοσύνης, συνθήκες τερματισμού), έτσι ώστε να διαμορφωθεί το επιθυμητό πειραματικό πλαίσιο της ανάλυσης (Σχήμα 5.5). Κάθε μοντέλο μπορεί να αποθηκευτεί για μελλοντική χρήση, είτε ως ξεχωριστό αρχείο (“Save As...”), είτε ως νέο πρότυπο μοντέλο μίας συγκεκριμένης μεθόδου κατασκευής (“Save As Default”) και να ανοιχθεί από τον χρήστη για περαιτέρω επεξεργασία σε πρωθύστερο χρόνο (Σχήμα 5.11).



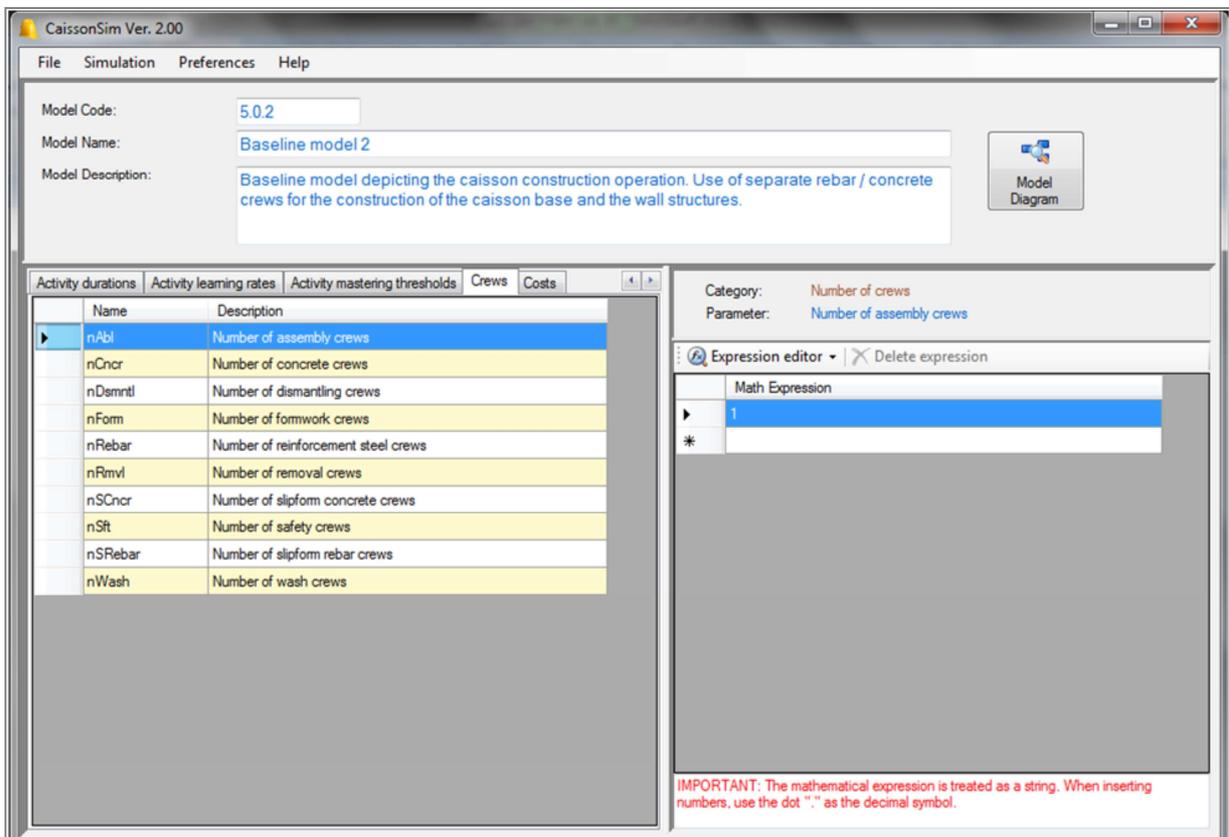
Σχήμα 5.5: Διεπιφάνεια χρήστη στο *CaissonSim* για τον καθορισμό του μοντέλου



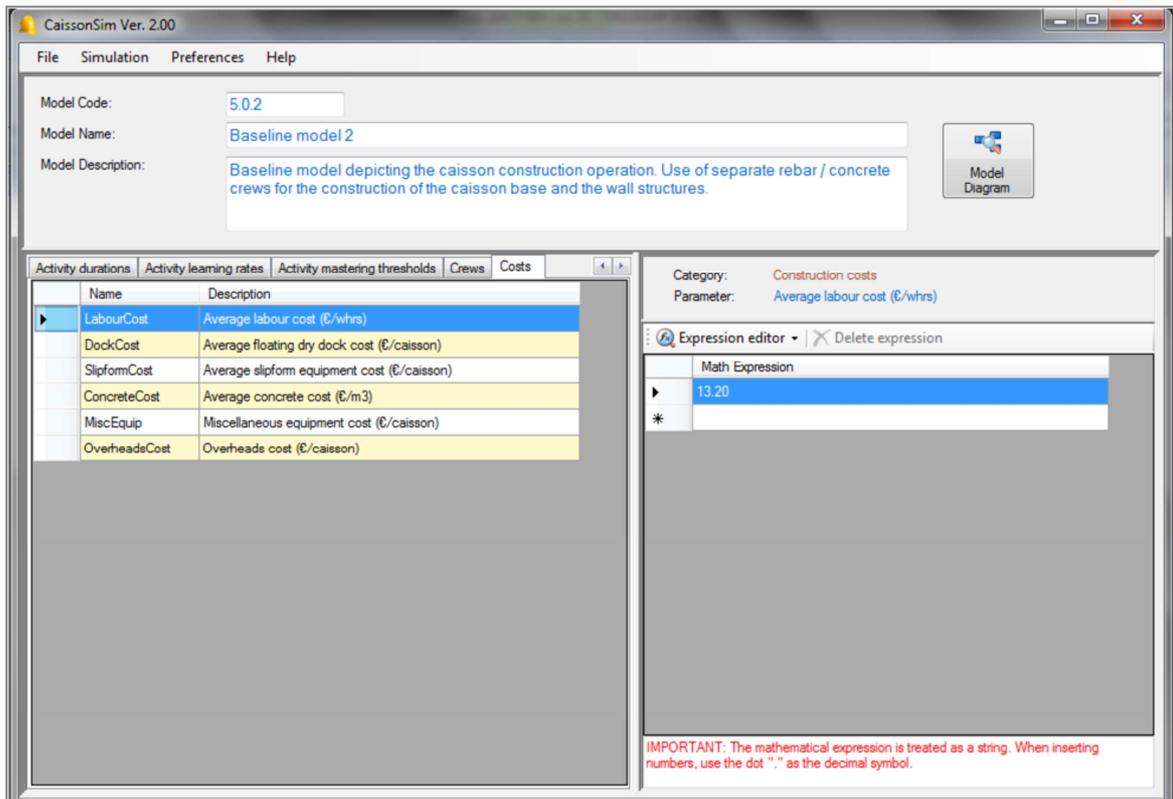
Σχήμα 5.6: Καθορισμός μέσω παραγωγής στο *CaissonSim*



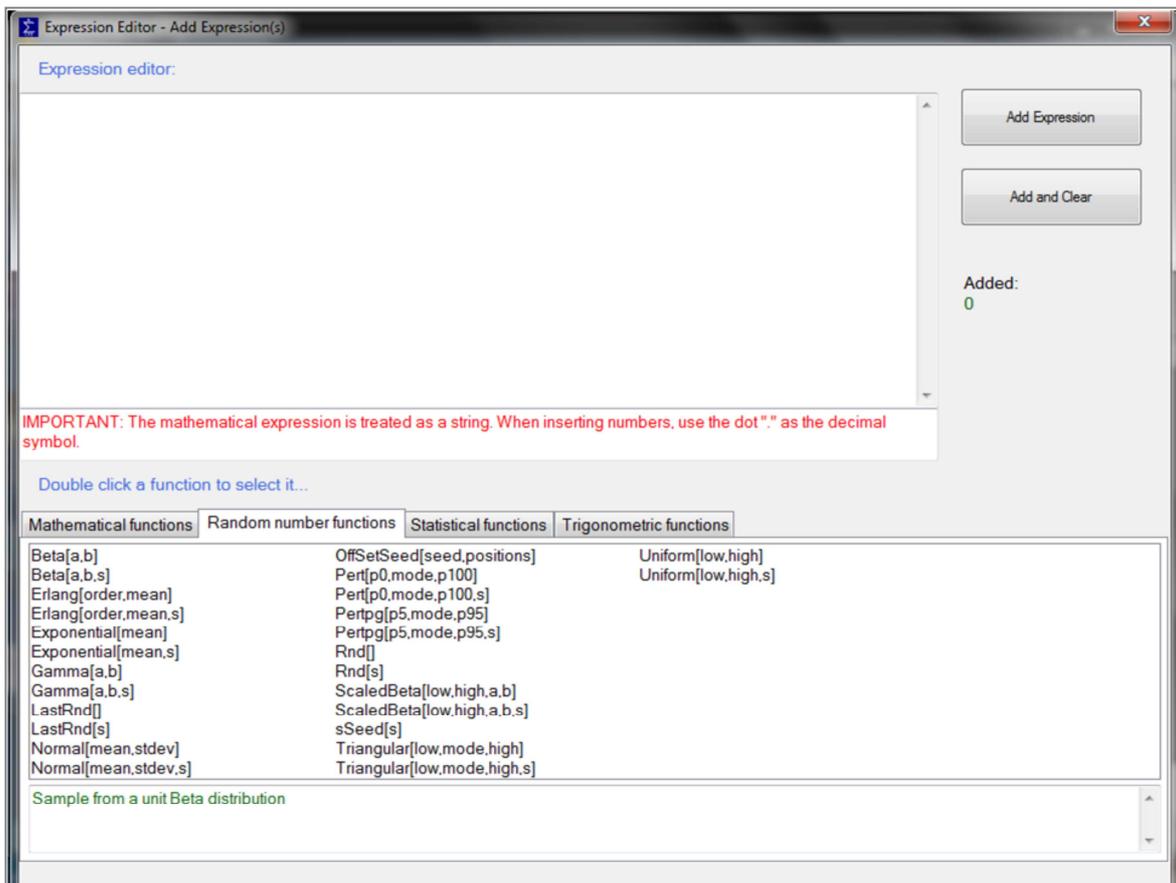
Σχήμα 5.7: Καθορισμός χρονικής διάρκειας δραστηριοτήτων στο *CaissonSim*



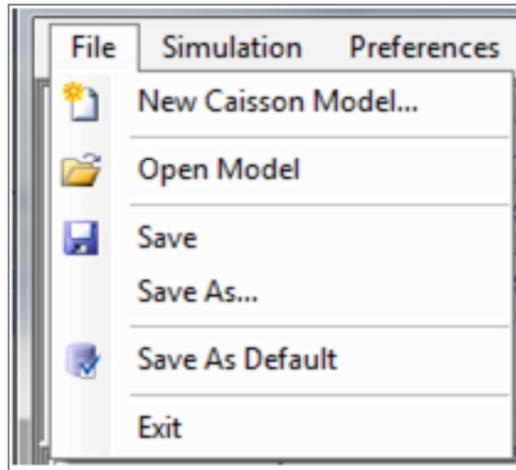
Σχήμα 5.8: Καθορισμός αριθμού συνεργείων στο *CaissonSim*



Σχήμα 5.9: Καθορισμός κοστολογικών δεδομένων στο *CaissonSim*



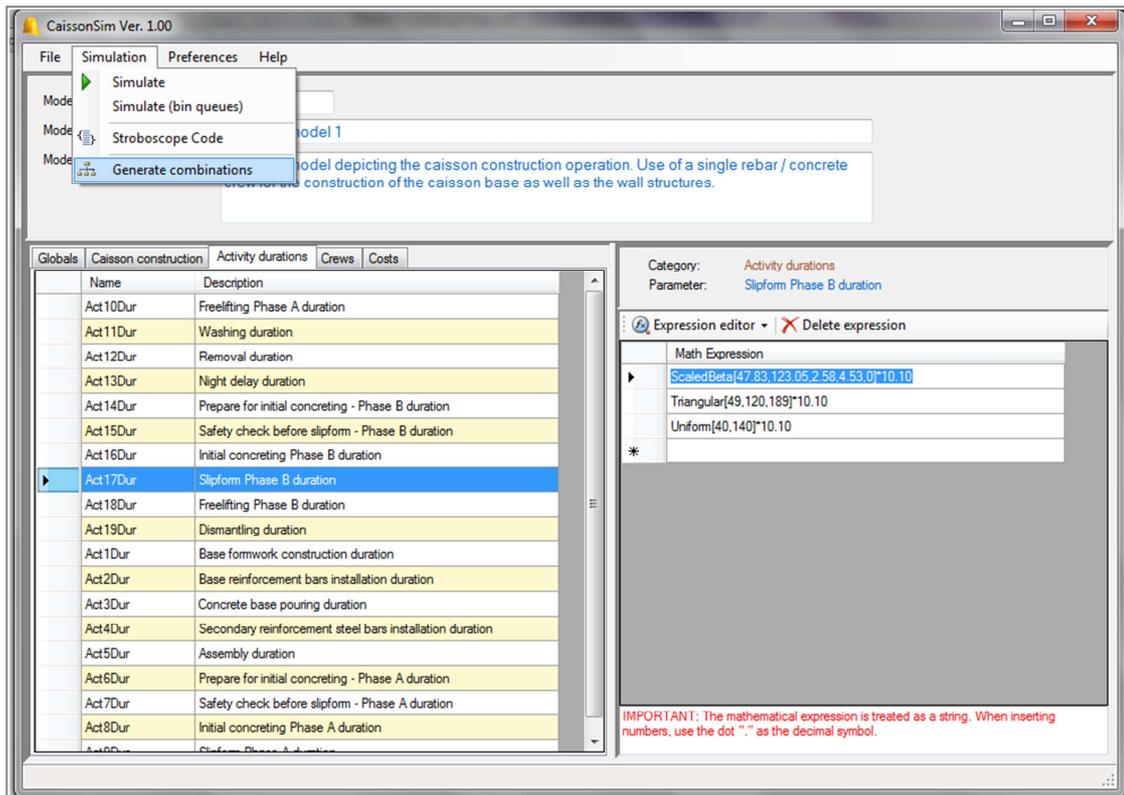
Σχήμα 5.10: Επεξεργαστής μαθηματικών παραστάσεων στο *CaissonSim*



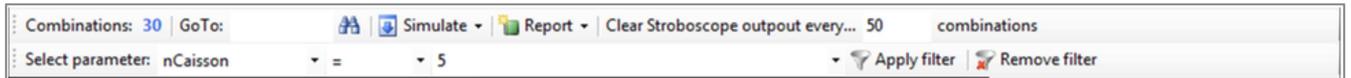
Σχήμα 5.11: Μενού για τη δημιουργία, το άνοιγμα και την αποθήκευση μοντέλων προσομοίωσης

5.4.2. Γεννήτορας συνδυασμών εφαρμογής

Ένα από τα πιο λειτουργικά χαρακτηριστικά του *CaissonSim* είναι η δυνατότητα αυτόματης δημιουργίας διαφορετικών σεναρίων προσομοίωσης για τα απασχολούμενα μέσα παραγωγής, τις χρονικές διάρκειες των δραστηριοτήτων ή τα αναμενόμενα κόστη πριν από την έναρξη των πειραμάτων της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, το λογισμικό επιτρέπει τον καθορισμό πολλαπλών τιμών εισόδου για κάθε μέσο παραγωγής ή μεταβλητή εισόδου που περιλαμβάνεται στο μοντέλο που έχει επιλεγεί. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5.12 φαίνεται η αντίστοιχη οθόνη του συστήματος για τον καθορισμό τριών διαφορετικών τιμών της διάρκειας της δραστηριότητας «Act17». Όταν ολοκληρωθεί ο καθορισμός των τιμών, ο γεννήτορας των διαφορετικών συνδυασμών εφαρμογής καθορίζει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς που μπορεί να προκύψουν. Σε κάθε συνδυασμό αντιστοιχεί ένας μοναδικός αριθμός και οι διαφορετικές τιμές των παραμέτρων αποθηκεύονται στο σύστημα. Στην περίπτωση που ο αριθμός των συνδυασμών είναι πολύ μεγάλος ή ο χρήστης επιθυμεί τον περιορισμό του εύρους της ανάλυσης, υπάρχει επιλογή φιλτραρίσματος για τη δημιουργία ενός υποσυνόλου συνδυασμών, στη βάση των επιλεγμένων παραμέτρων, και η προσομοίωση πραγματοποιείται μόνο για αυτό το υποσύνολο (Σχήμα 5.13). Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης καθορίζει ένα σαφές πειραματικό πλαίσιο που προσδιορίζει το εύρος της ανάλυσης και παρέχει πλήρη έλεγχο της διαδικασίας προσομοίωσης. Τέλος, το *CaissonSim* παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού συγκεντρωτικών ουρών (bin queues), έτσι όπως καθορίζονται στο STROBOSCOPE.



Σχήμα 5.12: Διεπιφάνεια χρήστη στο *CaissonSim* για τη δημιουργία συνδυασμών εφαρμογής



Σχήμα 5.13: Επιλογή φιλτραρίσματος για τον προσδιορισμό υποσυνόλου συνδυασμών

5.4.3. Λειτουργική μονάδα προσομοίωσης

Το λογισμικό χρησιμοποιεί την μηχανή προσομοίωσης STROBOSCOPE. Μετά τον καθορισμό των δεδομένων εισόδου και την δημιουργία των συνδυασμών εφαρμογής, παράγεται ο κώδικας STROBOSCOPE για τα επιλεγμένα μοντέλα και η προσομοίωση εκτελείται για τον καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Ο κώδικας STROBOSCOPE είναι προσβάσιμος στον χρήστη σε μορφή .txt για λόγους επικύρωσης και επαλήθευσης. Ο πρόσθετος κώδικας για τον περαιτέρω έλεγχο του συστήματος είναι γραμμένος σε γλώσσα C#.

5.4.4. Λειτουργική μονάδα αναφορών

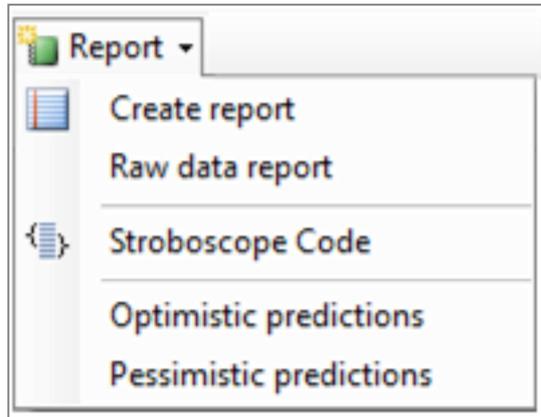
Η λειτουργική μονάδα αναφορών ενεργοποιείται όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση. Το λογισμικό *CaissonSim* παράγει τριών ειδών αναφορές (Σχήμα 5.14):

- (i) **Βασική αναφορά (report):** Η βασική αναφορά περιέχει όλα τα απαραίτητα στατιστικά δεδομένα που προκύπτουν από την προσομοίωση. Η εκτίμηση των στατιστικών δεδομένων γίνεται για συγκεκριμένες παραμέτρους εξόδου όπως η μέση τιμή, οι μέγιστες/ελάχιστες τιμές, η τυπική απόκλιση και τα επίπεδα εμπιστοσύνης (Σχήμα 5.5). Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των αναφορών

του *CaissonSim* είναι η διαδραστικότητά τους. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη στήλη της αναφοράς (Σχήμα 5.15) φαίνεται ότι ο αριθμός των επαναλήψεων είναι υπογραμμισμένος καθώς αποτελεί «υπερσύνδεση». Αυτό σημαίνει ότι τα στατιστικά αποτελέσματα κάθε επανάληψης είναι διαθέσιμα για όλους τους συνδυασμούς που έχουν προσομοιωθεί. Συνεπώς, εάν ο χρήστης επιθυμεί να δει πως εκτελέστηκε μία συγκεκριμένη επανάληψη για λόγους επαλήθευσης ή επικύρωσης, αυτό είναι εφικτό καθώς το σύστημα συλλέγει και παρέχει όλα τα στατιστικά δεδομένα για κάθε καθολική μεταβλητή και στοιχείο μοντελοποίησης του STROBOSCOPE. Για παράδειγμα, τα αναλυτικά δεδομένα για την 10^η επανάληψη του Σχήματος 5.15 φαίνονται στο Σχήμα 5.16 για κάθε μία δραστηριότητα. Γενικότερα, η διαδραστική αναφορά καταγράφει όλα τα στατιστικά δεδομένα για κάθε στοιχείο μοντελοποίησης του μοντέλου (π.χ. δραστηριότητες, ουρές αναμονής).

- (ii) **Αναφορά πηγαίων δεδομένων (raw data)**: Η αναφορά πηγαίων δεδομένων περιέχει τις ίδιες πληροφορίες όπως και η βασική αναφορά, με τη διαφορά πως η δομή και η διάταξη των δεδομένων διευκολύνει την επεξεργασία τους από προγράμματα λογιστικών φύλλων (π.χ. Excel) (Σχήμα 5.17).
- (iii) **Αναφορά επιπέδου εμπιστοσύνης**: Όσον αφορά στις τρεις βασικές παραμέτρους εξόδου (κόστος, διάρκεια, παραγωγικότητα) το *CaissonSim* δίνει τη δυνατότητα δημιουργίας δύο τύπων αναφορών, μίας απαισιόδοξης (pessimistic predictions) και μίας αισιόδοξης (optimistic predictions) στη βάση του επιπέδου εμπιστοσύνης που κυμαίνεται από 10% έως 90%. Η απαισιόδοξη αναφορά δίνει τις χαμηλότερες τιμές των εκτιμώμενων μέσων τιμών για τις παραμέτρους εξόδου, ενώ η αισιόδοξη αναφορά δίνει τις μεγαλύτερες τιμές αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, τα αποτελέσματα μπορούν να καταταχθούν κατά αύξουσα ή φθίνουσα σειρά. Η λογική είναι πως η απαισιόδοξη αναφορά αντιπροσωπεύει μία συντηρητική ανάλυση, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη φάση της μελέτης του έργου για να προσδιοριστεί η χειρότερη δυνατή έκβαση (worst case scenario) του χρονικού και οικονομικού προγραμματισμού. Αντίστοιχα, η αισιόδοξη αναφορά αποτελεί μία βάση μέτρησης των περιθωρίων βελτίωσης, όταν πια θα έχουν ξεκινήσει οι εργασίες ή μία βάση σύγκρισης για να αξιολογείται η βέλτιστη δυνατή απόδοση (best case scenario) του συστήματος σε σχέση με την πραγματική απόδοση επί τόπου του έργου.

Η αξιολόγηση του στοχαστικού μοντέλου και του λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim* έγινε μέσω μελέτης περίπτωσης (case study) που παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6.



Σχήμα 5.14: Καθορισμός τύπου αναφοράς αποτελεσμάτων προσομοίωσης

A screenshot of a software window titled 'Reports'. The window displays a table with the following columns: 'Replication', 'Tot Dur', 'Prod Rate', 'FI Ut', and 'Form Crew Ut'. The table contains 28 rows of data, with the first 27 rows having a 'Replication' value of 1 through 27, and the 28th row having a 'Replication' value of 28. The 'Tot Dur' column contains values like 22624.893150236 and 22615.0111315823. The 'Prod Rate' column contains values like 3770.81552503933 and 3769.16852193039. The 'FI Ut' column contains values like 93.3436473623743 and 93.3407387544348. The 'Form Crew Ut' column contains values like 1.03258820596633 and 1.03303941316908. The window also shows a sidebar on the left with a list of numbers from 1 to 30, and an 'OK' button at the bottom.

| Replication | Tot Dur | Prod Rate | FI Ut | Form Crew Ut |
|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 2 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 3 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 4 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 5 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 6 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 7 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 8 | 22615.0111315823 | 3769.16852193039 | 93.3407387544348 | 1.03303941316908 |
| 9 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 10 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 11 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 12 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 13 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 14 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 15 | 22615.0111315823 | 3769.16852193039 | 93.3407387544348 | 1.03303941316908 |
| 16 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 17 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 18 | 22615.0111315823 | 3769.16852193039 | 93.3407387544348 | 1.03303941316908 |
| 19 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 20 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 21 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 22 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 23 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 24 | 22615.0111315823 | 3769.16852193039 | 93.3407387544348 | 1.03303941316908 |
| 25 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 26 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 27 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |
| 28 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 |

Σχήμα 5.15: Η βασική αναφορά του CaissonSim

Reports

Combination: 2 Replication: 10

Activities:

| Name | Description | Ave Dur | Ave Inter | Cur Inst | First Start |
|-------|---|------------------|------------------|----------|------------------|
| Act1 | Base formwork construction | 38.9369963803035 | 3481.00819886815 | 0 | 0 |
| Act2 | Base reinforcement bars installation | 220.164780704172 | 3481.00819886815 | 0 | 38.9369963803035 |
| Act3 | Concrete base pouring | 54.0290836524391 | 3481.00819886815 | 0 | 259.101777084475 |
| Act4 | Secondary reinforcement steel bars installation | 28.6053859221449 | 3481.00819886815 | 0 | 313.130860736914 |
| Act5 | Assembly | 239.079735367817 | 3713.85948392948 | 0 | 341.736246659069 |
| Act6 | Prepare for initial concreting - Phase A | 32.0985777639312 | 3713.85948392948 | 0 | 580.815982016876 |
| Act7 | Safety check before slipform - Phase A | 1 | 3713.85948392948 | 0 | 612.914559780808 |
| Act8 | Initial concreting Phase A | 102.848892432101 | 3713.85948392948 | 0 | 613.914559780808 |
| Act9 | Slipform Phase A | 1368.89500747993 | 3713.85948392948 | 0 | 716.763452212909 |
| Act10 | Freelifting Phase A | 59.8896573192392 | 3713.85948392948 | 0 | 2085.45845969284 |
| Act11 | Washing | 349.595912582984 | 3713.85948392948 | 0 | 2145.34811701207 |
| Act12 | Removal | 44.777010374133 | 3713.85948392948 | 0 | 2504.82604824868 |
| Act13 | Night delay | 9.88201865362097 | 3713.85948392948 | 0 | 2494.94402959906 |
| Act14 | Prepare for initial concreting - Phase B | 6.39256717841726 | 3713.85948392948 | 0 | 2549.60305862281 |
| Act15 | Safety check before slipform - Phase B | 1 | 3713.85948392948 | 0 | 2555.99562580123 |
| Act16 | Initial concreting Phase B | 218.23699223494 | 3713.85948392948 | 0 | 2556.99562580123 |
| Act17 | Slipform Phase B | 970.539874676891 | 3713.85948392948 | 0 | 2775.23261803617 |
| Act18 | Freelifting Phase B | 50.9932883717089 | 3713.85948392948 | 0 | 3745.77249271306 |
| Act19 | Dismantling | 258.829949503773 | 3713.85948392948 | 0 | 3796.76578108477 |

Queues:

OK

Σχήμα 5.16: Αναλυτικά δεδομένα εξόδου για κάθε επανάληψη της προσομοίωσης

Reports

3 of 17

| CombID | Replication | Tot_Dur | Prod_Rate | Fl_Ut | Form_Crew_Ut | Rebar_Ut | Cncr_C |
|--------|-------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------|
| 2 | 29 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 | 6.5972510448843 | 1.43282224 |
| 2 | 30 | 22624.893150236 | 3770.81552503933 | 93.3436473623743 | 1.03258820596633 | 6.5972510448843 | 1.43282224 |
| 3 | 1 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 2 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 3 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 4 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 5 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 6 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 7 | 26328.8706155118 | 3761.2672307874 | 94.2800711281613 | 1.03520951825994 | 6.6139987233568 | 1.43645958 |
| 3 | 8 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 9 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 10 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 11 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 12 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 13 | 26328.8706155118 | 3761.2672307874 | 94.2800711281613 | 1.03520951825995 | 6.6139987233568 | 1.43645958 |
| 3 | 14 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 15 | 26328.8706155118 | 3761.2672307874 | 94.2800711281613 | 1.03520951825995 | 6.6139987233568 | 1.43645958 |
| 3 | 16 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 17 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 18 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 19 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 20 | 26328.8706155118 | 3761.2672307874 | 94.2800711281613 | 1.03520951825995 | 6.6139987233568 | 1.43645958 |
| 3 | 21 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 22 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 23 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 24 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 25 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |
| 3 | 26 | 26338.7526341654 | 3762.67894773792 | 94.2822171843771 | 1.03482111870619 | 6.61151722168255 | 1.4359206 |

OK

Σχήμα 5.17: Η αναφορά πηγαιών δεδομένων του CaissonSim

5.5. Ενσωμάτωση του συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα στην προσομοίωση

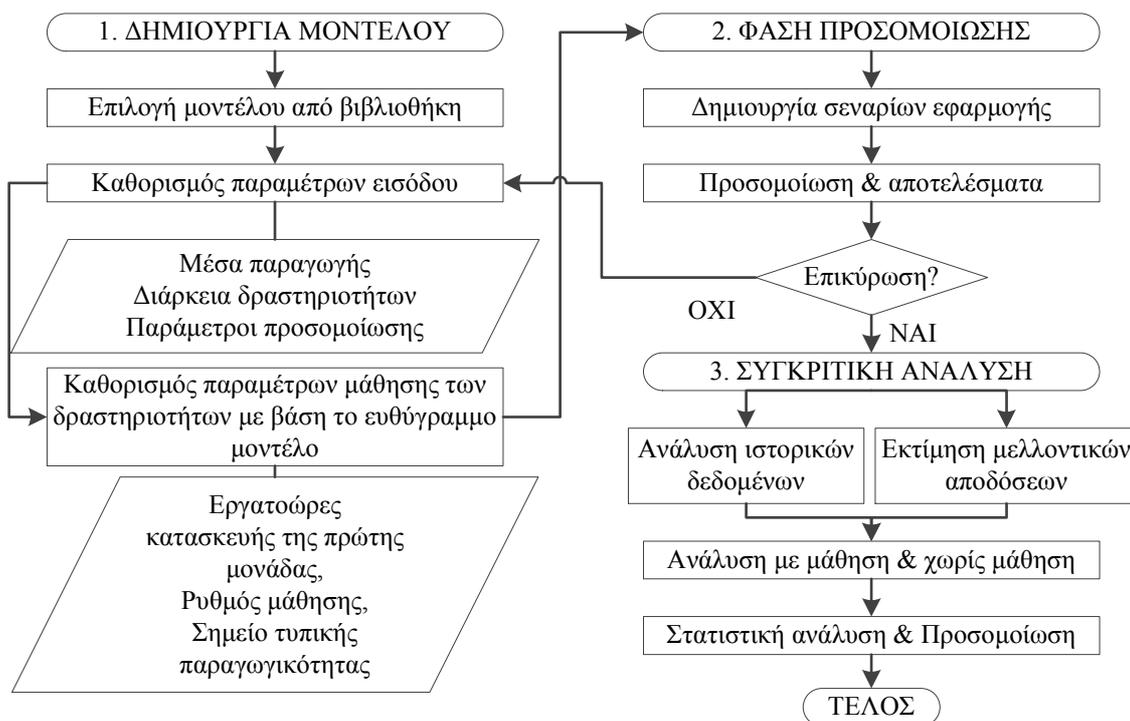
Ο συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα ενσωματώνεται στη μελέτη της παραγωγικότητας μέσω της θεωρίας της καμπύλης μάθησης. Αν και η εφαρμοσιμότητα της θεωρίας της καμπύλης μάθησης έχει εξεταστεί για πολλές κατασκευαστικές δραστηριότητες, η βιβλιογραφία παρουσιάζει έλλειψη όσον αφορά στη μελέτη του φαινομένου της μάθησης για την κατασκευή των caisson. Ο κύκλος παραγωγής των caisson είναι αρκετά πολύπλοκος, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα και ικανοποιεί τις βασικές συνθήκες για την βελτίωση της παραγωγικότητας με την πάροδο του χρόνου (Naresh and Jahren, 1999; Thomas 2009). Επιπρόσθετα, οι εφαρμογές της θεωρίας της καμπύλης μάθησης βασίζονται κυρίως στην στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων (Couto and Texeira 2005; Jarkas and Horner 2011; Pellegrino et al. 2012). Ακόμη, μελέτες της καμπύλης μάθησης με χρήση τεχνικών προσομοίωσης έχουν περιοριστεί εξίσου σε συσχετίσεις παλαιών δεδομένων παραγωγικότητας (Hijaji et al. 1992; Lutz et al. 1994; Naresh and Jahren 1999). Στη βάση αυτών των διαπιστώσεων, αυτή η ενότητα παρουσιάζει μία διαφορετική προσέγγιση, καθώς εφαρμόζει την στατιστική επεξεργασία και την προσομοίωση διακριτών γεγονότων ως τις βασικές μεθόδους μοντελοποίησης για τη διερεύνηση της επιρροής του φαινομένου της μάθησης στην παραγωγικότητα των τεχνικών έργων, τόσο για την αξιολόγηση ιστορικών δεδομένων, όσο και για την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης του συστήματος. Η μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα της προσομοίωσης για τη διερεύνηση της καμπύλης μάθησης σε σχέση με την αξιολόγηση και την πρόβλεψη της παραγωγικότητας.

Το πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης που περιγράφηκε αναλυτικά στην προηγούμενη ενότητα (*CaissonSim*) επεκτάθηκε, έτσι ώστε να ενσωματωθεί ο συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα μέσω του ρυθμού μάθησης σε όλες τις δραστηριότητες των πρότυπων μοντέλων με χρήση κώδικα της γλώσσας προσομοίωσης STROBOSCOPE (Martinez 1996; Martinez and Ioannou 1999). Τα αποτελέσματα αξιολογούνται στη βάση του δυναμικά μεταβαλλόμενου ρυθμού μάθησης και της αντίστοιχης βελτίωσης στην παραγωγικότητα. Η συγκριτική ανάλυση της στατιστικής προσέγγισης και της προσομοίωσης ποσοτικοποιεί την επίδραση του ρυθμού μάθησης στην παραγωγικότητα και παρέχει μία ένδειξη της διακύμανσής της, που είναι χρήσιμη στη φάση του χρονικού και οικονομικού προγραμματισμού του έργου.

Πιο συγκεκριμένα, από τις δεκαεννιά (19) δραστηριότητες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα (Πίνακας 5.1) για την κατασκευή των caisson, οι έξι από αυτές θα μελετηθούν περαιτέρω στο πλαίσιο αυτής της ενότητας: συναρμολόγηση, αποσυναρμολόγηση, αρχική σκυροδέτηση (Φάση Α και Β) καθώς και ολίσθηση για τις δύο φάσεις. Αυτό συμβαίνει, καθώς βασική προϋπόθεση για την εκδήλωση του φαινομένου της μάθησης είναι η βελτίωση της παραγωγικότητας να προέρχεται από την εκτέλεση «αρκούντως σύνθετων» δραστηριοτήτων (“sufficiently complex” activities) (Thomas, 2009). Από το σύνολο των δραστηριοτήτων, μόνο οι προαναφερθείσες κατέχουν τον απαιτούμενο βαθμό πολυπλοκότητας, καθώς η παραγωγικότητα των

υπολοίπων δεν διαφοροποιήθηκε σημαντικά κατά τη φάση της κατασκευής. Η επόμενη παράγραφος παρουσιάζει αναλυτικότερα την ερευνητική μεθοδολογία της μελέτης.

Η μελέτη στηρίχθηκε σε δύο μεθοδολογικές προσεγγίσεις: προσομοίωση και στατιστική επεξεργασία. Αρχικά, θα αναλυθεί με λεπτομέρεια το μεθοδολογικό πλαίσιο της προσομοίωσης, καθώς είναι πιο πολύπλοκο, ακολουθούμενο από την περιγραφή του αντίστοιχου πλαισίου για την στατιστική ανάλυση. Η ανάλυση της προσομοίωσης για το φαινόμενο της μάθησης γίνεται με βάση τη διαδικασία που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.18. Ουσιαστικά αποτελείται από τρεις φάσεις: στην πρώτη φάση επιλέγεται το μοντέλο προσομοίωσης που αντιπροσωπεύει καλύτερα την δραστηριότητα που μελετάται από τη βιβλιοθήκη πρότυπων μοντέλων του *CaissonSim*. Στη συνέχεια καθορίζονται οι παράμετροι εισόδου του έργου (π.χ. αριθμός caisson, όγκος σκυροδέτησης), των αντίστοιχων δραστηριοτήτων (π.χ. χρονική διάρκεια) και των συνεργείων (π.χ. αριθμός συνεργείων, κόστος συνεργείων). Επίσης, προσδιορίζονται οι βασικές παράμετροι της προσομοίωσης, όπως εξηγήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.



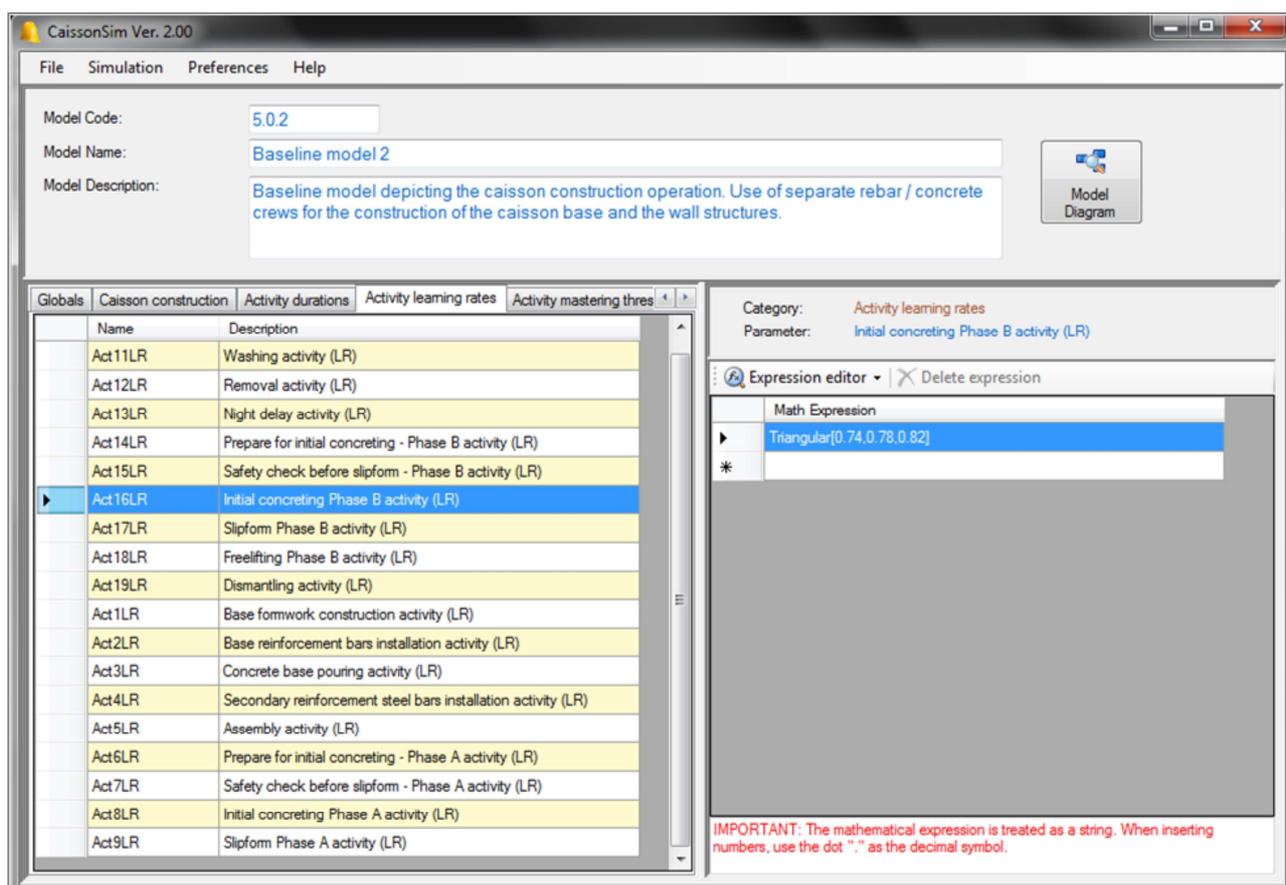
Σχήμα 5.18: Μεθοδολογικό πλαίσιο για την προσομοίωση του φαινομένου της μάθησης

Η μοντελοποίηση του φαινομένου της μάθησης απαιτήσε την ανάπτυξη μίας πρόσθετης λειτουργικής μονάδας στο λογισμικό *CaissonSim* (Σχήμα 5.19). Η προσομοίωση της μάθησης οδήγησε στην προσθήκη τριών παραμέτρων εισόδου για κάθε δραστηριότητα «T»: (α) την αρχική χρονική διάρκεια (εργατώρες) κατασκευής του πρώτου caisson ($ActTiniDur$), (β) τον ρυθμό μάθησης της δραστηριότητας ($ActTLR \in [0,1]$) και (γ) τον αριθμό των caisson ($ActTCaissonLimit$) πέραν του οποίου η βελτίωση της παραγωγικότητας είναι μηδενική (Hijazi et al. 1992). Η τελευταία παράμετρος αντιπροσωπεύει το «σημείο τυπικής παραγωγικότητας» (standard

production point) ή το «όριο μάθησης» (learning development threshold) (Lutz et al. 1994). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το σημείο τυπικής παραγωγικότητας στο λογισμικό *CaissonSim* καθορίζεται από τον αριθμό των caisson μετά την κατασκευή των οποίων δεν παρατηρείται βελτίωση στην παραγωγικότητα. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να προσδιοριστεί ένα κατώτατο όριο εργατωρών, όμως σε συνθήκες απουσίας ιστορικών δεδομένων θεωρήθηκε προτιμότερο να καθοριστεί ένα όριο στον αριθμό των κύκλων παραγωγής, παρά μία τυχαία χρονική διάρκεια. Συνεπώς, το φαινόμενο της μάθησης έχει προσομοιωθεί για όλες τις δραστηριότητες με χρήση της γλώσσας προσομοίωσης STROBOSCOPE όπως φαίνεται παρακάτω:

*ONEND ActT ASSIGN ActTDur PRECOND 'ActT.RelTotInst<ActTCaissonLimit'
'ActTIniDur*((ActT.RelTotInst+1)^(Ln[ActTLR]/Ln[2]))'*;

Το λογισμικό προσομοίωσης *CaissonSim* επιτρέπει τον καθορισμό του ρυθμού μάθησης ως στοχαστική μεταβλητή και όχι απλώς ντετερμινιστική, έτσι ώστε να αποτυπωθεί καλύτερα η διακύμανση της παραγωγικότητας (Hijazi et al. 1992). Όταν ολοκληρωθεί ο καθορισμός των τιμών των μεταβλητών ξεκινάει η δεύτερη φάση, όπου δημιουργούνται όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί από τον γεννήτορα σεναρίων και στη συνέχεια εκτελείται η προσομοίωση για όσες επαναλήψεις έχουν προκαθοριστεί, όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η δεύτερη φάση ολοκληρώνεται με την ενεργοποίηση της λειτουργικής μονάδας παραγωγής αναφορών. Η τρίτη φάση περιλαμβάνει την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων για την ποσοτικοποίηση της επιρροής του ρυθμού μάθησης στην παραγωγικότητα.



Σχήμα 5.19: Διεπιφάνεια χρήστη για την εισαγωγή δεδομένων μάθησης στο *CaissonSim*

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί πως στην στατιστική ανάλυση χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δεδομένα παραγωγικότητας, ενώ εφαρμόστηκε η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων (least mean square) για να καθοριστεί ο ρυθμός μάθησης του ευθύγραμμου μοντέλου. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων διενεργείται μεταξύ της ανάλυσης με βάση την προσομοίωση και την στατιστική προσέγγιση. Στη συνέχεια, αξιολογείται η ικανότητα πρόβλεψης των μοντέλων με σταδιακή αύξηση του συνόλου δεδομένων των ιστορικών στοιχείων παραγωγικότητας. Η ακρίβεια πρόβλεψης των μοντέλων αξιολογείται με βάση τον στατιστικό δείκτη που διατυπώθηκε από τους Everett και Farghal (1994) ειδικά για μοντέλα καμπύλης μάθησης (εξ. 5.1):

$$E_f = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{|y'_{m+i} - y_{m+i}|}{y_{m+i}}}{k} \times 100 \quad (\text{εξ. 5.1})$$

όπου: E_f = ο στατιστικός δείκτης σε ποσοστό, m = ο αριθμός των caisson που έχουν κατασκευαστεί, k = ο αριθμός των caisson των οποίων η παραγωγικότητα θα πρέπει να προβλεφθεί, y'_{m+i} = οι εκτιμώμενες τιμές της παραγωγικότητας και y_{m+i} = οι πραγματικές τιμές της παραγωγικότητας.

Ο δείκτης ουσιαστικά εκφράζει την μέση ποσοστιαία διαφορά μεταξύ των τιμών παραγωγικότητας που εκτιμώνται, οι οποίες βρίσκονται στην επέκταση της καμπύλης προσαρμογής (best-fit), και των πραγματικών τιμών παραγωγικότητας. Όσο μικρότερη η τιμή του δείκτη E_f , τόσο ακριβέστερη είναι η πρόβλεψη της παραγωγικότητας. Οι επόμενες παράγραφοι παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της εμπειρικής ανάλυσης για την κατασκευή των caisson.

5.6. Σύνοψη του κεφαλαίου

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάστηκε το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης καθώς και το πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης *CaissonSim* για την ανάλυση δραστηριοτήτων κατασκευής κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson). Ακόμη, αναλύθηκε η επιρροή του συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα στην εκτίμηση της παραγωγικότητας μέσω της ενσωμάτωσης του ρυθμού μάθησης στο στοχαστικό μοντέλο. Η συμβολή της ερευνητικής προσέγγισης που παρουσιάστηκε σε αυτή την ενότητα είναι τριπλή: Πρώτον, η κατασκευή των caisson με χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου είναι μία εξειδικευμένη δραστηριότητα, με ένταση στα μέσα παραγωγής, η οποία αν και εφαρμόζεται ολοένα και πιο συχνά στην κατασκευή σύγχρονων λιμενικών υποδομών, δεν έχει μελετηθεί διεξοδικά στη βιβλιογραφία. Δεύτερον, το μοντέλο προσομοίωσης που παρουσιάστηκε καλύπτει όλη τη διαδικασία κατασκευής του caisson, περιλαμβανομένης και της διαδικασίας αποσυναρμολόγησης και συναρμολόγησης του εξοπλισμού της ολίσθησης, στο τέλος και στην αρχή του κύκλου παραγωγής των caisson αντίστοιχα. Τρίτον, δημιουργήθηκε βιβλιοθήκη που περιέχει επτά υπο-μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία αντιπροσωπεύουν διαφορετικές προσεγγίσεις της βασικής μεθόδου κατασκευής των caisson, όπως αλλαγές στην αλληλουχία εκτέλεσης των δραστηριοτήτων (π.χ. παράλληλη εκτέλεση μίας ή περισσότερων δραστηριοτήτων), αλλαγές στον αριθμό των συνεργείων και διαφοροποιήσεις σε βασικά μέσα παραγωγής και εξοπλισμό του έργου, όπως η πλωτή αυτοβυθιζόμενη δεξαμενή (submersible floating dock).

Κεφάλαιο 6 Αξιολόγηση της έρευνας

6.1. Σκοπός

Σκοπός του κεφαλαίου είναι η αξιολόγηση της έρευνας και η εκτίμηση της εφαρμοσιμότητας της ερευνητικής μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες.

6.2. Εισαγωγή

Η αξιολόγηση της έρευνας γίνεται ως εξής:

- i. Η μεθοδολογία συγκριτικής αξιολόγησης γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας (§4.3) αξιολογείται μέσω της διερεύνησης θεωρητικού σεναρίου εκτέλεσης χωματουργικών εργασιών με χρήση υδραυλικού εκσκαφέα. Η ανάλυση γίνεται με χρήση δύο δημοσιευμένων μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας: BML (1983) και Komatsu (2013).
- ii. Η μεθοδολογία για την μέτρηση και συγκριτική αξιολόγηση άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας (§4.4) αξιολογείται μέσω μελέτης περίπτωσης για την κατασκευή δαπέδων βαρέως τύπου από οπλισμένο σκυρόδεμα σε μεγάλο λιμενικό έργο υποδομής.
- iii. Το στοχαστικό μοντέλο παραγωγικότητας (§5.4), η ενσωμάτωση του συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα στην προσομοίωση (§5.5), καθώς και το πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης *CaissonSim* αξιολογούνται μέσω μελέτης περίπτωσης για την κατασκευή κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson) σε μεγάλο λιμενικό έργο υποδομής.

6.3. Μεθοδολογία συγκριτικής αξιολόγησης γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας

Η αξιολόγηση διενεργείται μέσω της θεωρητικής διερεύνησης ενός σεναρίου εκτέλεσης χωματουργικών εργασιών και συγκεκριμένα εκσκαφών με χρήση υδραυλικού εκσκαφέα. Η συγκριτική αξιολόγηση γίνεται με βάση τη μέθοδο BML (1983) και τη μέθοδο Komatsu (2013). Αυτή η επιλογή τεκμηριώνεται από τους παρακάτω λόγους:

- i. Οι γνωστές μέθοδοι εκτίμησης παραγωγικότητας αφορούν κυρίως σε χωματουργικές εργασίες.
- ii. Από το σύνολο των δραστηριοτήτων που σχετίζονται με χωματουργικές εργασίες, η εκσκαφή αποτελεί την εργασία που έχει μελετηθεί περισσότερο στη βιβλιογραφία, όπως εξεξηγήθηκε στο Κεφάλαιο 2.
- iii. Η επιλογή των δύο μεθόδων δεν είναι τυχαία. Η μέθοδος BML (1983) έχει εφαρμοστεί περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη στην Λειτουργική Ανάλυση, ενώ η μέθοδος Komatsu (2013) είναι αντιπροσωπευτική των μεθόδων εκτίμησης παραγωγικότητας κατασκευαστών μηχανικού εξοπλισμού. Πιο συγκεκριμένα, η Komatsu (2013) είναι η μέθοδος που καθορίζει τεχνικούς συντελεστές παραγωγικότητας, εύκολα παραμετροποιήσιμους για μέτρηση σε εργοταξιακές συνθήκες σε σχέση με άλλες παρόμοιες μεθόδους

(π.χ. Caterpillar, Liebherr) που περιορίζονται σε συντελεστές παραγωγικότητας (π.χ. ικανότητα χειριστή, διαθεσιμότητα μηχανήματος), οι τιμές των οποίων προέρχονται από εμπειρικούς πίνακες.

Η μέθοδος BML (1983) και η μέθοδος Komatsu (2013) καθορίζουν δύο συντελεστές παραγωγικότητας οι οποίοι παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της μεθόδου εργασίας (method statement): το βάθος εκσκαφής και τη γωνία στροφής του προβόλου του εκσκαφέα (§2.5.5). Η σημασία των δύο αυτών συντελεστών παραγωγικότητας έχει αναγνωριστεί στη βιβλιογραφία και σε σχετικές δημοσιευμένες μελέτες (Tam et al., 2002; Chao, 2001; Edwards and Holt, 2000). Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι στο στάδιο της μελέτης δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί με ακρίβεια η επίδραση των εξωτερικών συντελεστών παραγωγικότητας (π.χ. επιχειρηματικό περιβάλλον, καιρικές συνθήκες), αυτοί θα θεωρηθούν σταθεροί για τους σκοπούς της μελέτης.

6.3.1. Ποιοτική σύγκριση των εκτιμητικών μεθόδων και των συντελεστών παραγωγικότητας

Σε αυτό το σημείο η συγκριτική ανάλυση των δύο μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας θα γίνει με βάση τους συντελεστές παραγωγικότητας της §2.5.5 που εμπεριέχονται στις εξ. 6.1 και 6.2 παρακάτω:

$$Q_{eff,exc}^{BML} = 3600 \times n_{exc} \times \frac{V_{exc}^{BML}}{t_{th,exc}^{BML}} \times f_{swing}^{BML} \times f_{depth}^{BML} \times f_{dump}^{BML} \times f_{vol}^{BML} \times f_E^{BML}, \quad (\text{εξ. 6.1})$$

$$\mu \varepsilon V_{exc}^{BML} = V_{rated}^{CECE} \times f_s^{BML} \times f_{fill}^{BML}$$

$$Q_{eff,exc}^{KOM} = 3600 \times n_{exc} \times \frac{V_{exc}^{KOM}}{t_{th,exc}^{KOM} \times f_{depth}^{KOM}} \times f_E^{KOM}, \quad (\text{εξ. 6.2})$$

$$\mu \varepsilon V_{exc}^{KOM} = V_{rated}^{SAE} \times f_s^{KOM} \times f_{fill}^{KOM}$$

Η BML (1983) καθορίζει την ονομαστική χωρητικότητα του κάδου σύμφωνα με το πρότυπο CECE (1973) (V_{CECE} , γωνία απόθεσης 1:2), ενώ η Komatsu (2013) καθορίζει την αντίστοιχη χωρητικότητα με βάση το πρότυπο SAE (1993) (V_{SAE} , γωνία απόθεσης υλικού 1:1) (δες Πίνακα 2.4). Επίσης, η BML (1983) υπολογίζει τον θεωρητικό χρόνο κύκλου ($t_{th,exc}^{BML}$) σύμφωνα με την ονομαστική χωρητικότητα του κάδου του εκσκαφέα, τον τύπο και την εκσκαψιμότητα του εδάφους (δες Σχήμα 2.9). Η Komatsu (2013) διαφοροποιείται από την BML (1983) καθώς καθορίζει τον θεωρητικό χρόνο κύκλου του εκσκαφέα ($t_{th,exc}^{KOM}$) σε σχέση με την ισχύ του μηχανήματος (δες Σχήμα 2.11). Τέλος, τόσο οι BML (1983) όσο και η Komatsu (2013) παρέχουν ενδεικτικές τιμές για τον συντελεστή πλήρωσης του κάδου ανάλογα με τον τύπο του εδάφους (δες Πίνακα 2.5 και Πίνακα 2.6 για BML και Komatsu αντίστοιχα).

Οι τιμές των συντελεστών παραγωγικότητας f_{swing}^{BML} και f_{depth}^{BML} για την μέθοδο BML (1983) καθορίζονται από τα εμπειρικά διαγράμματα που απεικονίζονται στα Σχήματα 2.26 και 2.27 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.26, η BML (1983) δίνει μία γωνία στροφής που κυμαίνεται από 45° έως 180° και έχει ως αποτέλεσμα μία διαφοροποίηση στην παραγωγικότητα κατά $\pm 10\%$. Αντίθετα, το βάθος εκσκαφής επιδρά μόνο με αρνητικό

τρόπο στην παραγωγικότητα. Η μείωση της παραγωγικότητας μπορεί να φθάσει έως και 20% για εκσκαφές μεγάλου βάθους (δες Σχήμα 2.27). Για την Komatsu (2013) η γωνία στροφής λαμβάνεται υπόψη με έμμεσο τρόπο στον υπολογισμό του θεωρητικού χρόνου κύκλου του εκσκαφέα για τρεις κατηγορίες γωνίας στροφής (45°, 90° και 180°). Το βάθος εκσκαφής εμπεριέχεται στον υπολογισμό του συντελεστή παραγωγικότητας f_{depth}^{KOM} , που υποδηλώνει την διαφοροποίηση του χρόνου κύκλου εξαιτίας της μεθόδου απόθεσης του υλικού, καθώς και του πηλίκου του βάθους εκσκαφής, όπως καθορίζεται στην τεχνική περιγραφή της εργασίας, προς το μέγιστο βάθος εκσκαφής που εξαρτάται από τις δυνατότητες του κάθε μηχανήματος (Πίνακας 2.20).

6.3.2. Παράδειγμα εφαρμογής για χωματοургικές εργασίες

Η προτεινόμενη μεθοδολογία θα εφαρμοστεί για μία θεωρητική εργασία εκσκαφής και μεταφοράς 10.000m³ χαλαρού υλικού ($f_s = 1,00$). Σύμφωνα με τον προγραμματισμό των εργασιών, ένας εκσκαφέας KOMATSU PC350-LC8 ($V_{SAE} = 2,32m^3$) χρησιμοποιείται για την εκσκαφή αμμώδους υλικού (ειδικό βάρος 1660kg/m³, θεωρούμενος συντελεστής πλήρωσης $f_{fill} = 1,00$) σε μέγιστο βάθος εκσκαφής 8,00m. Ο εκσκαφέας είναι καινούριος και τον χειρίζεται έμπειρος χειριστής. Ο στόλος των φορτηγών οχημάτων αποτελείται από οχήματα ίδιου τύπου και η μέση ωριαία παραγωγικότητα του στόλου είναι 75,00 m³/h ανά φορτηγό. Το ωριαίο συνολικό κόστος για τον εκσκαφέα υπολογίζεται στα 75,00 €/h και για τα φορτηγά οχήματα στα 40,00 €/h. Σκοπός είναι να προσδιοριστεί η επίδραση της γωνίας στροφής και του βάθους εκσκαφής στην παραγωγικότητα του συστήματος, στον απαιτούμενο στόλο των φορτηγών οχημάτων, καθώς και στο μοναδιαίο κόστος της εργασίας, δηλ. το πηλίκο του συνολικού ωριαίου κόστους του εξοπλισμού προς την ωριαία παραγωγικότητα. Υποτίθεται ότι η εργασία εκτελείται για πρώτη φορά από το συγκεκριμένο συνεργείο, συνεπώς δεν υπάρχουν ιστορικά δεδομένα. Οι δύο μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους θα αναλυθούν εφαρμόζοντας την ντετερμινιστική προσέγγιση. Η εφαρμογή των τριών φάσεων που περιγράφηκαν στην ενότητα §4.3 δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Φάση 1 – Μαθηματική μοντελοποίηση και κανονικοποίηση των μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας

Η εξ. 4.1 που αντιστοιχεί στη διατύπωση του παραγοντικού μοντέλου δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού μετασχηματίζεται ως εξής (εξ. 6.3):

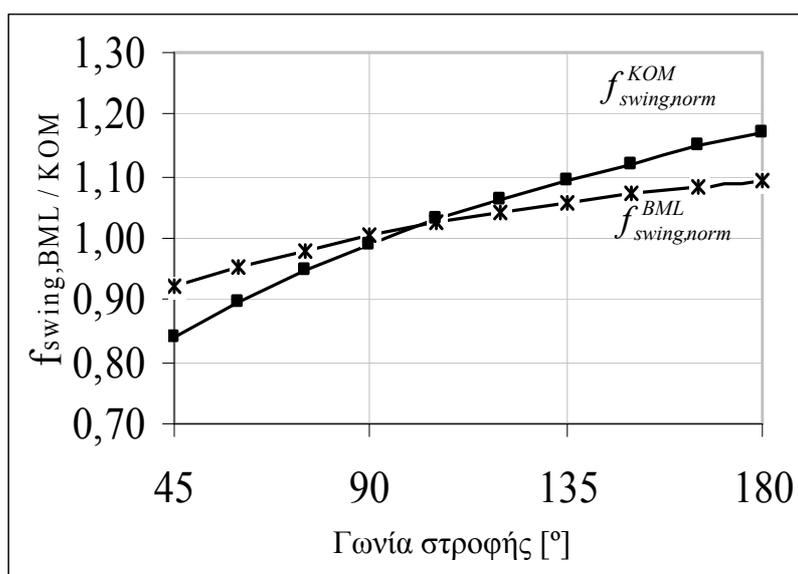
$$Q_{exc} = 3600 \times n_{exc} \times \frac{V_{exc} \times f_{fill} \times f_s}{t_{th,exc} \times \prod_{x=1}^i f_{norm}} \quad (\text{εξ. 6.3})$$

Η φύση των εργασιών εμπεριέχεται στην τεχνική περιγραφή του έργου. Καταρχήν, θα εφαρμοστούν δύο μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας ($n_e = 2$). Οι συντελεστές παραγωγικότητας που θα εξεταστούν είναι η γωνία στροφής και το βάθος εκσκαφής ($n = n_{norm} = 2$). Για κάθε έναν κανονικοποιημένο διορθωτικό πολλαπλασιαστή, που αντιστοιχεί στους συντελεστές παραγωγικότητας, καθορίζεται ένα πεδίο τιμών. Η κανονικοποίηση της μεθόδου BML (1983) είναι αρκετά απλή καθώς οι κανονικοποιημένοι ισοδύναμοι συντελεστές των δύο συντελεστών παραγωγικότητας (f_{swing} , f_{depth}), ισούνται με το αντίστροφό τους, δηλ.

$f_{swing,norm}^{BML} = 1/ f_{swing}^{BML}$ και $f_{depth,norm}^{BML} = 1/ f_{depth}^{BML}$ (Σχήμα 6.1 και 6.2). Για την Komatsu (2013) ο κανονικοποιημένος συντελεστής βάθους εκσκαφής ($f_{depth,norm}^{KOM}$) ταυτίζεται με τον συντελεστή βάθους εκσκαφής (f_{depth}^{KOM}) για κάθε κατηγορία συνθηκών απόθεσης, όπως ορίστηκε στην παράγραφο §2.5.5, καθώς ο συντελεστής f_{depth}^{KOM} διορθώνει απευθείας τον χρόνο κύκλου (εξ. 6.2) και γι' αυτό τον λόγο δεν χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία. Η κανονικοποίηση του συντελεστή γωνίας στροφής είναι πιο πολύπλοκη, καθώς η γωνία στροφής εμπεριέχεται στους θεωρητικούς χρόνους κύκλου που δίνουν οι εμπειρικοί πίνακες της Komatsu. Συνεπώς, ο συντελεστής γωνίας στροφής καθορίζεται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εκφράζει την βαθμιαία μεταβολή του μεταξύ των ακραίων τιμών του χρόνου κύκλου. Για παράδειγμα, για τον εκσκαφέα PC350-LC8 ο θεωρητικός χρόνος κύκλου υποτίθεται ότι είναι 18s για γωνία στροφής 90°. Η βαθμιαία μεταβολή από τον ελάχιστο χρόνο κύκλου (15s) στον μέγιστο χρόνο κύκλου (21s) μοντελοποιείται μέσα από τον κανονικοποιημένο συντελεστή γωνίας στροφής ($f_{swing,norm}^{KOM}$), όπου $\min f_{swing,norm}^{KOM} = 15/18 = 0,83$ και $\max f_{swing,norm}^{KOM} = 21/18 = 1,17$ είναι οι αντίστοιχες ακραίες τιμές, όπως απεικονίζονται στο Σχήμα 6.1. Η παραγωγικότητα εκτιμάται με εφαρμογή της εξ. 6.4, όπου οι αντίστοιχοι συντελεστές αντικαθιστούνται για κάθε μέθοδο.

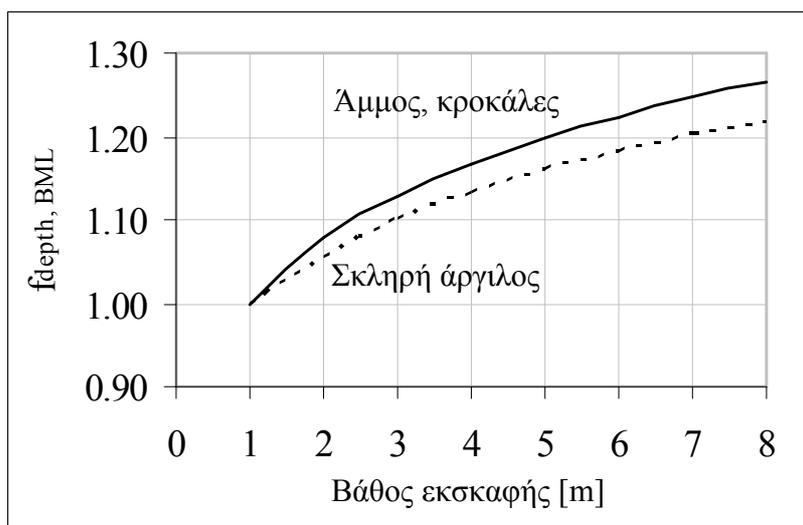
Φάση 2 – Καθορισμός των συνθηκών βάσης αναφοράς

Οι συνθήκες βάσης αναφοράς των συντελεστών παραγωγικότητας που λαμβάνονται υπόψη ορίζονται ως οι τιμές της γωνίας στροφής και του βάθους εκσκαφής για τις οποίες ισχύει γενικά ότι $f_{swing} = f_{depth} = 1,00$. Πρακτικά, αυτό μεταφράζεται σε γωνία στροφής 90° και για τις δύο μεθόδους, καθώς και βάθος εκσκαφής 1,00m για την BML (1983) ή στην περιοχή του 40-75% του μέγιστου βάθους εκσκαφής υπό κανονικές συνθήκες εργασίας (Πίνακας 2.20) για την Komatsu (2013).



Σχήμα 6.1: Κανονικοποιημένοι συντελεστές γωνίας στροφής για την BML ($f_{swing,norm}^{BML}$)

και την Komatsu ($f_{swing,norm}^{KOM}$)



Σχήμα 6.2: Κανονικοποιημένος συντελεστής βάθους εκσκαφής για την BML ($f_{depth, norm}^{BML}$)

$$Q_{eff}^{exc} = 3600 \times n_{exc} \times \frac{V_{exc} \times f_{fill} \times f_s}{t_{th,exc} \times \prod_{x=1}^n f_{norm}} \Rightarrow \begin{cases} Q_{eff,BML}^{exc} = 3600 \times n_{exc} \times \frac{V_{CECE} \times f_{fill} \times f_s}{t_{th,exc}^{BML} \times f_{depth}^{BML} \times f_{swing}^{BML}} \\ Q_{eff,KOM}^{exc} = 3600 \times n_{exc} \times \frac{V_{SAE} \times f_{fill} \times f_s}{t_{th,exc}^{KOM} \times f_{depth}^{KOM} \times f_{swing}^{KOM}} \end{cases} \quad (\text{εξ. 6.4})$$

Οι συντελεστές γωνίας στροφής και βάθους εκσκαφής είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές του συστήματος ($n_{iv} = 2$), ενώ οι τιμές βάσης αναφοράς έχουν καθοριστεί στην προηγούμενη ενότητα. Οι θεωρητικές τιμές των κανονικοποιημένων συντελεστών είναι διαθέσιμες από τα Σχήματα 6.1 και 6.2. Οι υπόλοιποι συντελεστές παραγωγικότητας των εξ. 6.1 και 6.2 είναι παράμετροι του συστήματος, συνεπώς θεωρείται ότι βρίσκονται σε συνθήκες βάσης αναφοράς. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι στο πλαίσιο της ανάλυσης οι συνθήκες εργασίας είναι ιδανικές χωρίς καθυστερήσεις ($f_E = 1,00$), ενώ οι συντελεστές εκκένωσης του κάδου (f_{dump}) και συναρμογής των όγκων εκσκαφέα – μεταφορικού οχήματος (f_{vol}) είναι σταθεροί και θεωρούνται ίσοι με την μονάδα.

Φάση 3 – Ανάλυση ευαισθησίας και συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

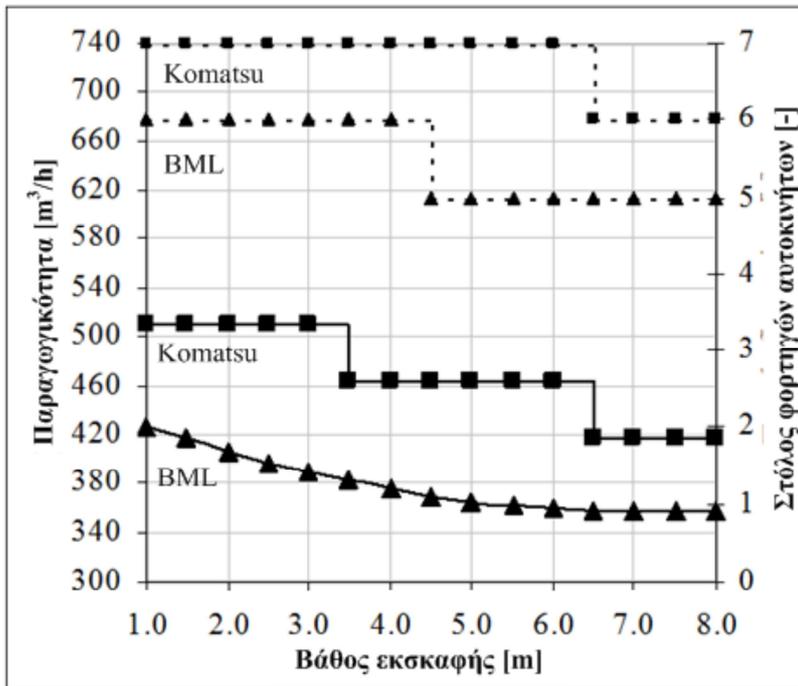
Το γεγονός ότι, στην κανονικοποιημένη τους μορφή, οι δύο μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας χρησιμοποιούν τον ίδιο τύπο και αριθμό συντελεστών παραγωγικότητας (f_{swing} , f_{depth}), ενώ παράλληλα οι μη κοινοί συντελεστές έχουν τεθεί σε συνθήκες βάσης αναφοράς (άρα, αγνοούνται στην ανάλυση), επιτρέπει την απευθείας σύγκρισή τους σύμφωνα με την §4.3. Η παραγωγικότητα του συστήματος και το μοναδιαίο κόστος υπολογίζονται σε σχέση με το βάθος εκσκαφής (δες Σχήματα 6.3 και 6.4) και τη γωνία στροφής (δες Σχήματα 6.5 και 6.6). Το μέγεθος του στόλου των φορτηγών οχημάτων που απαιτείται για να διατηρείται το απαιτούμενο επίπεδο ωριαίας παραγωγικότητας που καθιστά κρίσιμο τον εκσκαφέα απεικονίζεται από τη διακεκομμένη γραμμή στα αντίστοιχα διαγράμματα.

Η διαφοροποίηση της παραγωγικότητας εξαιτίας μόνο του αυξανόμενου βάθους εκσκαφής υπολογίζεται όταν η γωνία στροφής είναι σε κατάσταση «βάσης αναφοράς» (δηλ. γωνία στροφής 90° που σημαίνει ότι $f_{swing, norm}^{BML} = f_{swing, norm}^{KOM} = 1,00$). Τα αποτελέσματα της μεθόδου BML (1983) βαίνουν ασυμπτωτικά με τον άξονα «χ» (ο ρυθμός της απομείωσης μικραίνει συνεχώς) και κυμαίνονται στο επίπεδο των $\pm 70 \text{ m}^3/\text{h}$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3. Η Komatsu (2013) διαφοροποιείται σε τρία στάδια, σύμφωνα με τις κατηγορίες του βάθους εκσκαφής που εμπεριέχονται στην πρώτη στήλη του Πίνακα 2.9 (<40%, 40-75% και >75% ή <3,2m, 3,2m-6,0m, >6,0m αντίστοιχα) και μεταβάλλεται στα επίπεδα των $\pm 90 \text{ m}^3/\text{h}$, παρουσιάζοντας με αυτόν τον τρόπο ελαφρώς μεγαλύτερη ευαισθησία από την BML (1983). Ο εκτιμώμενος στόλος των φορτηγών οχημάτων διαφοροποιείται σε ένα σημείο για την κάθε μεθοδολογία. Η BML (1983) εκτιμά ότι απαιτούνται 6 φορτηγά οχήματα μέχρι το βάθος εκσκαφής των 4,50m και 5 φορτηγά οχήματα για μεγαλύτερα βάθη σε σύγκριση με τα 7 φορτηγά οχήματα για τα πρώτα 6,50m και 6 φορτηγά οχήματα για τα υπόλοιπα βάθη εκσκαφής που υπολογίζονται από την Komatsu (2013). Στο Σχήμα 6.4 φαίνεται το εύρος του μοναδιαίου κόστους των εργασιών, όπου παρατηρείται σύγκλιση στα αποτελέσματα των δύο μεθοδολογιών για βάθη εκσκαφής μεγαλύτερα των 4m.

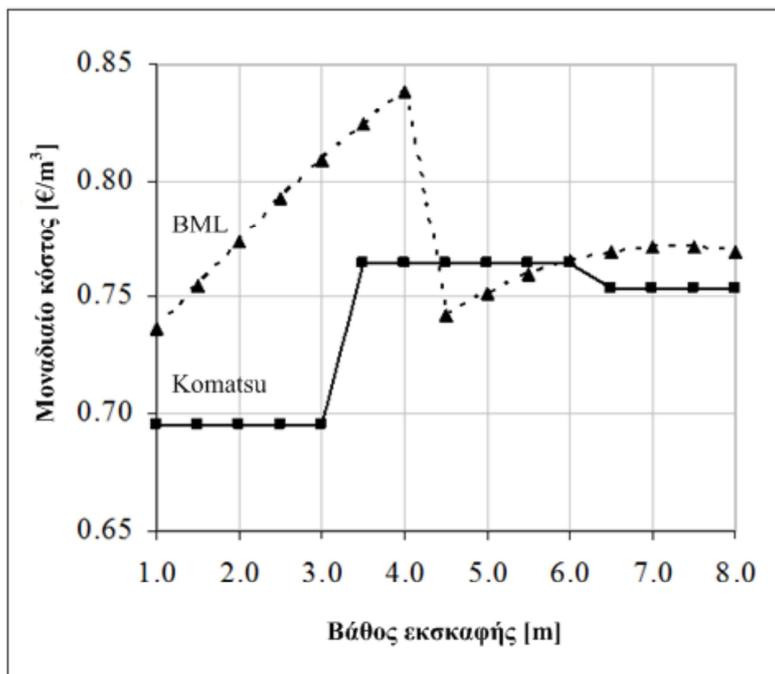
Στην περίπτωση της γωνίας στροφής, η παραγωγικότητα εκτιμάται για βάθος εκσκαφής 5m, που αντιπροσωπεύει την κατάσταση «βάσης αναφοράς» για την Komatsu (2013) ($f_{depth, norm}^{KOM} = 1,00$), αλλά όχι για την BML (1983) ($f_{depth, norm}^{BML} = 0,86$). Συνεπώς, η σύγκριση των δύο μεθόδων είναι στατιστικά έγκυρη, αλλά σε περίπτωση που έπρεπε να γίνουν πραγματικές μετρήσεις της γωνίας στροφής, μόνο ο διορθωτικός πολλαπλασιαστής f_{swing}^{KOM} θα μπορούσε να μετρηθεί σε αυτό το βάθος εκσκαφής, αφού ο συντελεστής f_{swing}^{BML} θα πρέπει να μετρηθεί σε βάθος εκσκαφής 1,00m. Οι εκτιμήσεις της BML (1983) και της Komatsu (2013) κυμαίνονται στα επίπεδα των $\pm 80 \text{ m}^3/\text{h}$ και $\pm 200 \text{ m}^3/\text{h}$ αντίστοιχα (Σχήμα 6.5). Όπως και πριν, η μέθοδος της Komatsu (2013) εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία από την BML (1983). Η BML (1983) εκτιμά τον απαιτούμενο στόλο φορτηγών οχημάτων στα 6 οχήματα για γωνίες στροφής μικρότερες των 90° και στα 5 οχήματα για μεγαλύτερες τιμές της γωνίας στροφής. Η Komatsu (2013) εκτιμά πως απαιτούνται 8 φορτηγά οχήματα για γωνία στροφής μικρότερη των 75°, 7 φορτηγά οχήματα για γωνία στροφής από 75° έως 105° και 6 φορτηγά οχήματα για γωνία στροφής μεγαλύτερη των 105°. Στο Σχήμα 6.6 φαίνεται το μοναδιαίο κόστος των εργασιών, όπου οι δύο μέθοδοι παράγουν σχεδόν ταυτόσημα αποτελέσματα για γωνία στροφής 90° και 165°.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να σημειωθεί πως μία πιο ρεαλιστική μελέτη της δραστηριότητας εκσκαφής θα απαιτούσε τον καθορισμό μίας σταθερής τιμής του διορθωτικού πολλαπλασιαστή $f_E < 1,00$, έτσι ώστε να ενσωματωθεί στην ανάλυση το γεγονός πως ο εκσκαφέας δεν μπορεί να λειτουργεί με απόδοση 100% στην πράξη. Αντίστοιχα, ανάλογες διορθώσεις θα μπορούσαν να γίνουν για τον συντελεστή εκκένωσης του κάδου ($f_{dump} \approx 0,90$) και συναρμογής των όγκων εκσκαφέα – μεταφορικού οχήματος ($f_{vol} \approx 0,95$). Σε αυτή την

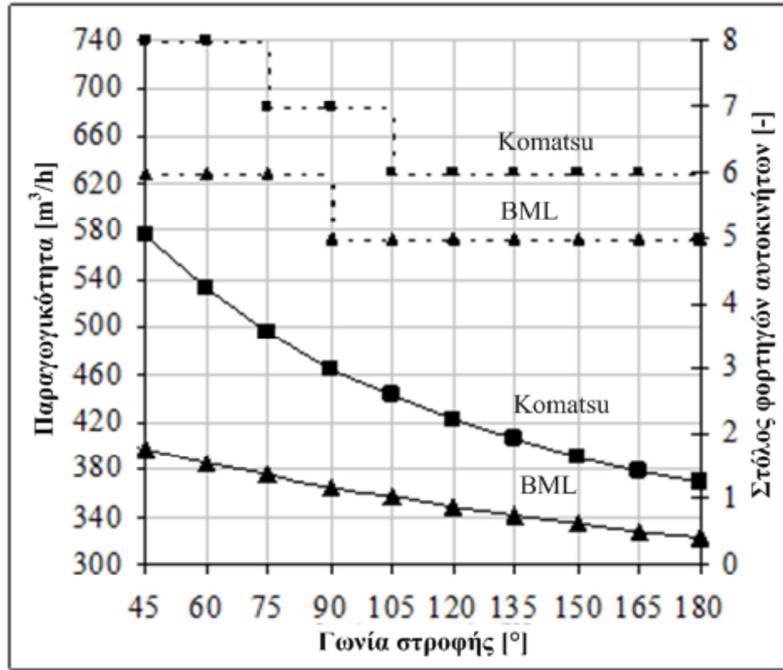
περίπτωση, τα αποτελέσματα της εκτίμησης της παραγωγικότητας θα μειώνονταν με αντίστοιχες μεταβολές στο μοναδιαίο κόστος και τον απαιτούμενο στόλο των φορτηγών οχημάτων. Σε κάθε περίπτωση, εάν χρησιμοποιούνται κοινές και σταθερές τιμές για τις παραμέτρους του συστήματος (f_E, f_{dump}, f_{vol}) τότε η στατιστική εγκυρότητα της συγκριτικής αξιολόγησης των μεθόδων δεν επηρεάζεται.



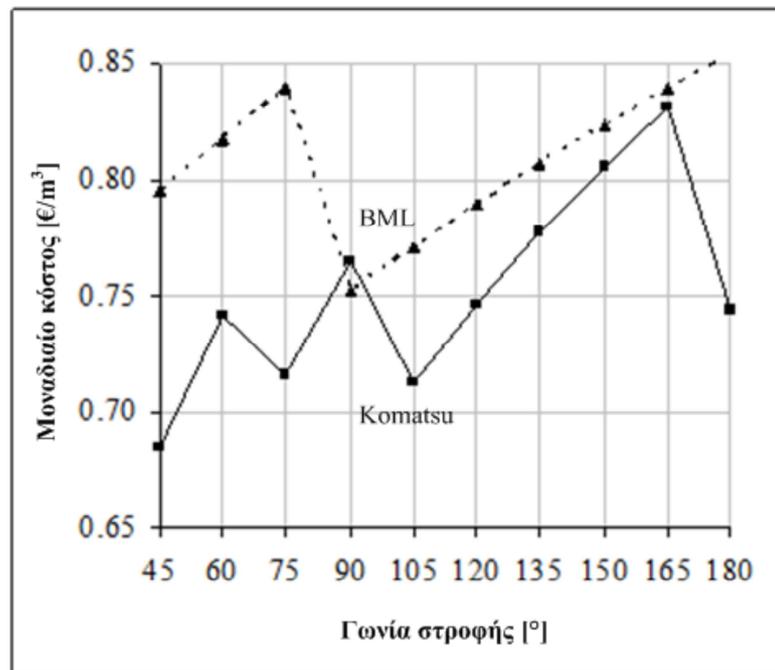
Σχήμα 6.3: Παραγωγικότητα ως προς το βάθος εκσκαφής για γωνία στροφής 90°



Σχήμα 6.4: Μοναδιαίο κόστος ως προς το βάθος εκσκαφής για γωνία στροφής 90°



Σχήμα 6.5: Παραγωγικότητα ως προς την γωνία στροφής για βάθος εκσκαφής 5m



Σχήμα 6.6: Μοναδιαίο κόστος ως προς την γωνία στροφής για βάθος εκσκαφής 5m

Η έννοια των «συνθηκών βάσης αναφοράς» μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν οι πραγματικές τιμές των διορθωτικών πολλαπλασιαστών των συντελεστών παραγωγικότητας, έτσι ώστε να αντικατοπτρίζονται οι συνθήκες εργασίας και να επικυρωθούν τα αποτελέσματα της ανάλυσης. Η μέτρηση των συντελεστών

παραγωγικότητας θα πρέπει να ικανοποιεί τις συνθήκες «βάσης αναφοράς» για λόγους στατιστικής επικύρωσης. Η μέτρηση του συντελεστή βάθους εκσκαφής (f_{depth}) γίνεται με την προϋπόθεση ότι η γωνία στροφής είναι σταθερή στις 90° ($f_{swing} = 1,00$), καθώς το Σχήμα 6.1 δείχνει πως οι δύο μέθοδοι ταυτίζονται στον καθορισμό της κατάστασης «βάσης αναφοράς» για τον συντελεστή γωνίας στροφής. Από την άλλη, οι συνθήκες «βάσης αναφοράς» για το βάθος εκσκαφής διαφέρουν για τις δύο μεθόδους (Σχήμα 6.2). Συνεπώς, η μέτρηση του συντελεστή f_{swing}^{BML} θα πρέπει να γίνει σε βάθος εκσκαφής 1,00m, ενώ το αντίστοιχο πειραματικό πλαίσιο για τη μέτρηση του συντελεστή f_{swing}^{KOM} καθορίζει ότι οι σχετικές μετρήσεις θα πρέπει να γίνουν σε βάθος που κυμαίνεται στο 40-75% του μέγιστου βάθους εκσκαφής, δηλ. 3,20-6,00m κάτω από κανονικές συνθήκες απόθεσης υλικού. Περισσότερα για την στατιστικά έγκυρη μέτρηση των συντελεστών παραγωγικότητας αναφέρονται στην ενότητα §6.4.

6.3.3. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα καθώς και η ερμηνεία των ερευνητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα §6.3.2 συνοψίζονται παρακάτω:

1. Σε αυτή την ενότητα περιγράφηκε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο που επιτρέπει τον μετασχηματισμό ενός σεναρίου εκτέλεσης μίας κατασκευαστικής δραστηριότητας σε ισοδύναμα και συγκρίσιμα μαθηματικά μοντέλα διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας.
2. Η εισαγωγή της έννοιας των «συνθηκών βάσης αναφοράς» επιτρέπει την κοινή μαθηματική μοντελοποίηση όλων των συντελεστών παραγωγικότητας που περιλαμβάνονται στη μελέτη.
3. Το μεθοδολογικό πλαίσιο επιτρέπει την συγκριτική αξιολόγηση εκτιμητικών μεθόδων παραγωγικότητας ανεξάρτητα από το πλήθος και τον τύπο των συντελεστών παραγωγικότητας που υπεισέρχονται στην ανάλυση.
4. Η εγκυρότητα της ανάλυσης δεν επηρεάζεται από τον τρόπο καθορισμού των συντελεστών παραγωγικότητας για κάθε εκτιμητική μέθοδο. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός πως ο συντελεστής γωνίας στροφής, ως φυσικό μέγεθος, ταυτίζεται για τις δύο μεθόδους (BML, Komatsu), κάτι το οποίο, όμως, δεν ισχύει για τον συντελεστή βάθους εκσκαφής. Η κανονικοποίηση, όμως, και των δύο συντελεστών επέτρεψε την στατιστικά έγκυρη συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους.
5. Η ανάλυση περιορίστηκε στην εξέταση χωματοουργικών δραστηριοτήτων. Η εξ. 6.3, όμως, υποδηλώνει ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία θα μπορούσε εύκολα να εφαρμοστεί και σε άλλες δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού με μηχανήματα κυκλικής λειτουργίας, όπως αναφέρθηκε αναλυτικά στην §2.5.5.
6. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι η Komatsu (2013) υπερεκτιμά συστηματικά την παραγωγικότητα του εκσκαφέα τόσο ως προς το βάθος εκσκαφής, όσο και ως προς τη γωνία στροφής σε σχέση με την BML (1983). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η μέθοδος Komatsu (2013) αφορά σε κατασκευαστή μηχανημάτων έργου, ενώ η μέθοδος BML (1983) έχει προκύψει από την επιστημονική μελέτη θεσμικών οργανισμών της κατασκευαστικής βιομηχανίας της Γερμανίας, φαίνεται ότι

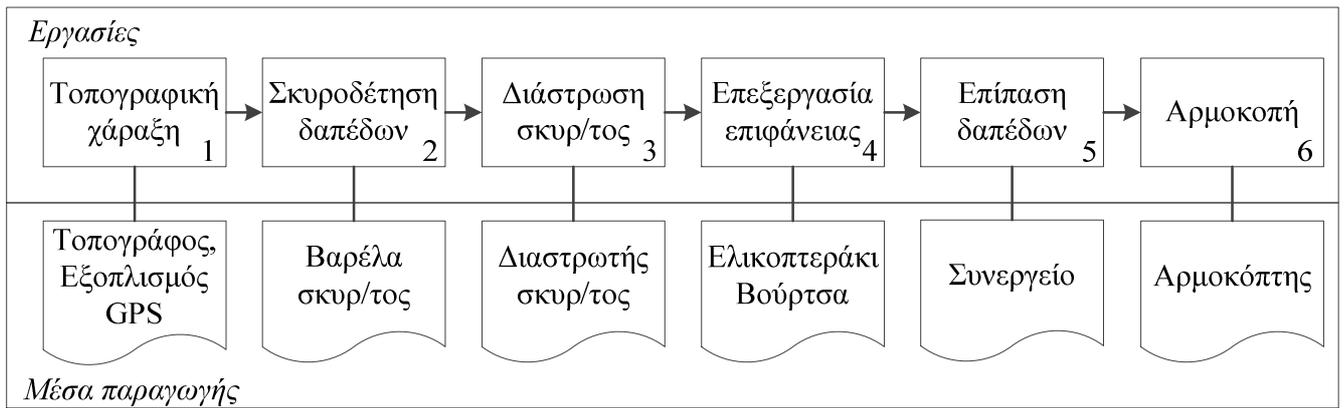
επιβεβαιώνεται ο ισχυρισμός πως οι εκτιμητικές μέθοδοι παραγωγικότητας των κατασκευαστών μηχανημάτων έργου αποτελούν περισσότερο εργαλεία προώθησης των προϊόντων τους, παρά στατιστικά επικυρώσιμες επιστημονικές προσεγγίσεις (Lambropoulos et al., 1996).

6.4. Μεθοδολογία μέτρησης και συγκριτικής αξιολόγησης άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας

Η αξιολόγηση της μεθοδολογίας που περιγράφηκε στην ενότητα §4.4 (Σχήμα 4.2) περιλαμβάνει (i) την στατιστικά έγκυρη μέτρηση των συντελεστών παραγωγικότητας επί τόπου του έργου, (ii) την διατύπωση νέων μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας σε μορφή εμπειρικών εξισώσεων που απεικονίζουν την ευαισθησία των μετρηθέντων συντελεστών παραγωγικότητας, (iii) την συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης και της ανάλυσης με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, καθώς και (iv) την εκτίμηση της παραγωγικότητας κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου από οπλισμένο σκυρόδεμα σε σχέση με συγκεκριμένους συντελεστές παραγωγικότητας.

6.4.1. Μελέτη περίπτωσης για δραστηριότητες κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου

Η διερεύνηση και αξιολόγηση της μεθοδολογίας μέτρησης και συγκριτικής αξιολόγησης άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας θα γίνει μέσα από μία μελέτη περίπτωσης για την κατασκευή δαπέδων βαρέως τύπου από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η κατασκευή δαπέδων βαρέως τύπου είναι μία διαδικασία η οποία απαιτεί τον συνδυασμό διαφορετικών μέσων παραγωγής, δηλ. ανθρώπινου δυναμικού και μηχανημάτων έργου. Σε αυτό το πλαίσιο, η σχέση των συντελεστών παραγωγικότητας που επηρεάζουν την δραστηριότητα παρουσιάζει ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς τα δημοσιευμένα στοιχεία παραγωγικότητας είναι περιορισμένα και βασίζονται κυρίως σε έργα οδοποιίας (Yiang and Wu, 2007). Ενδεικτικά, η σχετική βιβλιογραφία περιορίζεται στη μελέτη δραστηριοτήτων ασφαλτόστρωσης (Miller et al., 2011), μέσα στο οικιστικό περιβάλλον (Lee et al., 2000), που επηρεάζεται από τη ρύθμιση της κυκλοφορίας και τον αριθμό των μέσων παραγωγής που χρησιμοποιούνται (Hassan and Gruber, 2008). Σε αυτήν την ενότητα θα εξεταστεί η παραγωγικότητα δραστηριοτήτων σκυροδέτησης δαπέδων βαρέως τύπου λαμβάνοντας υπόψη το πλάτος και το μήκος εργασίας. Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης η κατασκευή δαπέδων αφορά στη διάστρωση σκυροδέματος για την διαμόρφωση επιφανειών μεγάλου εμβαδού επάνω στις οποίες θα κινηθούν βαρέως τύπου οχήματα για μεγάλο λιμενικό έργο υποδομής (Knutson et al., 2008). Οι επιμέρους εργασίες που θα πρέπει να εκτελεστούν για να ολοκληρωθεί η δραστηριότητα της κατασκευής μίας δεδομένης επιφάνειας δαπέδων απεικονίζονται στο Σχήμα 6.7, ενώ ακολουθεί και η αντίστοιχη επεξήγηση για τα μέσα παραγωγής που είναι απαραίτητα σε κάθε φάση. Αρχικά, γίνεται τοπογραφική χάραξη της περιοχής που θα σκυροδετηθεί, έτσι ώστε να κατασκευαστούν και να τοποθετηθούν οι περιμετρικοί μεταλλότυποι (Σχήμα 6.8). Στη συνέχεια, διαστρώνεται έτοιμο σκυρόδεμα κατευθείαν από τα αυτοκινούμενα φορτηγά οχήματα (βαρέλες). Η τελευταία εργασία είναι η αρμοκοπή (αρμοί διαστολής / συστολής) μετά την αρχική σκλήρυνση του σκυροδέματος σε δεδομένο κάναβο.



Σχήμα 6.7: Εργασίες και μέσα παραγωγής κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου



(α) Τοπογραφική χάραξη /
μεταλλότυποι



(β) Διάστρωση σκυροδέματος
C30/37



(γ) Χρήση ειδικών μηχανημάτων
laser screed και γεωδαιτικό
σύστημα (GPS)



(δ) Επεξεργασία επιφάνειας
δαπέδων με ελικοπτεράκι / βούρτσα



(ε) Επίπαση δαπέδου



(στ) Αρμολογή

Σχήμα 6.8: Διαδικασία κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου από σπλισμένο σκυρόδεμα

Γενικά, διακρίνονται τρεις τεχνικές για τη διάστρωση του σκυροδέματος: (α) διάστρωση με χειρονακτικά μέσα, (β) χρήση ειδικών μηχανημάτων καθοδηγούμενων με χρήση laser (laser screed) και γεωδαιτικό σύστημα (GPS) και (γ) χρήση ειδικών διαστρωτών σκυροδέματος (slipform pavers). Στη μελέτη περίπτωσης χρησιμοποιήθηκε ειδικό μηχάνημα (laser screed) με υδραυλική πήχυ για τη διάστρωση, τη δόνηση και τη διαμόρφωση των κλίσεων του δαπέδου. Το σκυρόδεμα οπλίζεται συμβατικά με πλέγμα στο κάτω μέρος και προσθετικά μπορεί να γίνει χρήση χαλύβδινων ινών (ινοπλισμένο σκυρόδεμα) για την επίτευξη μεγαλύτερης αντοχής. Αφού γίνει η διάστρωση του σκυροδέματος στο επιθυμητό πάχος χρησιμοποιούνται σβούρες δαπέδων ή «ελικοπτεράκια» (power trowel) και ειδική βούρτσα (float/texturing brush) για την τελική επεξεργασία του δαπέδου. Στην συνέχεια το δάπεδο προστατεύεται έναντι ξηράνσεως με την ρίψη ειδικού υλικού (επίταση) στην επιφάνειά του από εξειδικευμένο συνεργείο. Τα δεδομένα πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση συλλέχθηκαν μέσω μελέτης της δραστηριότητας κατασκευής δαπέδων σε λιμενικό έργο υποδομής (σταθμός εμπορευματοκιβωτίων – container terminal) για συνολική περίοδο οκτώ μηνών, σε δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους (2011 και 2013). Η συλλογή των δεδομένων έγινε με απευθείας παρατήρηση και συμπλήρωση του ημερήσιου δελτίου παραγωγικότητας (Σχήμα 3.2). Επικουρικά, συλλέχθηκε και οπτικοακουστικό υλικό (βιντεοσκόπηση, φωτογραφίες στοπ-καρέ – time lapse). Επίσης, δευτερεύουσες πηγές δεδομένων αποτέλεσαν οι συνεντεύξεις με στελέχη του έργου (διευθυντής, εργοταξίαρχης), καθώς και η μελέτη των συμβατικών τευχών και άλλων εγγράφων (σχέδια, επιμετρήσεις, εντολές πληρωμής, παρουσιολόγια εργατών) του έργου. Όλες οι μετρήσεις κατηγοριοποιήθηκαν σε σύνολα δεδομένων, ενώ κάθε μία από τις μετρούμενες μεταβλητές χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή της. Συνολικά, συλλέχθηκαν 46 στοιχεία δεδομένων, που αντιστοιχούν σε ισάριθμες εργατομέρες, όπου μετρήθηκε η παραγωγικότητα της σκυροδέτησης δαπέδων εκφρασμένη σε εργατώρες ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος (wh/m^3).

6.4.1.1. Καθορισμός των δραστηριοτήτων και συλλογή δεδομένων

Αν και οι μετρήσεις πεδίου αφορούν σε όλες τις υπο-εργασίες του Σχήματος 6.8, η ανάλυση θα περιοριστεί στη διάστρωση δαπέδων (s_1) για λόγους εποπτικότητας (Σχήμα 4.2). Οι συντελεστές παραγωγικότητας που μετρήθηκαν συνολικά και αποτέλεσαν το πιθανό υποσύνολο λειτουργικών μεταβλητών ήταν το πλάτος και το μήκος εργασίας, το πάχος του δαπέδου, ο τύπος του σκυροδέματος (συμβατικά οπλισμένο ή ινοπλισμένο σκυρόδεμα) και το μέγεθος του συνεργείου (δηλ. αριθμός εργατών). Διερευνώντας τη συσχέτιση αυτών των μεταβλητών ανά ζεύγη μέσω της εξέτασης του διαγράμματος διασποράς, καθώς και με βάση την τεχνική της οπίσθιας σταδιακής επιλογής (backward stepwise selection technique) και της βηματικής παλινδρόμησης (stepwise regression), αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν οι συντελεστές παραγωγικότητας του πλάτους και του μήκους εργασίας ως βασικές μεταβλητές της μελέτης. Κάθε μία από τις μεταβλητές χαρακτηρίζεται από την ελάχιστη και μέγιστη τιμή της. Το πλάτος εργασίας (w) έχει ελάχιστη τιμή 4m που υποδηλώνει το ελάχιστο πλάτος εργασίας του ειδικού μηχανήματος με χρήση laser. Το μέγιστο πλάτος είναι 33m. Το μήκος εργασίας (l) κυμαίνεται μεταξύ των 15m-210m και αντιπροσωπεύει το μήκος της λωρίδας που κατασκευάζεται από το

συνεργείο σε μία εργατοημέρα. Τα δεδομένα για κάθε μεταβλητή χωρίστηκαν σε ομάδες με βάση τις ιδιότητές τους, έτσι ώστε να διευκολυνθεί η επεξεργασία τους, όπως θα φανεί στις επόμενες παραγράφους.

6.4.1.2 Στατιστική ανάλυση

Αυτή η ενότητα περιγράφει τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης παραγωγικότητας. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι το πλάτος και το μήκος εργασίας, ενώ η εξαρτημένη μεταβλητή είναι η παραγωγικότητα. Τα δεδομένα πεδίου που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του στατιστικού μοντέλου φαίνονται στον Πίνακα 6.1 παρακάτω. Το πρώτο βήμα είναι ο έλεγχος των δεδομένων του μοντέλου για την εύρεση εκτόπων, καθώς και για την στατιστική εγκυρότητα των μετρήσεων. Η εύρεση εκτόπων βασίστηκε στη χρήση τριών στατιστικών δεικτών (Mahalanobis distance, jackknife distance, T^2 statistic) και κατέληξε στην αφαίρεση πέντε στοιχείων δεδομένων από το δείγμα. Μετά την επεξεργασία του δείγματος και αφού εξασφαλιστεί ότι όλα τα δεδομένα βρίσκονται μέσα στα όρια του Πίνακα 6.1, δημιουργείται το στατιστικό μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης, όπου το πλάτος και το μήκος είναι οι ανεξάρτητες μεταβλητές και η παραγωγικότητα είναι η εξαρτημένη μεταβλητή. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας προσαρμογής του μοντέλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.9. Τα πρώτα τρία γραφήματα ονομάζονται διαγράμματα μόχλευσης (leverage plots) και μετρούν την επίδραση μίας πειραματικής μονάδας στην προσαρμογή του μοντέλου της παλινδρόμησης. Η καταλληλότητα του μοντέλου φαίνεται από τη διασπορά των δεδομένων σε σχέση με τη ευθεία γραμμή του διαγράμματος. Δοθέντος ότι και στα τρία γραφήματα η καμπύλη εμπιστοσύνης 95% (confidence curve) τέμνει την οριζόντια γραμμή αναφοράς, η επίδραση θεωρείται ότι είναι στατιστικά σημαντική.

Ο πίνακας της προσαρμογής του μοντέλου (fit table) δείχνει ότι το μοντέλο έχει συντελεστή προσαρμογής R^2 ίσο με 0,68432, που υποδεικνύει τον βαθμό της διαφοροποίησης στην ερμηνεία της παραγωγικότητας, όταν χρησιμοποιηθούν το πλάτος και το μήκος εργασίας ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι τιμές του συντελεστή R^2 είναι $>0,60$ και υποδεικνύει ότι η συσχέτιση των δεδομένων είναι ισχυρή και αποδεκτή (Kutner et al., 2005). Ο πίνακας ανάλυσης της διακύμανσης (analysis of variance table) δείχνει ότι το πλάτος και το μήκος έχουν παρατηρηθείσα πιθανότητα σημαντικότητας (observed significance probability) ($Prob>F$) της τάξης $<0,0001$, που είναι στατιστικά σημαντική στο επίπεδο 0,05. Ο πίνακας εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου δείχνει τους εκτιμηθέντες συντελεστές παλινδρόμησης στο γραμμικό μοντέλο και ένα t-test για τον έλεγχο της υπόθεσης πως κάθε παράμετρος ισούται με μηδέν. Ο δείκτης $Prob>|t|$ είναι $<0,0001$ για το πλάτος και το μήκος εργασίας, καθώς και για τον συντελεστή παρεμβολής, που σημαίνει ότι $b_1 \neq 0$ και $b_2 \neq 0$ και $b_0 \neq 0$ σε επίπεδο σημαντικότητας 99%. Τελικά, προκύπτει το ακόλουθο μοντέλο παραγωγικότητας (εξ. 6.5):

$$Q_{eff} = 0,4900881 - 0,007678 \times [\text{Πλάτος}] - 0,001332 \times [\text{Μήκος}], [wh/m^3] \quad (\text{εξ. 6.5})$$

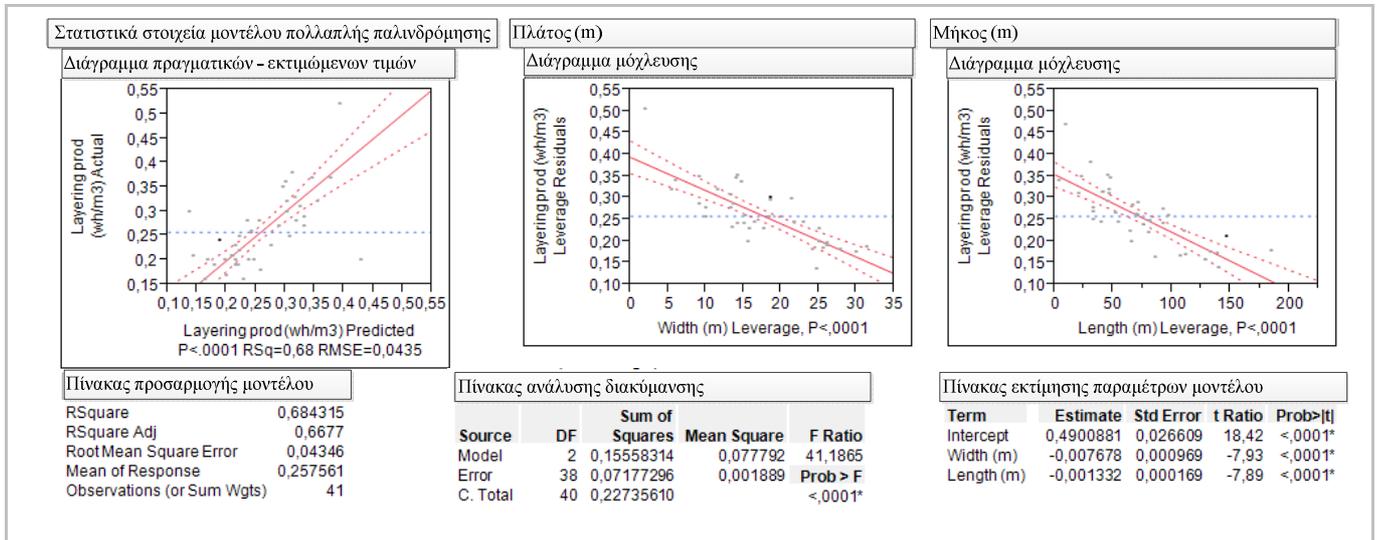
Το Σχήμα 6.10 δείχνει το διάγραμμα της παραγωγικότητας ως συνάρτηση του πλάτους και του μήκους, για διαφορετικές τιμές του πλάτους εργασίας, ενώ το αντίστοιχο διάγραμμα επικύρωσης (Σχήμα 6.11) δείχνει ότι το μοντέλο προσαρμόζεται στις πραγματικές τιμές της παραγωγικότητας με ικανοποιητικό τρόπο.

Πίνακας 6.1: Δεδομένα παραγωγικότητας για την εργασία της διάστρωσης σκυροδέματος

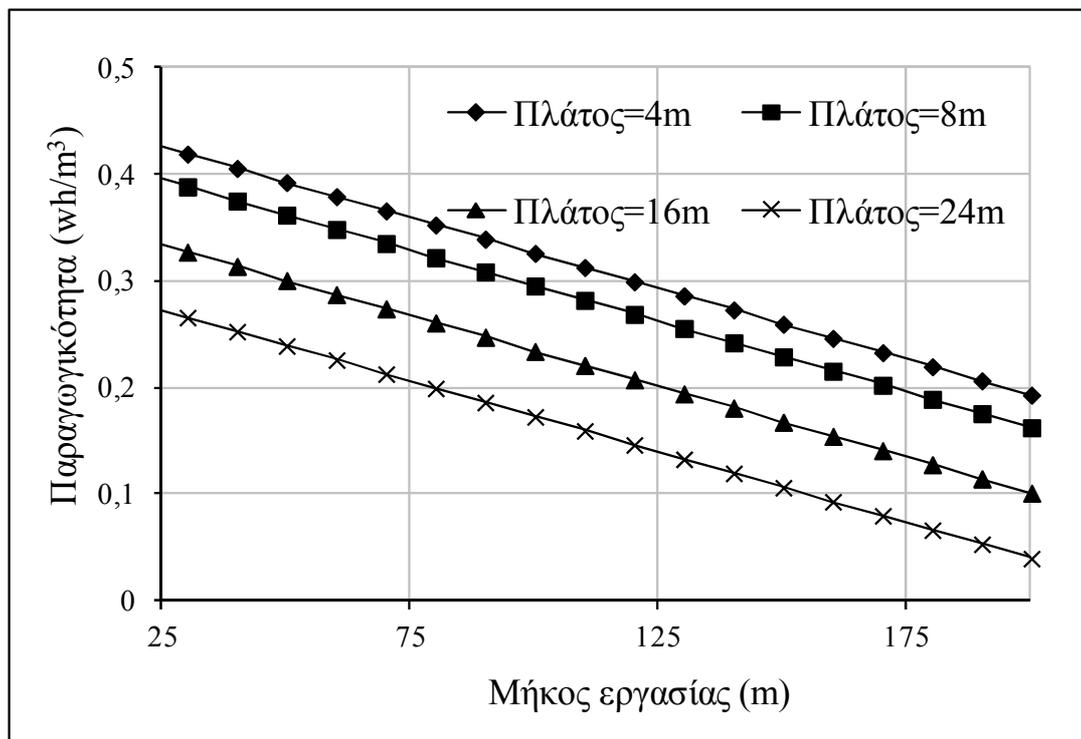
| Δεδομένα (DP) | Πλάτος (m) | Μήκος (m) | Μετρ. Παρ/τα (wh/m ³) | Δεδομένα (DP) | Πλάτος (m) | Μήκος (m) | Μετρ. Παρ/τα (wh/m ³) |
|------------------|---------------|--------------|---|------------------|---------------|--------------|---|
| 1 | 5,84 | 68,33 | 0,32 | 22 | 28,00 | 35,00 | 0,16 |
| 2 | 8,87 | 210,50 | 0,21 | 23 | 28,00 | 40,00 | 0,25 |
| 3 | 13,10 | 54,37 | 0,33 | 24 | 28,00 | 50,00 | 0,21 |
| 4 | 16,39 | 96,77 | 0,28 | 25 | 16,00 | 50,00 | 0,36 |
| 5 | 9,75 | 170,00 | 0,24 | 26 | 16,00 | 45,00 | 0,25 |
| 6 | 8,45 | 135,00 | 0,20 | 27 | 31,85 | 27,15 | 0,21 |
| 7 | 9,25 | 165,00 | 0,17 | 28 | 4,00 | 50,00 | 0,52 |
| 8 | 9,25 | 136,80 | 0,20 | 29 | 33,35 | 50,00 | 0,20 |
| 9 | 8,88 | 155,00 | 0,19 | 30 | 16,75 | 55,00 | 0,27 |
| 10 | 10,50 | 160,00 | 0,20 | 31 | 16,75 | 50,00 | 0,35 |
| 11 | 13,00 | 100,00 | 0,18 | 32 | 25,7 | 56,00 | 0,19 |
| 12 | 8,25 | 82,00 | 0,28 | 33 | 15,00 | 54,00 | 0,32 |
| 13 | 10,00 | 26,75 | 0,37 | 34 | 28,00 | 49,10 | 0,21 |
| 14 | 21,76 | 120,83 | 0,16 | 35 | 28,00 | 40,00 | 0,22 |
| 15 | 16,00 | 115,00 | 0,23 | 36 | 28,00 | 45,00 | 0,20 |
| 16 | 17,95 | 20,00 | 0,31 | 37 | 28,00 | 45,00 | 0,20 |
| 17 | 17,95 | 30,00 | 0,38 | 38 | 16,00 | 69,00 | 0,23 |
| 18 | 31,85 | 50,00 | 0,19 | 39 | 28,00 | 15,50 | 0,28 |
| 19 | 12,00 | 50,00 | 0,29 | 40 | 24,00 | 47,5 | 0,26 |
| 20 | 12,00 | 50,00 | 0,27 | 41 | 15,50 | 51,90 | 0,30 |
| 21 | 12,00 | 40,00 | 0,37 | | | | |

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, επί της αρχής, ο καθορισμός μίας ποσοτικής σχέσης για την εκτίμηση της παραγωγικότητας με ικανοποιητική στατιστική ακρίβεια απαιτεί την ενσωμάτωση ενός μεγάλου δείγματος μετρήσεων στην ανάλυση (AbouRizk et al., 2001; Thomas and Yiakoumis, 1987). Συνεπώς, το μοντέλο έχει πεπερασμένη ακρίβεια λόγω του μικρού δείγματος, όμως η φαινομενική εγκυρότητά του (face validity) ήταν ικανοποιητική, καθώς δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχέση με τις πραγματικές μετρήσεις πεδίου. Άλλωστε, ο

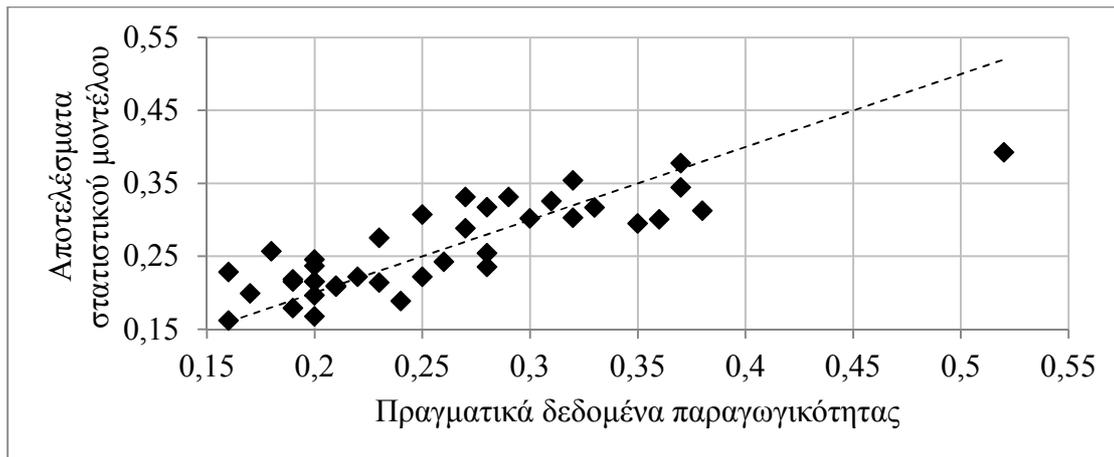
Βασικός ερευνητικός σκοπός δεν είναι απλώς η ανάπτυξη ενός στατιστικού μοντέλου, αλλά η χρήση του ως ένα εργαλείο για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογικής προσέγγισης με σκοπό την εκτίμηση των διορθωτικών πολλαπλασιαστών.



Σχήμα 6.9: Δεδομένα προσαρμογής στατιστικού μοντέλου παραγωγικότητας διάστρωσης σκυροδέματος



Σχήμα 6.10: Διάγραμμα εκτίμησης παραγωγικότητας διάστρωσης σκυροδέματος



Σχήμα 6.11: Διάγραμμα επικύρωσης στατιστικού μοντέλου

Μετά την επικύρωση του στατιστικού μοντέλου εκκινεί η φάση του προσδιορισμού των διορθωτικών πολλαπλασιαστών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Αρχικά θα υπολογιστεί ένας ενιαίος διορθωτικός πολλαπλασιαστής και για τους δύο συντελεστές παραγωγικότητας (πλάτος και μήκος εργασίας) και στη συνέχεια θα προσδιοριστεί ένας διορθωτικός πολλαπλασιαστής για κάθε μία μεταβλητή ξεχωριστά.

1. Προσδιορισμός ενιαίου διορθωτικού πολλαπλασιαστή

Ο πίνακας κατανομής δεδομένων για τις δύο βασικές μεταβλητές του πλάτους και του μήκους εργασίας φαίνεται παρακάτω (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.2: Πίνακας κατανομής δεδομένων για την παραγωγικότητα διάστρωσης σκυροδέματος

| Πλάτος [m] | Μήκος [m] | | |
|------------|---|--------------------------|-------------------------|
| | 0-50 | 51-100 | 101-215 |
| 0-10 | 16, 32 | 1, 15 | 3, 8, 9, 10, 11, 12, 13 |
| 11-20 | 20, 21, 23, 24, 25, 29, 30, 35 | 4, 7, 14, 34, 37, 42, 46 | 19 |
| 21-35 | 22, 26, 27, 28, 31, 33, 38, 39, 40, 41, 43, 45 | 36 | 18 |

Με βάση τον εμπειρικό κανόνα που εκφράστηκε με τις εξ. 4.6 και 4.7, το σενάριο των Συνθηκών Βάσης Αναφοράς (ΣΒΑ) αντιπροσωπεύεται από το κελί D_{3,1}. Σε αυτή την περίπτωση, το σενάριο ΣΒΑ προσδιορίζεται ως διάστρωση δαπέδων με πλάτος 21-35m και σε μήκος από 0-50m. Έτσι, ο Δείκτης Βάσης Αναφοράς (ΔΒΑ) για τη διάστρωση του σκυροδέματος καθορίζεται ως ο μέσος όρος των στοιχείων δεδομένων που περιέχονται σε αυτό το κελί, έχοντας ως αποτέλεσμα $BRM = 0,22wh/m^3$. Ο πίνακας \underline{F} για τον υπολογισμό των διορθωτικών πολλαπλασιαστών f_i και την εκτίμηση της αναμενόμενης παραγωγικότητας με βάση το στατιστικό μοντέλο της εξ. 6.5 διαμορφώνεται όπως παρακάτω (εξ. 6.6 και 6.7):

$$\underline{\underline{F}} = \begin{vmatrix} 1,78 & 1,55 & 0,95 \\ 1,47 & 1,32 & 0,97 \\ 1,00 & 1,02 & 0,74 \end{vmatrix} \quad (\text{εξ. 6.6})$$

$$Q_{eff} = Q_{th} \times \underline{\underline{F}} = 0,22 \times \underline{\underline{F}} = 0,22 \times \begin{vmatrix} 1,78 & 1,55 & 0,95 \\ 1,47 & 1,32 & 0,97 \\ 1,00 & 1,02 & 0,74 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,39 & 0,34 & 0,21 \\ 0,32 & 0,29 & 0,21 \\ 0,22 & 0,22 & 0,16 \end{vmatrix} \quad (\text{εξ. 6.7})$$

Δοθέντος ότι εξετάζονται δύο μεταβλητές, οι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές του πίνακα της εξ. 6.7 εκφράζουν την συνδυαστική επιρροή των δύο μεταβλητών στην παραγωγικότητα. Στην επόμενη παράγραφο εξετάζεται η μεμονωμένη επίδραση του πλάτους και του μήκους εργασίας στην παραγωγικότητα.

2. Προσδιορισμός μεμονωμένου διορθωτικού πολλαπλασιαστή

Η μεμονωμένη επίδραση του πλάτους εργασίας στην παραγωγικότητα εκφράζεται από όλους τους διορθωτικούς πολλαπλασιαστές f_x στην πρώτη στήλη του πίνακα $\underline{\underline{F}}$. Αντίστοιχα, η επιρροή του μήκους δίνεται από τους αντίστοιχους πολλαπλασιαστές της τρίτης σειράς του ίδιου πίνακα. Εάν υποτεθεί ότι ο σκοπός είναι ο προσδιορισμός της επιρροής κάθε μεταβλητής ξεχωριστά (πλάτος και μήκος εργασίας) στην παραγωγικότητα, τότε η εξ. 4.10 θα μετασχηματιστεί στην εξ. 6.8 όπως παρακάτω:

$$Q_{eff} = Q_{th} \times f_{length} \times f_{width} \quad (\text{εξ. 6.8})$$

όπου: $f_{length/width}$ = ο ξεχωριστός διορθωτικός πολλαπλασιαστής που εκφράζει την ποσοτική επιρροή του πλάτους και μήκους εργασίας για τον υπολογισμό της αναμενόμενης παραγωγικότητας, όταν είναι γνωστή η θεωρητική παραγωγικότητα.

Με άλλα λόγια, ο διορθωτικός πολλαπλασιαστής f_{length} εκφράζει την ευαισθησία της παραγωγικότητας σε μεταβολές μόνο του μήκους εργασίας, χωρίς να επηρεάζεται από οποιονδήποτε άλλο συντελεστή παραγωγικότητας. Δοθέντος ότι ο ενιαίος διορθωτικός πολλαπλασιαστής της εξ. 6.7 για τιμές πλάτους και μήκους εργασίας στο διάστημα 21-35m και 0m-50m, αντίστοιχα, ισούται με 1,00, αυτό σημαίνει ότι $f_{length} \times f_{width} = 1,00 \times 1,00 = 1,00$. Συνεπώς, θεωρείται ότι και οι δύο συντελεστές παραγωγικότητας βρίσκονται σε Συνθήκες Βάσης Αναφοράς για το συγκεκριμένο λειτουργικό σενάριο. Η στατιστικά έγκυρη διερεύνηση της επιρροής του μήκους στην παραγωγικότητα προϋποθέτει ότι $f_{width} = 1,00$, έτσι ώστε $Q_{eff} = Q_{th} \times f_{length} \times 1,00 = Q_{th} \times f_{length}$. Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής f_{length} θα πρέπει να εξεταστεί για τις τιμές που εμπεριέχονται στην τρίτη σειρά του πίνακα $\underline{\underline{F}}$. Έτσι, για τιμές πλάτους εργασίας που κυμαίνονται μεταξύ 21m-35m, η αναμενόμενη

παραγωγικότητα παρουσιάζει οριακή μεταβολή κατά ~1,82% και στη συνέχεια βελτιώνεται κατά ~28,57%, καθώς το μήκος εργασίας αυξάνεται από 0m-50m ($Q_{eff} = 0,22 \times 1,00 = 0,22wh/m^3$), σε 51m-100m ($Q_{eff} = 0,22 \times 1,02 = 0,224wh/m^3$) και τελικά 101m-215m ($Q_{eff} = 0,22 \times 0,74 = 0,16wh/m^3$), όπως φαίνεται και στην τελευταία σειρά του πίνακα εκτίμησης παραγωγικότητας (εξ. 6.7). Στην ίδια λογική, ο αντίστοιχος συντελεστής προσαρμογής για το πλάτος (f_{width}) θα πρέπει να εκτιμηθεί για μήκος εργασίας μικρότερο των 50m, έτσι ώστε $Q_{eff} = Q_{th} \times 1,00 \times f_{width} = Q_{th} \times f_{width}$. Συνεπώς, φαίνεται ότι η παραγωγικότητα μειώνεται κατά ~45,45% για πλάτος εργασίας που κυμαίνεται στο διάστημα 11m-20m ($Q_{eff} = 0,22 \times 1,47 = 0,32wh/m^3$), ενώ παρατηρείται μία περαιτέρω μείωση κατά ~21,88% για πλάτος εργασίας μικρότερο από 10m ($Q_{eff} = 0,22 \times 1,78 = 0,39wh/m^3$).

Σε κάθε άλλη περίπτωση η συγκριτική αξιολόγηση των διορθωτικών πολλαπλασιαστών θα πρέπει να λάβει υπόψη την σταδιακή μεταβολή τους, καθώς δεν τηρούνται πλέον οι Συνθήκες Βάσης Αναφοράς. Με άλλα λόγια, τα λειτουργικά σενάρια που εξετάζονται δεν ανήκουν στα κελιά του πίνακα κατανομής δεδομένων που εκφράζουν τις ΣΒΑ. Συνεπώς, εάν υποθεθεί ότι το μήκος εργασίας κυμαίνεται μεταξύ των 51m-100m, τότε η αναμενόμενη παραγωγικότητα θα πρέπει πρώτα να πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή προσαρμογής f_{length} , έτσι ώστε να περάσει από τις ΣΒΑ στην κατηγορία μήκους εργασίας 51m-100m: $Q_{th} \times f_{length} = 0,22 \times 1,02 = 0,224wh/m^3$. Η εκτίμηση της αναμενόμενης παραγωγικότητας για αυτή την κατηγορία μήκους προϋποθέτει τον υπολογισμό των επί μέρους συντελεστών προσαρμογής του πλάτους ως ακολούθως: Για πλάτος εργασίας που κυμαίνεται στο διάστημα 11m-20m, $f_{width} = 1,32 / 1,02 = 1,29$ οπότε, $Q_{eff} = Q_{th} \times f_{length} \times f_{width} = 0,22 \times 1,02 \times 1,29 = 0,29wh/m^3$. Τέλος, για πλάτη μικρότερα των 10m, $f_{width} = 1,55 / 1,02 = 1,52$, συνεπώς $Q_{eff} = 0,22 \times 1,02 \times 1,52 = 0,34wh/m^3$. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το τελευταίο αποτέλεσμα θα μπορούσε να προκύψει με απευθείας πολλαπλασιασμό της θεωρητικής παραγωγικότητας με τον ενιαίο συντελεστή προσαρμογής για πλάτος 0m-10m και μήκος 51m-100m (εξ. 6.6): $Q_{eff} = Q_{th} \times f_{1,2} = 0,22 \times 1,55 = 0,34wh/m^3$. Εάν επαρκεί το δείγμα, τότε η επιρροή των συντελεστών f_{length} and f_{width} μπορεί να γενικευθεί για την εκτίμηση της παραγωγικότητας σε διαφορετικά λειτουργικά σενάρια. Θα πρέπει να σημειωθεί και πάλι ότι οι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές έχουν υπολογιστεί από ένα μικρό στατιστικό δείγμα. Είναι, λοιπόν, λογικό ότι όσο περισσότερα δεδομένα προστίθενται στο δείγμα, τόσο μεγαλύτερη θα είναι η αξιοπιστία των εκτιμήσεων της παραγωγικότητας. Σε κάθε περίπτωση όμως, η εγκυρότητα της υπολογιστικής διαδικασίας είναι ανεξάρτητη από το μέγεθος του δείγματος, καθώς θα πρέπει να ικανοποιεί τις στατιστικές παραδοχές του πειραματικού πλαισίου, όπως περιγράφηκαν στην ενότητα της μεθοδολογικής προσέγγισης.

Σε αυτό το σημείο, θα ήταν χρήσιμο να εξεταστεί ο τρόπος επιβεβαίωσης της τιμής ενός γνωστού διορθωτικού πολλαπλασιαστή για την υλοποίηση ενός συγκεκριμένου λειτουργικού σεναρίου. Για παράδειγμα, εάν απλοποιηθεί η εξ. 6.1, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη μόνο η γωνία στροφής και το βάθος εκσκαφής, και υπολογιστεί η μαθηματική σχέση από την οποία προκύπτουν τα διαγράμματα των Σχημάτων 2.26 και 2.27, τότε η παραγωγικότητα του υδραυλικού εκσκαφέα σύμφωνα με τη μέθοδο BML (1983) δίνεται από τις παρακάτω σχέσεις (εξ. 6.9 έως εξ. 6.11):

$$Q_{eff} = Q_{th} \times f_{swing} \times f_{depth} \quad (\text{εξ. 6.9})$$

$$f_{swing} = 4 \times 10^{-6} \times \alpha^2 - 0,0024 \times \alpha + 1,1824 \quad (\text{εξ. 6.10})$$

$$f_{depth} = 0,0043 \times d^2 - 0,0622 \times d + 1,0618 \quad (\text{εξ. 6.11})$$

όπου: d = βάθος εκσκαφής [m]; $f_{swing/depth}$ = ο διορθωτικός πολλαπλασιαστής που εκφράζει ποσοτικά την επιρροή της γωνίας στροφής και του βάθους εκσκαφής για την εκτίμηση της αναμενόμενης παραγωγικότητας με βάση την θεωρητική παραγωγικότητα.; και α = γωνία στροφής [°].

Οι συνθήκες βάσης αναφοράς για τη μέθοδο BML (1983) χαρακτηρίζονται από γωνία στροφής 90° ($f_{swing} = 1,00$) και βάθος εκσκαφής 1,00m ($f_{depth} = 1,00$), όπως διευκρινίστηκε στην ενότητα §6.3.2. Λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα, η μέτρηση του συντελεστή f_{swing} επί τόπου του έργου θα πρέπει να πραγματοποιηθεί για βάθη εκσκαφής της τάξης του 1,00m, ενώ ο αντίστοιχος υπολογισμός για τον συντελεστή f_{depth} θα πρέπει να γίνει για γωνία στροφής ίση με 90° . Συνεπώς, εάν η τεχνική περιγραφή μίας δραστηριότητας εκσκαφών καθορίζει γωνία στροφής 45° και βάθος εκσκαφής ίσο με 5m, τότε η ανάλυση ευαισθησίας των τιμών του συντελεστή f_{swing} δεν μπορεί να γίνει σε συνθήκες βάσης αναφοράς. Σε αυτήν την περίπτωση, υπολογίζεται πρώτα ο συντελεστής $f_{depth} = 0,86$ και στη συνέχεια η διακύμανση της παραγωγικότητας εξετάζεται σύμφωνα με τη σχέση $Q_{eff} = Q_{th} \times f_{swing} \times 0,86$, για διαφορετικές τιμές του συντελεστή f_{swing} .

6.4.1.3 Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Μετά την ολοκλήρωση της κατάστρωσης του στατιστικού μοντέλου και τον υπολογισμό των διορθωτικών πολλαπλασιαστών, η μεθοδολογική προσέγγιση του Σχήματος 4.2 υποδεικνύει ότι εκκινεί η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ). Μετά τη συλλογή και την κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων πεδίου, προσδιορίζονται οι στατιστικά σημαντικότεροι συντελεστές παραγωγικότητας και χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο μοντέλο. Στη συνέχεια καθορίζεται η αρχιτεκτονική του νευρωνικού δικτύου σε σχέση με τον αριθμό των νευρώνων εισόδου / εξόδου, τον αριθμό των κρυμμένων επιπέδων και των αντίστοιχων νευρώνων τους, τις συναρτήσεις μετατροπής και ενεργοποίησης, καθώς και τις κύριες παραμέτρους του μοντέλου. Ταυτόχρονα, καθορίζεται ο τρόπος εκπαίδευσης και ελέγχου του βαθμού μάθησης του δικτύου. Αφού καθοριστούν οι προϋποθέσεις και τα κριτήρια της εκπαίδευσης και του ελέγχου, ξεκινάει η διαδικασία μάθησης του Νευρωνικού Δικτύου. Όταν ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού, πραγματοποιείται στατιστικός έλεγχος και στην περίπτωση που αυτός είναι επιτυχής, τότε ξεκινάει η διαδικασία της επικύρωσης. Το σύνολο δεδομένων που θα χρησιμοποιηθεί για την επικύρωση καθορίζει και το εύρος εφαρμογής του δικτύου. Η δραστηριότητα της κατασκευής των δαπέδων βαρέως τύπου από οπλισμένο σκυρόδεμα έχει αναλυθεί με λεπτομέρεια στην προηγούμενη ενότητα. Συνεπώς, στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η αντίστοιχη διαδικασία εκτίμησης των διορθωτικών πολλαπλασιαστών πλάτους και μήκους εργασίας με τη χρήση ΤΝΔ.

Βήμα 1: Συλλογή δεδομένων

Χρησιμοποιήθηκε το ίδιο δείγμα των 46 στοιχείων δεδομένων, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα (Πίνακας 6.1). Κάθε σύνολο δεδομένων έχει εξεταστεί για την εύρεση εκτόπων, τα οποία και έχουν παραληφθεί από το τελικό δείγμα. Κάθε συλλεχθέν στοιχείο δεδομένων αποτελεί μέσο εκπαίδευσης του μοντέλου ΤΝΔ. Η βάση των δεδομένων πεδίου έχει διαχωριστεί στο υποσύνολο δημιουργίας του μοντέλου (73%) και στο υποσύνολο της επικύρωσης του μοντέλου (27%). Επίσης, το υποσύνολο δημιουργίας του μοντέλου αποτελείται από τα υποσύνολα δεδομένων εκπαίδευσης (80%) και ελέγχου (20%). Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργούνται τρία υποσύνολα δεδομένων για κάθε αρχικό σύνολο δεδομένων: (α) εκπαίδευση (58%), (β) έλεγχος (15%) και (γ) επικύρωση (27%).

Βήμα 2: Δημιουργία μοντέλου Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων για την εκτίμηση της παραγωγικότητας

Με βάση την επεξεργασία των συλλεχθέντων δεδομένων και την αξιολόγηση του πρόσθετου υλικού, η μελέτη επικεντρώνεται στους δύο συντελεστές παραγωγικότητας που εξετάστηκαν και για την στατιστική επεξεργασία: πλάτος εργασίας και μήκος εργασίας, που αντιπροσωπεύουν την επιφάνεια εργασίας για μία συγκεκριμένη ημέρα. Συνεπώς, το πλάτος και το μήκος εργασίας είναι οι μεταβλητές εισόδου και η παραγωγικότητα αποτελεί την μεταβλητή εξόδου στα μοντέλα ΤΝΔ. Η αρχιτεκτονική του δικτύου χαρακτηρίζεται ως δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης πολλών επιπέδων (multi-layer feed-forward – MLFF) που χρησιμοποιεί ως αλγόριθμο μάθησης την οπισθοδιάδοση του λάθους (back-propagation – BP), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.12 παρακάτω. Το λογισμικό Neuroshell2 (Neuroshell, 2000) εφαρμόστηκε για την εκπαίδευση και τον έλεγχο όλων των μοντέλων. Το δίκτυο αποτελείται από τρία επίπεδα: το επίπεδο εισόδου, το επίπεδο εξόδου και τα ενδιάμεσα ή κρυμμένα επίπεδα. Το πλάτος και το μήκος είναι οι νευρώνες εισόδου (I_1 και I_2 αντίστοιχα), ενώ η παραγωγικότητα είναι ο νευρώνας εξόδου (O_1). Ο αριθμός των κρυμμένων επιπέδων και ο αριθμός των νευρώνων σε κάθε κρυμμένο επίπεδο προσδιορίζεται με βάση την ακρίβεια απόκρισης του δικτύου στην εκπαίδευση και τον έλεγχο. Η δομή του νευρωνικού δικτύου MLFF εμπεριέχει τριών ειδών συναρτήσεις: μετατροπής, ενεργοποίησης και μεταφοράς (§2.7.2). Η πρώτη συνάρτηση χρησιμοποιείται για την μετατροπή των τιμών των μεταβλητών εισόδου σε τιμές οι οποίες είναι επεξεργάσιμες από το νευρωνικό δίκτυο (Tam et al., 2005). Η δεύτερη χρησιμοποιείται για εξαγωγή αποτελεσμάτων στη βάση του αθροίσματος των σταθμισμένων τιμών που λαμβάνουν και η τρίτη δίνει το τελικό αποτέλεσμα του μοντέλου. Η συνάρτηση μετατροπής είναι γραμμική [-1, 1], ενώ για τις συναρτήσεις ενεργοποίησης έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις τύποι: συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης (tanh), Γκαουσιανή (Gaussian) και το συμπλήρωμα της Γκαουσιανής (Gaussian complement). Οι μαθηματικές σχέσεις όλων των παραπάνω συναρτήσεων δίνονται στις εξ. 6.12-6.16 παρακάτω:

$$\text{Γραμμική: } f(x) = 2[(x - LB)/(UB - LB)] - 1 \quad (\text{εξ. 6.12})$$

$$\text{Υπερβολική εφαπτομένη: } f(x) = \tanh(x) \quad (\text{εξ. 6.13})$$

$$\text{Γκαουσιανή: } f(x) = \exp(-x^2) \quad (\text{εξ. 6.14})$$

$$\text{Συμπλήρωμα Γκαουσιανής: } f(x) = 1 - \exp(-x^2) \quad (\text{εξ. 6.15})$$

$$\text{Λογιστική: } f(x) = 1 / (1 + \exp(-x)) \quad (\text{εξ. 6.16})$$

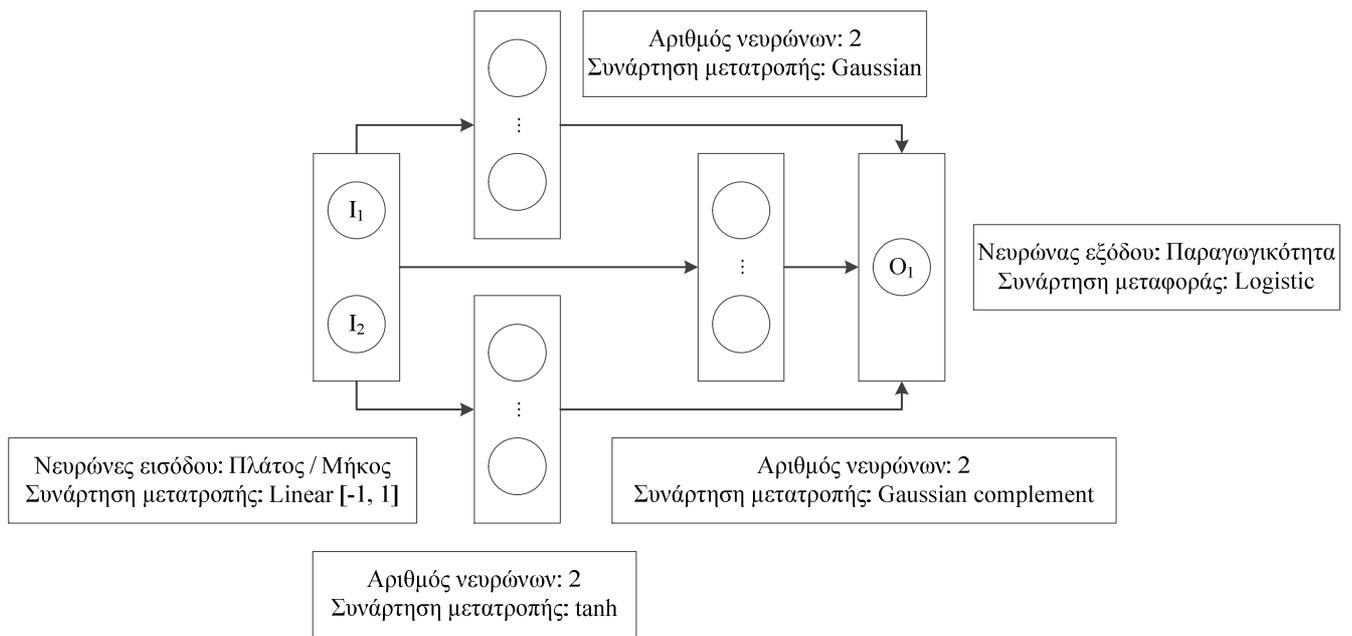
όπου: x είναι η είσοδος στις συναρτήσεις και LB/UB είναι τα χαμηλότερα και ανώτερα όρια του εύρους τιμών των μεταβλητών εισόδου.

Εξετάστηκαν διαφορετικές δομές των δικτύων και η καταλληλότερη επιλογή έγινε μέσω της εκπαίδευσης και του ελέγχου τους. Τα κριτήρια επιλογής είναι (α) ο αριθμός των νευρώνων που είναι απαραίτητοι για τη σύγκλιση του δικτύου, χωρίς όμως ο αριθμός τους να αυξηθεί υπερβολικά, ώστε το δίκτυο να απομνημονεύσει το πρόβλημα και (β) ο αριθμός των κρυμμένων επιπέδων που θα πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, έτσι ώστε να αποφευχθεί μία χρονοβόρος περίοδος εκπαίδευσης για το νευρωνικό δίκτυο (Ezeldin and Sharara, 2006). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12, έχει προσδιοριστεί ένα κρυμμένο επίπεδο με τρία υπο-τμήματα, κάθε ένα από τα οποία περιέχει δύο νευρώνες. Έτσι, η δομή του δικτύου MLFF μπορεί να κωδικοποιηθεί ως 2-6-1. Η χρήση πολλαπλών κρυμμένων τμημάτων και διαφορετικών συναρτήσεων ενεργοποίησης ισχυροποιεί το νευρωνικό δίκτυο, καθώς τα κρυμμένα επίπεδα ανιχνεύουν διαφορετικές ιδιότητες των διανυσμάτων εισόδου, παρέχοντας με αυτόν τον τρόπο διαφορετικές «όψεις» των δεδομένων. Στη συνέχεια ορίζονται οι παράμετροι του μοντέλου, όπως ο αρχικός βαθμός μάθησης (0,1) (learning rate), οι συντελεστές αδράνειας (0,1) (momentum coefficients) και οι συντελεστές αρχικών βαρών (0,3) (initial weights). Οι παράμετροι παίρνουν μικρές τιμές, έτσι ώστε να είναι δυνατή η μοντελοποίηση της πολύπλοκης δομής των μοντέλων.

Βήμα 3: Εκπαίδευση και έλεγχος του μοντέλου

Το μοντέλο BP ξεκινάει την εκπαίδευση με τις τιμές των αρχικών βαρών να είναι αυτές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Κάθε υποσύνολο δεδομένων εκπαίδευσης του δικτύου εισάγεται στο μοντέλο ως μεταβλητή είσοδος και η παραγωγικότητα της διάστρωσης του σκυροδέματος αποτελεί την έξοδο του μοντέλου. Η εκπαίδευση του δικτύου συνεχίζεται και, ταυτόχρονα, οι συντελεστές βάρους αλλάζουν δυναμικά τιμές έως τη χρονική στιγμή όπου το σφάλμα στις εκτιμήσεις του υποσυνόλου δεδομένων ελέγχου φθάσει σε αποδεκτά επίπεδα. Τα αποτελέσματα της εκπαίδευσης και του ελέγχου του δικτύου παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3.

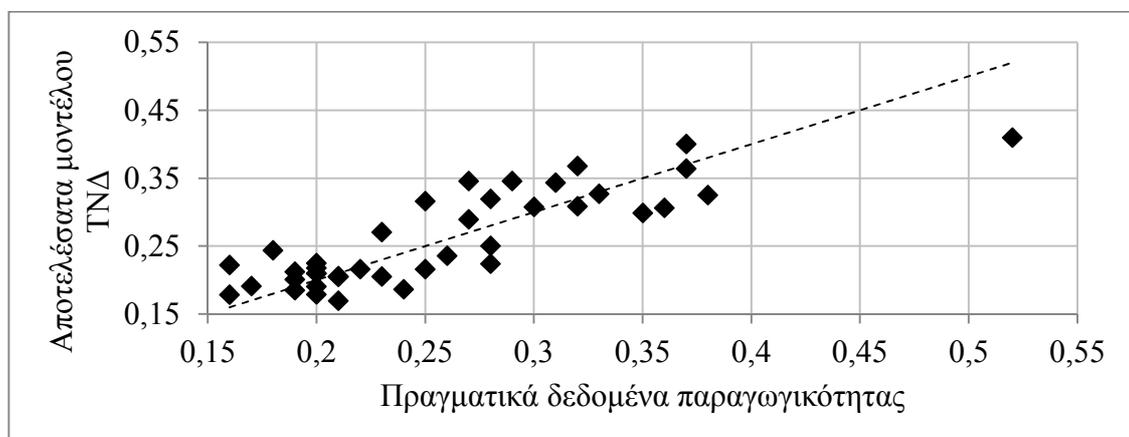
Το νευρωνικό δίκτυο λειτουργεί σαν ένα μαύρο κουτί (“black box”) καθώς μετά την εισαγωγή μίας σειράς δεδομένων εξάγονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα (Shabowitz and Hola 2007; Ok and Sinha, 2006). Συνεπώς, η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων έγκειται κυρίως στις διαδικασίες εκπαίδευσης και ελέγχου. Το διάγραμμα του Σχήματος 6.13 δείχνει τη σύγκλιση των πραγματικών τιμών παραγωγικότητας με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν από το μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Τα σημεία που βρίσκονται κατά μήκος της διαγωνίου με κλίση 1:1 ισούνται με τις πραγματικές τιμές παραγωγικότητας, όπως αναφέρθηκε ήδη και για το στατιστικό μοντέλο (Σχήμα 6.11). Συνεπώς, όσο πιο κοντά είναι τα αποτελέσματα στη διαγώνιο, τόσο μεγαλύτερη η σύγκλιση του μοντέλου με την πραγματικότητα.



Σχήμα 6.12: Η δομή του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου

Πίνακας 6.3: Εκπαίδευση και έλεγχος νευρωνικού δικτύου για διάστρωση σκυροδέματος

| Στατιστικά εκπαίδευσης | Δεδομένα εκπαίδευσης | Στατιστικά ελέγχου | Δεδομένα ελέγχου |
|------------------------|----------------------|--|------------------|
| Συμβάντα μάθησης | 24200 | Διάστημα προσαρμογής | 200 |
| Κύκλοι μάθησης | 1007 | Τελευταίο μέσο εσωτερικό σφάλμα | 0,0095540 |
| Τελευταίο μέσο σφάλμα | 0,0045902 | Ελάχιστο μέσο σφάλμα | 0,0080907 |
| Ελάχιστο μέσο σφάλμα | 0,0012087 | Αριθμός συμβάντων από ελάχιστο μέσο σφάλμα | 20200 |



Σχήμα 6.13: Διάγραμμα επικύρωσης μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων

Βήμα 4: Επικύρωση

Ένα εκπαιδευμένο δίκτυο ελέγχεται ως προς το πεδίο εφαρμογής του μέσω του ελέγχου του με σειρές δεδομένων που δεν συμμετείχαν στην εκπαίδευση, έτσι ώστε να επικυρωθούν τα αποτελέσματα. Δημιουργήθηκε ένα υποσύνολο επικύρωσης που περιέχει έντεκα (11) σειρές δεδομένων για τις εργασίες της διάστρωσης σκυροδέματος. Χρησιμοποιήθηκαν οκτώ στατιστικοί δείκτες, όπως φαίνεται παρακάτω (Neuroshell, 2000):

- **Συντελεστής R^2 (R-squared):** συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού (coefficient of multiple determination), ο οποίος συγκρίνει την ακρίβεια του μοντέλου σε σχέση με την πραγματικότητα. Η ακρίβεια των προβλέψεων προκύπτει από τον μέσο όρο όλων των δειγμάτων. Όσο η τιμή του συντελεστή πλησιάζει τη μονάδα (1,00), τόσο βελτιώνεται η σύγκλιση του μοντέλου.
- **Συντελεστής συσχέτισης r :** είναι ένας στατιστικός δείκτης που αντανακλά την ισχύ της συσχέτισης μεταξύ των πραγματικών και των εκτιμηθέντων δεδομένων. Ο συντελεστής r κυμαίνεται από -1 έως +1 και όσο πιο κοντά βρίσκεται ο συντελεστής r στην τιμή 1, τόσο ισχυρότερη είναι η θετική γραμμική συσχέτιση του μοντέλου.
- **Συντελεστής r^2 (r-squared):** είναι η τιμή του προηγούμενου συντελεστή υψωμένη στο τετράγωνο.
- **Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (mean squared error):** είναι ο μέσος όρος των τιμών που προκύπτουν από την αφαίρεση της εκτιμηθείσας τιμής από την πραγματική, υψωμένη στο τετράγωνο, δηλ. (πραγματική-εκτιμηθείσα)².
- **Μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error):** είναι ο μέσος όρος των τιμών που προκύπτουν από την απόλυτη τιμή της αφαίρεσης της εκτιμηθείσας τιμής από την πραγματική, δηλ. (πραγματική-εκτιμηθείσα).
- **Ελάχιστο απόλυτο σφάλμα (min. absolute error):** είναι η ελάχιστη τιμή της παράστασης, δηλ. (πραγματική-εκτιμηθείσα), για όλα τα δεδομένα.
- **Μέγιστο απόλυτο σφάλμα (max. absolute error):** είναι η μέγιστη τιμή της παράστασης, δηλ. (πραγματική-εκτιμηθείσα), για όλα τα δεδομένα.
- **Ποσοστό εντός 5%, 10%, 20%, 30% και άνω 30%:** αντιπροσωπεύει το ποσοστό των αποκρίσεων του δικτύου που βρίσκονται μέσα στο συγκεκριμένο ποσοστιαίο εύρος των πραγματικών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για να εκπαιδευθούν το δίκτυο.

Ενδεικτικά, τα αποτελέσματα της επικύρωσης για το νευρωνικό δίκτυο που αφορά στη διάστρωση του σκυροδέματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4. Τελικά, τόσο από το Σχήμα 6.13 όσο και από τον Πίνακα 6.4 συνάγεται πως το μοντέλο είναι ικανοποιητικό. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές για το μοντέλο των τεχνητών νευρωνικών δικτύων με βάση τον πίνακα κατανομής δεδομένων (Πίνακας 6.2) και τα αποτελέσματα απεικονίζονται στις παρακάτω σχέσεις (εξ. 6.17 και 6.18). Όπως και για την στατιστική ανάλυση, ο συντελεστής f_{length} θα εξεταστεί για τις τιμές που εμπεριέχονται στην τρίτη σειρά του πίνακα \underline{F} . Έτσι, για τιμές πλάτους εργασίας που κυμαίνονται μεταξύ 21m-35m, η αναμενόμενη παραγωγικότητα

παρουσιάζει μικρή βελτίωση κατά ~4,55% και στη συνέχεια βελτιώνεται ακόμα περισσότερο κατά ~14,29%, καθώς το μήκος εργασίας αυξάνεται από 0m-50m ($Q_{eff} = 0,22 \times 1,00 = 0,22wh/m^3$), σε 51m-100m ($Q_{eff} = 0,22 \times 0,97 = 0,21wh/m^3$) και τελικά 101m-215m ($Q_{eff} = 0,22 \times 0,83 = 0,18wh/m^3$), όπως φαίνεται και στην τελευταία σειρά του πίνακα εκτίμησης παραγωγικότητας (εξ. 6.18).

Πίνακας 6.4: Επικύρωση νευρωνικού δικτύου διάστρωσης σκυροδέματος

| Στατιστική παράμετρος | Δεδομένα εκπαίδευσης & ελέγχου | Δεδομένα επικύρωσης |
|-------------------------|--------------------------------|---------------------|
| R^2 | 0,7180 | 0,6989 |
| Συντ. συσχέτισης r | 0,8495 | 0,8378 |
| r^2 | 0,7217 | 0,7019 |
| Μέσο τετραγωνικό σφάλμα | 0,002 | 0,003 |
| Μέσο απόλυτο σφάλμα | 0,031 | 0,043 |
| Ελάχιστο απόλυτο σφάλμα | 0,003 | 0,005 |
| Μέγιστο απόλυτο σφάλμα | 0,110 | 0,110 |
| Ποσοστό εντός 5% | 24,390 | 27,273 |
| Ποσοστό μεταξύ 5%-10% | 17,073 | 0,00 |
| Ποσοστό μεταξύ 10%-20% | 41,463 | 45,455 |
| Ποσοστό μεταξύ 20%-30% | 12,195 | 18,182 |
| Ποσοστό >30% | 4,878 | 9,091 |

$$\underline{\underline{F}} = \begin{vmatrix} 1,88 & 1,39 & 0,91 \\ 1,53 & 1,30 & 0,97 \\ 1,00 & 0,97 & 0,83 \end{vmatrix} \quad (\text{εξ. 6.17})$$

$$Q_{eff} = Q_{th} \times \underline{\underline{F}} = 0,22 \times \underline{\underline{F}} = 0,22 \times \begin{vmatrix} 1,88 & 1,39 & 0,91 \\ 1,53 & 1,30 & 0,97 \\ 1,00 & 0,97 & 0,83 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0,41 & 0,31 & 0,20 \\ 0,34 & 0,29 & 0,21 \\ 0,22 & 0,21 & 0,18 \end{vmatrix} \quad (\text{εξ. 6.18})$$

Ο αντίστοιχος διορθωτικός πολλαπλασιαστής για το πλάτος (f_{width}) εκτιμάται, όπως και στην στατιστική ανάλυση, για μήκος εργασίας μικρότερο των 50m, έτσι ώστε $Q_{eff} = Q_{th} \times 1,00 \times f_{width} = Q_{th} \times f_{width}$. Συνεπώς, φαίνεται ότι η παραγωγικότητα μειώνεται κατά ~50,00% για πλάτος εργασίας που κυμαίνεται στο διάστημα 11m-20m ($Q_{eff} = 0,22 \times 1,53 = 0,34wh/m^3$), ενώ παρατηρείται μία περαιτέρω μείωση κατά ~24,24% για πλάτος εργασίας μικρότερο από 10m ($Q_{eff} = 0,22 \times 1,88 = 0,41wh/m^3$).

6.4.2. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων στατιστικού μοντέλου και μοντέλου ΤΝΔ

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται η συγκριτική αξιολόγηση των διορθωτικών πολλαπλασιαστών, καθώς και των τιμών παραγωγικότητας για το στατιστικό μοντέλο και το μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

6.4.2.1 Συγκριτική αξιολόγηση διορθωτικών πολλαπλασιαστών

Η συγκριτική αξιολόγηση των διορθωτικών πολλαπλασιαστών που προκύπτουν από τα πραγματικά δεδομένα πεδίου, το στατιστικό μοντέλο και το μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων φαίνονται παρακάτω. Καταρχήν υπολογίζονται οι διορθωτικοί πολλαπλασιαστές από τα πραγματικά δεδομένα πεδίου (εξ. 6.19). Ο Πίνακας 6.5 απεικονίζει εποπτικά τους διορθωτικούς πολλαπλασιαστές για κάθε αναλυτική μέθοδο, καθώς και την απόλυτη τιμή των ποσοστιαίων σφαλμάτων υπολογισμού σε σχέση με τις πραγματικές τιμές. Από την σύγκριση προκύπτει πως το στατιστικό μοντέλο δίνει ακριβέστερες τιμές καθώς τα σφάλματα υπολογισμού είναι μικρότερα. Το ίδιο συμπέρασμα προκύπτει και από το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, αφού η τιμή του για το στατιστικό μοντέλο είναι 0,062 και για το νευρωνικό δίκτυο 0,138.

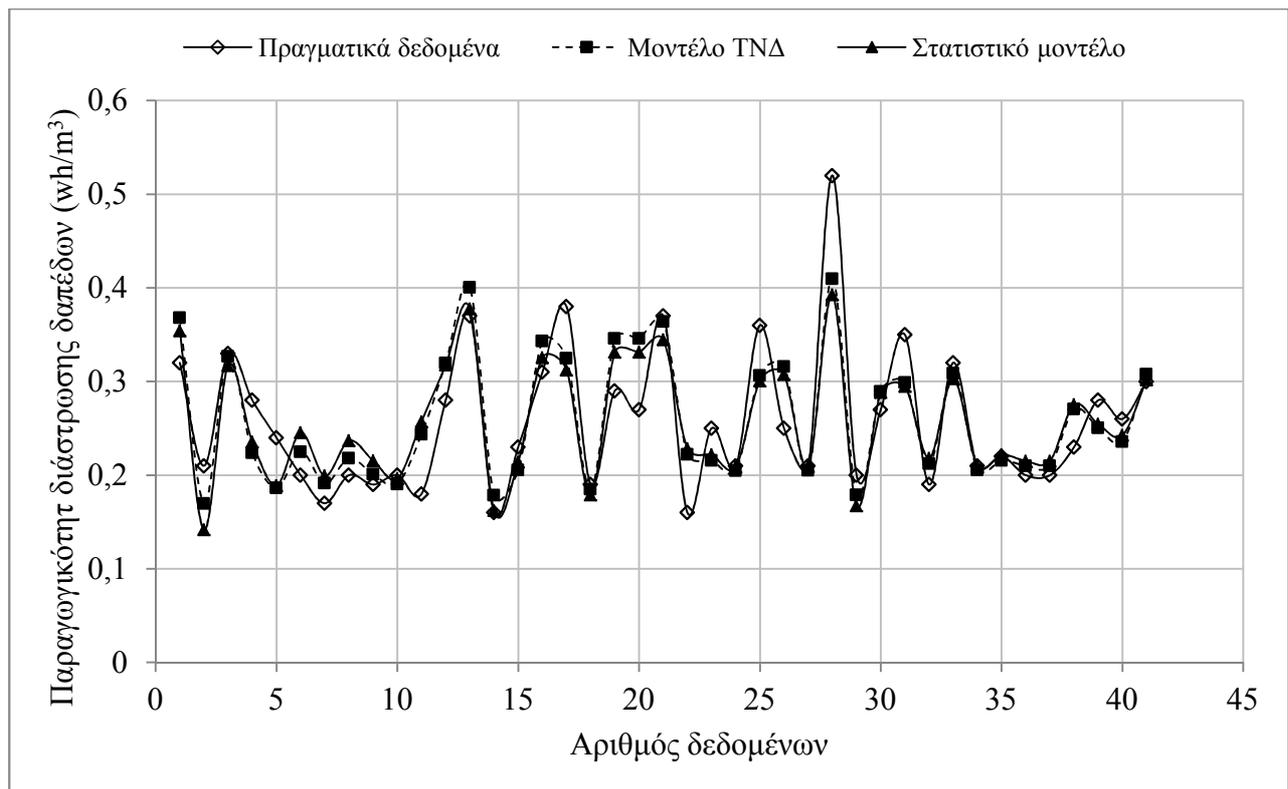
$$\underline{\underline{F}} = \begin{vmatrix} 2,06 & 1,39 & 0,93 \\ 1,49 & 1,26 & 1,07 \\ 1,00 & 0,88 & 0,74 \end{vmatrix} \quad (\text{εξ. 6.19})$$

Πίνακας 6.5: Συγκριτική απεικόνιση των διορθωτικών πολλαπλασιαστών με χρήση νευρωνικού δικτύου και στατιστικού μοντέλου και των απόλυτων τιμών των σφαλμάτων υπολογισμού

| Πραγματικά δεδομένα | Στατιστικό μοντέλο | Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο |
|--|--|--|
| $\underline{\underline{F}} = \begin{vmatrix} 2,06 & 1,39 & 0,93 \\ 1,49 & 1,26 & 1,07 \\ 1,00 & 0,88 & 0,74 \end{vmatrix}$ | $\underline{\underline{F}} = \begin{vmatrix} 1,88 & 1,39 & 0,91 \\ 1,53 & 1,30 & 0,97 \\ 1,00 & 0,97 & 0,83 \end{vmatrix}$ | $\underline{\underline{F}} = \begin{vmatrix} 1,78 & 1,55 & 0,95 \\ 1,47 & 1,32 & 0,97 \\ 1,00 & 1,02 & 0,74 \end{vmatrix}$ |
| Απόλυτη τιμή σφάλματος | $\begin{vmatrix} 8,74 & 0,00 & 2,15 \\ 2,61 & 3,17 & 9,35 \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} 13,59 & 11,51 & 2,10 \\ 1,34 & 4,76 & 10,31 \end{vmatrix}$ |
| υπολογισμού (%) | $\begin{vmatrix} 0,00 & 10,22 & 12,16 \end{vmatrix}$ | $\begin{vmatrix} 0,00 & 13,73 & 0,00 \end{vmatrix}$ |

6.4.2.2 Συγκριτική αξιολόγηση παραγωγικότητας

Σε αυτό το σημείο θα γίνει συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου της πολλαπλής παλινδρόμησης με τα αντίστοιχα αποτελέσματα του νευρωνικού δικτύου. Τα αποτελέσματα της σύγκρισης απεικονίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 6.14. Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα για το νευρωνικό δίκτυο είναι 0,072, ενώ η αντίστοιχη τιμή του στατιστικού μοντέλου είναι 0,064. Έτσι, φαίνεται ότι το στατιστικό μοντέλο είναι πιο αξιόπιστο από το νευρωνικό δίκτυο. Από τον οπτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων διαφαίνεται μία τάση του νευρωνικού δικτύου για υπερεκτίμηση των προβλέψεων σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα.



Σχήμα 6.14: Συγκριτική αξιολόγηση παραγωγικότητας διάστρωσης σκυροδέματος με χρήση νευρωνικών δικτύων και στατιστικών μοντέλων

6.4.3. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα καθώς και η ερμηνεία των ερευνητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα συνοψίζονται παρακάτω:

1. Το προτεινόμενο μεθοδολογικό πλαίσιο επιτρέπει την ανάλυση οποιασδήποτε κατασκευαστικής δραστηριότητας και τον προσδιορισμό νέων συντελεστών παραγωγικότητας και διορθωτικών πολλαπλασιαστών, που ανταποκρίνονται στις ανάγκες της μελέτης.
2. Το μεθοδολογικό πλαίσιο είναι μία πρακτική προσέγγιση για τη διατύπωση νέων μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας, αποτελώντας ουσιαστικά μία εννοιολογική επέκταση της αντίστοιχης μεθόδου που παρουσιάστηκε στην ενότητα §6.3.
3. Η εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου σε πραγματικές κατασκευαστικές δραστηριότητες υποδεικνύει τον βέλτιστο τρόπο εκτέλεσης της κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου με οπλισμένο σκυρόδεμα σε σχέση με κρίσιμες παραμέτρους σχεδιασμού, όπως το πλάτος και το μήκος εργασίας.
4. Η μελέτη περίπτωσης και τα αποτελέσματα της ανάλυσης υποδεικνύουν ότι η παραγωγικότητα επηρεάζεται περισσότερο από τη μεταβολή του πλάτους εργασίας και όχι του μήκους εργασίας. Επίσης, όσο μεγαλύτερη η επιφάνεια που διατίθεται, τόσο βελτιώνεται και η παραγωγικότητα για δεδομένες τιμές του πλάτους ή του μήκους εργασίας. Μία πιθανή εξήγηση αυτής της διαπίστωσης αποτελεί το γεγονός πως όσο αυξάνεται η διατιθέμενη επιφάνεια, τόσο μειώνεται ο συνωστισμός των μέσων παραγωγής επί τόπου του έργου.

5. Το στατιστικό μοντέλο είναι πιο συνεπές στην αποτύπωση της τάσης μείωσης ή αύξησης της παραγωγικότητας ανάλογα με τη διακύμανση των συντελεστών παραγωγικότητας. Αντίθετα, το μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων παρουσιάζει καλύτερη προσαρμοστικότητα στις μεταβολές του πλάτους και όχι του μήκους εργασίας.
6. Η συσχέτιση του λειτουργικού πλαισίου μελέτης της δραστηριότητας και των αντίστοιχων διορθωτικών πολλαπλασιαστών με σαφή και απόλυτο τρόπο αποτυπώνεται μέσα από τον υπολογισμό των μεμονωμένων διορθωτικών πολλαπλασιαστών για κάθε κατηγορία του πλάτους και του μήκους εργασίας. Με αυτόν τον τρόπο, είναι απολύτως κατανοητή στον μηχανικό η φυσική σημασία της συγκριτικής αξιολόγησης όσον αφορά στη διακύμανση των τιμών των διορθωτικών πολλαπλασιαστών και των αντίστοιχων διακυμάνσεων της παραγωγικότητας.

6.5. Στοχαστικό μοντέλο παραγωγικότητας και πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης *CaissonSim*

Η αξιολόγηση του στοχαστικού μοντέλου παραγωγικότητας και του συστήματος προσομοίωσης *CaissonSim* περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους μέσω μίας μελέτης περίπτωσης σε πραγματικό τεχνικό έργο για εργασίες σκυροδέτησης κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson).

6.5.1. Μελέτη περίπτωσης για την εφαρμογή του στοχαστικού μοντέλου παραγωγικότητας

Το έργο που χρησιμοποιήθηκε ως μελέτη περίπτωσης αφορά στην κατασκευή 34 caisson (ΠxΜxΥ = 15m x 24,80m x 19,70m) με τη χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου (Σχήμα 6.15). Η μελέτη κάλυψε μία περίοδο οκτώ μηνών (Ιανουάριος 2012 – Αύγουστος 2012) και οι εργασίες παρακολούθηθηκαν με τη χρήση απευθείας επίβλεψης ή παρατήρησης σε συνδυασμό με βιντεοσκόπηση στοπ-καρέ και συνεντεύξεις με εξειδικευμένο προσωπικό. Οι μετρήσεις των δεδομένων πεδίου συλλέχθηκαν με τακτική συμπλήρωση του ημερήσιου δελτίου παραγωγικότητας (Σχήμα 3.3) και του εξειδικευμένου δελτίου κατά τη διάρκεια της ολίσθησης (Σχήμα 3.4). Επιπρόσθετα, δευτερεύουσες πηγές δεδομένων αποτέλεσαν τα σχέδια της μελέτης, τα συμβατικά τεύχη και τα δελτία παραλαβής της αποθήκης (σιδηρού οπλισμού, υλικών κτλ). Τα δεδομένα παραγωγικότητας μετρήθηκαν σε εργατοώρες/παραγόμενο προϊόν (π.χ. wh/m³ ή wh/m). Συνολικά συλλέχθηκαν 1.771 στοιχεία δεδομένων από όλες τις δραστηριότητες που μελετήθηκαν. Οι επόμενες παράγραφοι παρέχουν περισσότερες λεπτομέρειες για τη διαδικασία μοντελοποίησης.



Σχήμα 6.15: Παραγωγή caisson σε πλωτή αυτοβυθιζόμενη δεξαμενή με χρήση ολισθαίνοντα μεταλλότυπου

6.5.2. Δημιουργία μοντέλου προσομοίωσης

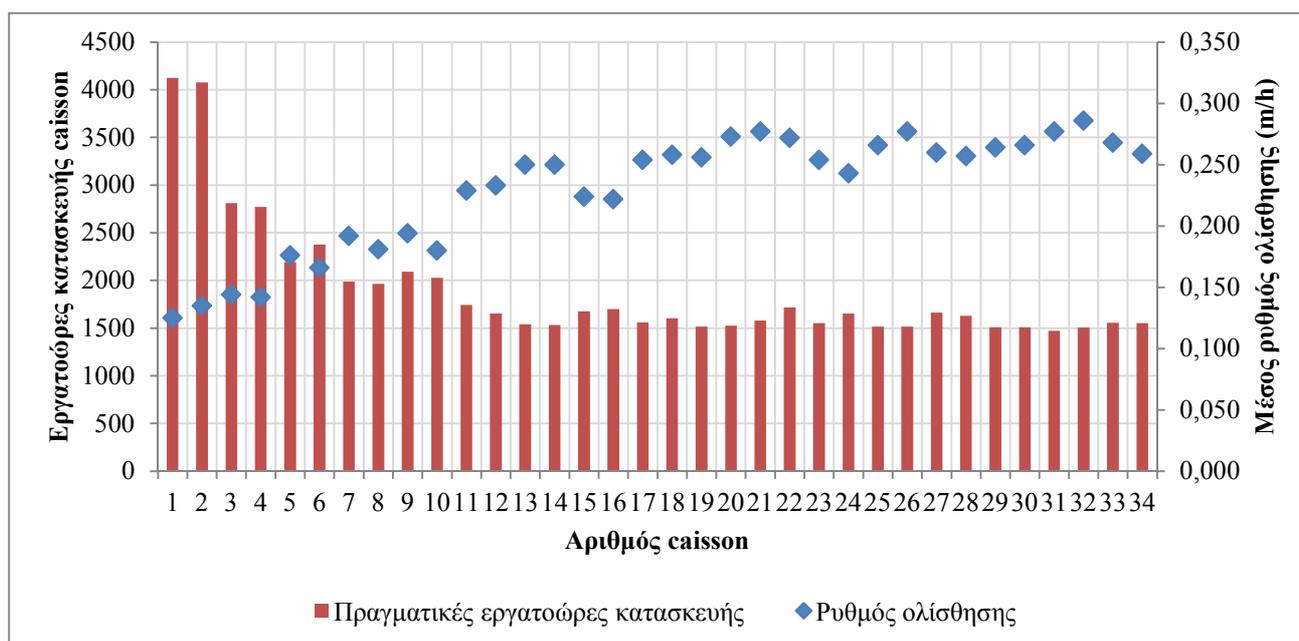
Μελετώντας την τεχνική περιγραφή του συγκεκριμένου έργου διαφάνηκε πως το μοντέλο που ανταποκρίνεται στη συγκεκριμένη λειτουργική διάταξη είναι το «5.0.2» (§5.4.1). Το αντίστοιχο διάγραμμα του μοντέλου προσομοίωσης φαίνεται στο Σχήμα 5.3 και τα στοιχεία μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν για να κατασκευαστεί το διάγραμμα του μοντέλου καθώς και η επεξήγηση της σημασίας καθενός από αυτά απεικονίζονται στον Πίνακα 5.1.

Τα caisson κατασκευάζονται ανά ζεύγη. Εξαιτίας περιορισμών στην φέρουσα ικανότητα της πλωτής δεξαμενής, η ολίσθηση σταματά όταν τα caisson φθάσουν στο ύψος των +9,00m (Φάση Α), η δεξαμενή βυθίζεται, τα δύο caisson καθελκύνονται με τη βοήθεια ρυμουλκών και η κατασκευή συνεχίζεται εν πλω, έως ότου τα δύο caisson φθάσουν στην τελική στάθμη των +19,70m (Φάση Β). Μετά την αποσυναρμολόγηση, ο εξοπλισμός ολίσθησης θα είναι διαθέσιμος για να συναρμολογηθεί επάνω στην πλάκα θεμελίωσης των επόμενων δύο caisson. Θα πρέπει να σημειωθεί πως μετά την ολοκλήρωση κάθε κύκλου παραγωγής, τα caisson μεταφέρονται δια θαλάσσης στην τελική τους θέση κατά μήκος του κρηπιδότοιχου και πληρώνονται με νερό και κοκκώδες υλικό. Η διαδικασία αυτή όμως δεν είναι κρίσιμη για το μοντέλο, συνεπώς έχει εξαιρεθεί από την ανάλυση.

6.5.3. Εκτέλεση του πειράματος της προσομοίωσης

Από την επεξεργασία των δεδομένων πεδίου προέκυψε ότι ο αριθμός των εργατοωρών για την ολίσθηση των caisson μειωνόταν σταδιακά, όσο προχωρούσε η πρόοδος των εργασιών (Σχήμα 6.16). Η διαφοροποίηση της πραγματικής απόδοσης του συστήματος οφείλεται σε δύο λόγους: (α) παρατηρείται έντονα το φαινόμενο της

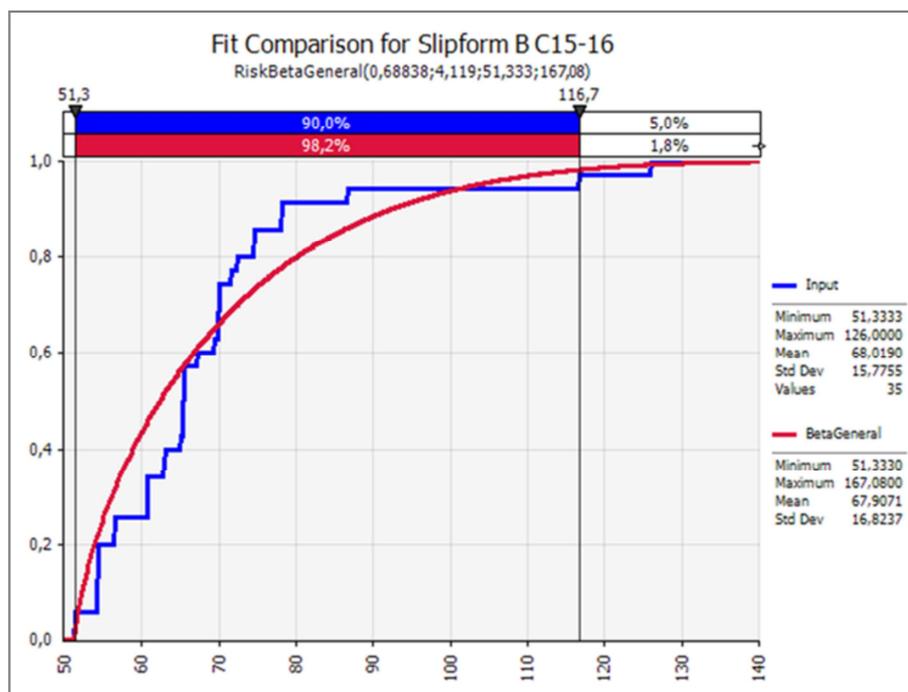
μάθησης εξαιτίας της επαναληπτικής φύσης των εργασιών και (β) ο ρυθμός ολίσθησης αυξάνεται σταδιακά, όσο τα συνεργεία αποκτούν μεγαλύτερη εμπειρία στην εκτέλεση των εργασιών (Σχήμα 6.16). Συνεπώς, τα δεδομένα πεδίου δεν μπορούν να ενσωματωθούν στην ανάλυση χωρίς να ελεγχθεί η ομοιογένειά τους, όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Η κύρια πηγή προέλευσης αυτής της διαφοροποίησης είναι η δραστηριότητα της ολίσθησης. Τα αποτελέσματα του ελέγχου Kruskal Wallis που έγινε και για τις δύο φάσεις της ολίσθησης υπέδειξαν ότι η συγχώνευση των δεδομένων πεδίου θα ήταν στατιστικά αποδεκτή μόνο για τα ακόλουθα ζεύγη caisson: 1-2, 3-4, 7-8, 9-10, 13-14, 15-16, 17-18, 21-22, 23-24, 27-28 και 29-30. Τα υπόλοιπα caisson μοντελοποιήθηκαν ως ξεχωριστά μοντέλα. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκαν 23 ανεξάρτητα μοντέλα προσομοίωσης με χρήση του προτύπου «5.0.2» του *CaissonSim*.



Σχήμα 6.16: Δεδομένα πεδίου για την κατασκευή των caisson

Σε αυτό το σημείο θα αναλυθεί, ενδεικτικά, η διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος της προσομοίωσης με το σύστημα *CaissonSim* για την κατασκευή των caisson 15-16, τροποποιώντας κατάλληλα το πρότυπο «5.0.2» και αντικαθιστώντας τις τιμές των μεταβλητών που αντιπροσωπεύουν την κατασκευαστική διαδικασία. Όπως αναφέρθηκε στο Σχήμα 3.7, έχοντας προσδιορίσει το μοντέλο της προσομοίωσης και έχοντας ολοκληρώσει τη συλλογή δεδομένων πεδίου, θα πρέπει να γίνει ο προσδιορισμός της καταλληλότερης στατιστικής κατανομής για την χρονική διάρκεια των δραστηριοτήτων. Η διαδικασία υπολογισμού περιλαμβάνει την στατιστική προσαρμογή των πραγματικών δεδομένων σε προκαθορισμένες κατανομές (Πίνακας 6.6) με τη χρήση του στατιστικού πακέτου BestFit (Palisade, 2009). Για παράδειγμα, ο προσδιορισμός της καταλληλότερης κατανομής για την δραστηριότητα της ολίσθησης (Φάση Β) έδωσε τα αποτελέσματα που φαίνονται στο Σχήμα 6.17 παρακάτω. Με τον ίδιο τρόπο προσδιορίστηκαν τα αντίστοιχα δεδομένα για τις υπόλοιπες δραστηριότητες. Το μοντέλο έχει επαληθευτεί καθώς προέρχεται από τη βιβλιοθήκη πρότυπων μοντέλων του *CaissonSim*, συνεπώς το επόμενο βήμα είναι η εκτέλεση του πειράματος της προσομοίωσης. Το επίπεδο σημαντικότητας προσδιορίστηκε στο 90% και ορίστηκαν 30 επαναλήψεις για κάθε κύκλο προσομοίωσης της κατασκευής ενός

caisson. Για κάθε δραστηριότητα του μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιείται ένα συνεργείο. Η ανάλυση των δεδομένων εξόδου έδειξε ότι η μέση παραγωγικότητα του συστήματος μετά από 30 επαναλήψεις για την παραγωγή 34 caisson είναι 1.700,80 wh/caisson. Η πραγματική παραγωγικότητα για την παραγωγή του caisson 15 και 16 είναι 1.676 wh και 1.701 wh αντίστοιχα, συνεπώς η διαφορά είναι λιγότερη από 1,50%. Περισσότερες λεπτομέρειες για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του πειράματος της προσομοίωσης δίνονται στην επόμενη παράγραφο.



Σχήμα 6.17: Προσδιορισμός παραμέτρων στατιστικής κατανομής μοντέλου προσομοίωσης

Πίνακας 6.6: Κατανομές δεδομένων εισόδου για την προσομοίωση κατασκευαστικών δραστηριοτήτων για τα caissons 15 και 16

| Όνομα δραστηριότητας | Χρονική διάρκεια |
|----------------------|--|
| Act1 (Act1Dur) | Uniform[40,50] |
| Act2 (Act2Dur) | Uniform[0.96,1.00]*81 |
| Act3 (Act3Dur) | Uniform[0.18,0.22]*241,80 |
| Act4 (Act4Dur) | Triangular[48,50,52] |
| Act5 (Act5Dur) | Uniform[80,140] |
| Act6 (Act6Dur) | Uniform[2.17, 24.50] |
| Act7 (Act7Dur) | 1 |
| Act8 (Act8Dur) | Uniform[25, 52] |
| Act9 (Act9Dur) | Triangular[41.708, 52, 82.009]*9.00 |
| Act10 (Act10Dur) | Uniform[42, 55]*0.50 |
| Act11 (Act11Dur) | Uniform[12, 15] |
| Act12 (Act12Dur) | Uniform[35,45] |
| Act13 (Act13Dur) | Uniform[8, 10] |
| Act14 (Act14Dur) | Uniform[2,4] |
| Act15 (Act15Dur) | 1 |
| Act16 (Act16Dur) | Uniform[170, 385] |
| Act17 (Act17Dur) | ScaledBeta[51.333, 167.08, 0.68838, 4.119]*10.70 |
| Act18 (Act18Dur) | Uniform[27, 35]*0.50 |
| Act19 (Act19Dur) | Uniform[80,133] |

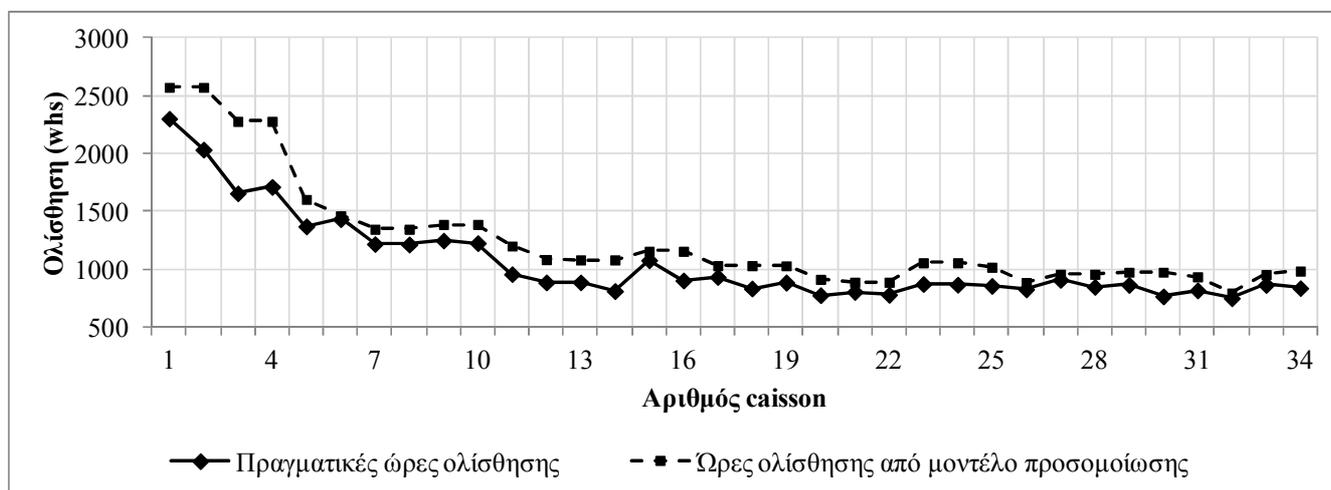
6.5.4. Αποτελέσματα πειράματος προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι στατιστικά έγκυρα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.18. Το μοντέλο της προσομοίωσης τείνει να υπερεκτιμά ελαφρώς τη διάρκεια της ολίσθησης. Η ακρίβεια της εκτίμησης για τα πρώτα πέντε caisson κυμαίνεται στις τιμές 73-89%, ενώ για τα υπόλοιπα 29 caisson η ακρίβεια κυμαίνεται μεταξύ του 85-90%, με τη μέγιστη τιμή της να βρίσκεται στο 97%. Η συνολική ακρίβεια του μοντέλου στην εκτίμηση της παραγωγικότητας για όλη την διαδικασία κατασκευής των caisson είναι πάνω από 90%. Μετά την επικύρωσή του, το μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε για να διερευνηθεί η επιρροή συγκεκριμένων συντελεστών παραγωγικότητας στην κατασκευαστική διαδικασία των caisson (ανάλυση ευαισθησίας), όπως (i) η αλληλουχία εκτέλεσης των δραστηριοτήτων, (ii) ο ρυθμός ολίσθησης και (iii) τα τεχνικά χαρακτηριστικά της πλωτής αυτοβυθιζόμενης δεξαμενής.

6.5.5. Επιρροή της αλληλουχίας εκτέλεσης των δραστηριοτήτων

6.5.5.1. Επιρροή της στρατηγικής απασχόλησης των συνεργείων

Αυτή η ενότητα διερευνά την επιρροή της χρήσης του ίδιου συνεργείου σκυροδέτησης και τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού, όχι μόνο για την κατασκευή των τοιχίων των caisson, αλλά και για την κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης πάνω στην πλωτή δεξαμενή, όπως φαίνεται στο πρότυπο «5.0.1». Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η ποσοτικοποίηση της επίδρασης της κοινής χρήσης των μέσων παραγωγής μεταξύ δύο κύκλων παραγωγής: ο κύκλος του caisson που βρίσκεται υπό κατασκευή εν πλω και πρόκειται να ολοκληρωθεί και ο κύκλος των επόμενων caisson, η κατασκευή των οποίων ξεκινά επάνω στην πλωτή δεξαμενή.



Σχήμα 6.18: Πραγματικές εργατοώρες ολίσθησης και αποτελέσματα προσομοίωσης

Η μέση παραγωγικότητα για το μοντέλο «5.0.1» είναι 1.752,51 wh/caisson που υποδηλώνει μία αύξηση στις απαιτούμενες εργατοώρες κατά 3%. Εξαιτίας της δέσμευσης για εμπιστευτικότητα στη χρήση των πληροφοριών, δεν θα αναφερθούν κοστολογικά δεδομένα, όμως αξίζει να σημειωθεί ότι η χρησιμοποίηση διαφορετικών συνεργείων προκαλεί μία αύξηση ~11% στο κόστος παραγωγής των caisson. Όμως, τελικά

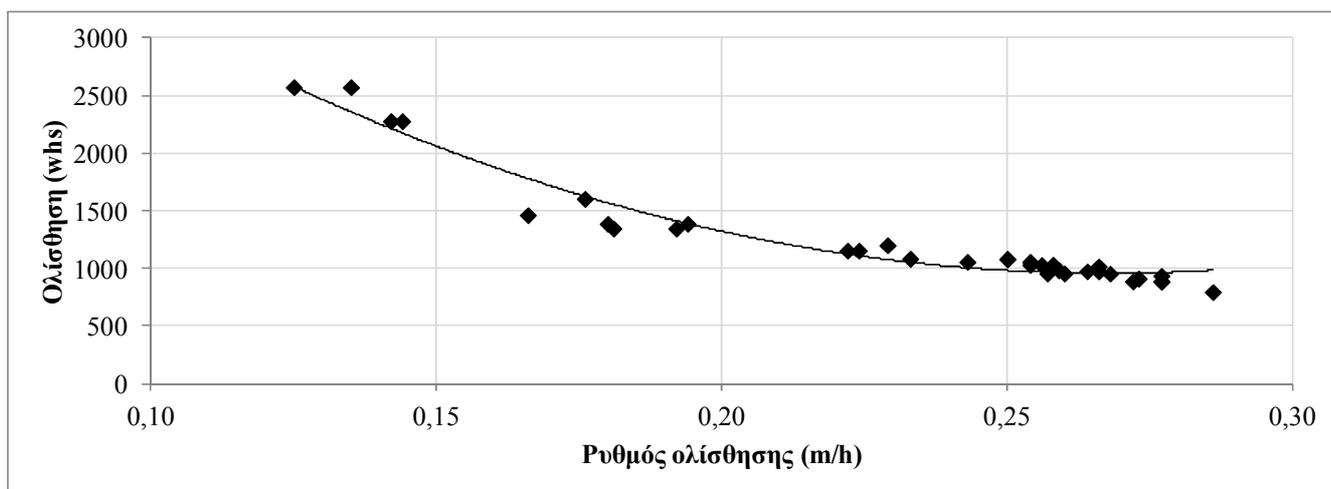
αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικά συνεργεία, καθώς με αυτόν τον τρόπο εξασφαλιζόταν ευελιξία στον προγραμματισμό των εργασιών, αφού οι δύο κύκλοι παραγωγής θα μπορούσαν να προγραμματιστούν ανεξάρτητα. Επίσης, εξετάστηκε η επιρροή του διαφορετικού αριθμού συνεργείων σκυροδέτησης και τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού (χρήση ενός, δύο ή τριών συνεργείων για κάθε εργασία). Ο γεννιήτορας συνδυασμών εφαρμογής «έτρεξε» και για τους εννιά συνδυασμούς κάθε προτύπου και βρέθηκε πως δεν θα υπήρχε όφελος στην παραγωγικότητα για το μοντέλο «5.0.2». Το μοντέλο «5.0.1» έχει την ίδια παραγωγικότητα με το μοντέλο «5.0.2», όταν χρησιμοποιούνται δύο συνεργεία σκυροδέτησης και δύο συνεργεία τοποθέτησης σιδηρού οπλισμού. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο, καθώς τα επιπλέον συνεργεία για την κάθε εργασία θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης, όταν είναι διαθέσιμη η πλωτή δεξαμενή, ακριβώς όπως και στο μοντέλο «5.0.2». Η αύξηση στο κόστος λόγω της αύξησης του εργατικού δυναμικού και στα δύο μοντέλα κυμαίνεται από 6% έως 27%. Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί ένα συνεργείο ανά δραστηριότητα για την κατασκευή των caisson.

6.5.5.2. Επιρροή της παράλληλης εκτέλεσης δραστηριοτήτων

Η διερεύνηση της επιρροής της αλληλουχίας εκτέλεσης των δραστηριοτήτων στην παραγωγικότητα, πραγματοποιήθηκε αναλύοντας τα αποτελέσματα του συστήματος στην περίπτωση που οι εργασίες του καθαρισμού και της καθέλκυσης εκτελεστούν παράλληλα. Γι' αυτό τον σκοπό χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο μοντέλο «5.1.2.» του *CaissonSim* και η μέση εκτιμώμενη παραγωγικότητα βρέθηκε ίση με 1.686,51 wh/caisson, που υποδηλώνει οριακή βελτίωση μικρότερη του 1%. Με βάση αυτά τα αποτελέσματα και λαμβάνοντας υπόψη τους κινδύνους για την ασφάλεια και υγεία των εργαζομένων που ενέχει η εκτέλεση εργασιών κατά τη διάρκεια της καθέλκυσης της δεξαμενής, αυτή η εναλλακτική δεν εφαρμόστηκε στο έργο.

6.5.6. Επιρροή του ρυθμού ολίσθησης

Ο ρυθμός ολίσθησης είναι μία φυσική παράμετρος και η επίδρασή της στη διαδικασία παραγωγής των caisson αντικατοπτρίζεται μέσα από τις αντίστοιχες διαφοροποιήσεις στην χρονική διάρκεια της ολίσθησης. Ανεξάρτητα από την πηγή προέλευσης της επιτάχυνσης της ολίσθησης (π.χ. φαινόμενο μάθησης), ο ρυθμός ολίσθησης είναι ο βασικός συντελεστής παραγωγικότητας που ποσοτικοποιεί την αλλαγή στον κύκλο παραγωγής των caisson. Η ανάλυση ευαισθησίας καλύπτει τον κύκλο παραγωγής όλων των caisson (34) και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.19. Το διάγραμμα ποσοτικοποιεί την επίδραση του ρυθμού ολίσθησης στην χρονική διάρκεια και υποδηλώνει ότι η ολίσθηση με μικρό ρυθμό ολίσθησης μπορεί να διαρκέσει έως και 2,5 φορές περισσότερο από την αντίστοιχη διάρκεια της ίδιας δραστηριότητας για ρυθμό ολίσθησης της τάξης του 0,28m/h. Αυτό το εύρημα δίνει μία ξεκάθαρη ένδειξη του μεγέθους του κινδύνου υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης της διάρκειας τέτοιων δραστηριοτήτων, εάν αγνοηθεί αυτή η βασική παράμετρος κατά τη φάση της μελέτης. Το διάγραμμα του Σχήματος 6.19 μπορεί να εφαρμοστεί και ως εμπειρικό νομογράφημα για τον προγραμματισμό μελλοντικών έργων με την προϋπόθεση το πλαίσιο εκτέλεσης των εργασιών να παραμείνει αμετάβλητο (π.χ. τύπος έργου, εφαρμοζόμενη κατασκευαστική μέθοδος).



Σχήμα 6.19: Γραφική απεικόνιση ρυθμού ολίσθησης – εργατωρών ολίσθησης

6.5.7. Επιρροή των τεχνικών χαρακτηριστικών της πλωτής αυτοβυθιζόμενης δεξαμενής

Η επιρροή της διαθεσιμότητας της πλωτής αυτοβυθιζόμενης δεξαμενής ποσοτικοποιείται μέσω της σύγκρισης των προτύπων «5.0.2» και «5.2.2». Στην περίπτωση της κατασκευής των caisson 15-16 βρέθηκε πως η κατασκευή της πλάκας θεμελίωσης του επόμενου ζεύγους caisson παράλληλα με την ολοκλήρωση των άλλων δύο που βρίσκονται εν πλω έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της παραγωγικότητας κατά 11%. Συνεπώς, φαίνεται ξεκάθαρα η θετική επίδραση της στρατηγικής χρήσης των μέσων παραγωγής στην απόδοση του συστήματος, καθώς η διάρκεια της ολίσθησης παραμένει η ίδια και στις δύο εναλλακτικές που εξετάστηκαν. Επιπρόσθετα, το μοντέλο προσομοίωσης «5.3.1» αντιπροσωπεύει την απόκριση του συστήματος στην περίπτωση που η πλωτή δεξαμενή έχει την φέρουσα ικανότητα για να κατασκευαστούν εξ' ολοκλήρου τα δύο caisson εν ξηρώ πριν την καθέλκυσή τους. Με τον ίδιο τρόπο, η ανάλυση της προσομοίωσης έδειξε πως στην περίπτωση των caisson 15-16 η παραγωγικότητα βελτιώθηκε κατά 3%. Φαίνεται, λοιπόν, πως η αποφυγή της διακοπής της εργασίας και της καθέλκυσης από τη δεξαμενή δεν είναι τόσο κρίσιμη για την απόδοση του συστήματος, όσο είναι η συγχώνευση του κύκλου παραγωγής περισσότερων από δύο ζευγών caisson.

6.5.8. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα καθώς και η ερμηνεία των ερευνητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα συνοψίζονται παρακάτω:

1. Το πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης *CaissonSim* μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ταυτόχρονη ανάλυση προβλημάτων Λειτουργικής Ανάλυσης που εμπεριέχουν πολλαπλές τιμές εισόδου για τις μεταβλητές του συστήματος που μοντελοποιείται.
2. Η λειτουργική μονάδα του γεννήτορα συνδυασμών εφαρμογής επιτρέπει την στατιστική επεξεργασία απεριόριστων σεναρίων εκτέλεσης της κατασκευής των caisson με βάση τα υπάρχοντα μοντέλα στη βιβλιοθήκη του συστήματος.

3. Η λειτουργική μονάδα των διαδραστικών αναφορών συγκρατεί και διαθέτει προς επεξεργασία τα στατιστικά δεδομένα κάθε επανάληψης για κάθε δραστηριότητα και μέσο παραγωγής του αντίστοιχου μοντέλου προσομοίωσης που αναλύεται.
4. Το μοντέλο εμφανίζει πολύ καλή προσαρμογή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στα πραγματικά δεδομένα πεδίου του έργου. Οι αυξημένες διαφορές που προκύπτουν για τα πρώτα πέντε caisson οφείλονται στον μεγάλο βαθμό διακύμανσης της παραγωγικότητας κατά τα πρώτα στάδια της κατασκευαστικής διαδικασίας των caisson.
5. Η απασχόληση ξεχωριστών συνεργείων για τη σκυροδέτηση των τοιχίων για τα caisson που βρίσκονται εν πλω και για τη σκυροδέτηση της βάσης των επόμενων δύο caisson στην πλωτή αυτοβυθιζόμενη δεξαμενή αυξάνει τις απαιτούμενες εργατοώρες κατά 3%, αλλά προσδίδει ευελιξία στον προγραμματισμό του έργου.
6. Η παράλληλη εκτέλεση δραστηριοτήτων κατά τη διάρκεια της καθέλκυσης δημιουργεί οριακά οφέλη στην παραγωγικότητα, συνεπώς οι κίνδυνοι ασφαλείας που προκύπτουν από μία τέτοια μέθοδο κατασκευής λειτουργούν αποτρεπτικά ως προς την υιοθέτησή της.
7. Ο ρυθμός ολίσθησης είναι ο βασικός συντελεστής παραγωγικότητας του συστήματος. Συνεπώς, θα πρέπει να αποτελέσει και βασική παράμετρο σχεδιασμού για την αποφυγή υπερεκτιμήσεων ή υποεκτιμήσεων στη διάρκεια των δραστηριοτήτων.
8. Η παράλληλη κατασκευή της βάσης των επόμενων caisson μαζί με την ολοκλήρωση της σκυροδέτησης των caisson που βρίσκονται εν πλω βελτιώνουν σημαντικά την παραγωγικότητα (11%) και θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη φάση του προγραμματισμού του έργου.

6.6. Αξιολόγηση στοχαστικού μοντέλου με καμπύλη μάθησης

Το έργο που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της επιρροής της καμπύλης μάθησης είναι το ίδιο με αυτό της παραγράφου §6.5, τόσο ως προς τον αριθμό και το τύπο των δεδομένων του δείγματος (1.771 στοιχεία δεδομένων και δευτερεύουσες πηγές δεδομένων), όσο και για το πρότυπο μοντέλο προσομοίωσης του *CaissonSim* που μελετήθηκε («5.0.2»). Το διάγραμμα προσομοίωσης του μοντέλου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.3, αλλά τα δεδομένα εισόδου διαφοροποιούνται σε σχέση με τα αντίστοιχα του προηγούμενου κεφαλαίου (Πίνακας 6.7). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους.

6.6.1. Βαθμός μάθησης και ιστορικά δεδομένα παραγωγικότητας

Η επιρροή του βαθμού μάθησης εξετάστηκε για τις έξι δραστηριότητες στη βάση πραγματικών δεδομένων πεδίου. Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό του ρυθμού μάθησης για κάθε δραστηριότητα, δηλ. συναρμολόγηση (72%), αποσυναρμολόγηση (88%), αρχική σκυροδέτηση για την Φάση Α (86%) και την Φάση Β (78%), καθώς και για την ολίσθηση της Φάσης Α (79%) και Φάσης Β (82%). Η στατιστική ανάλυση της καμπύλης μάθησης για τα πραγματικά αθροιστικά δεδομένα παραγωγικότητας έδωσε ρυθμό μάθησης ίσο με 80,2%. Στη συνέχεια, η ανάλυση έγινε με χρήση προσομοίωσης, όπου ο ρυθμός

μάθησης κάθε δραστηριότητας θεωρήθηκε ότι ακολουθεί την τριγωνική κατανομή με διαφοροποίηση $\pm 5\%$ από την μέση τιμή του ρυθμού μάθησης που προέκυψε από την στατιστική ανάλυση (Πίνακας 6.7). Οι αρχικές διάρκειες των δραστηριοτήτων καθορίστηκαν με βάση πραγματικά δεδομένα από την κατασκευή των πρώτων τεσσάρων caisson (Πίνακας 6.8) και κάθε πείραμα προσομοίωσης εκτελέστηκε για 30 ανεξάρτητες επαναλήψεις με επίπεδο εμπιστοσύνης 90%. Το σημείο τυπικής παραγωγικότητας για την ανάλυση της προσομοίωσης καθορίστηκε μετά την κατασκευή του 26^{ου} caisson, καθώς δεν έχουν παρουσιαστεί σημαντικές βελτιώσεις στην παραγωγικότητα πέραν αυτού του σημείου (Σχήμα 6.20).

Πίνακας 6.7: Προσδιορισμός ρυθμού μάθησης για επί μέρους δραστηριότητες κατασκευής caisson

| Δραστηριότητα | Στατιστικός ρυθμός μάθησης | Στοχαστικός ρυθμός μάθησης |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Αποσυναρμολόγηση | 88% | Triangular[0.84;0.88;0.92] |
| Αρχική σκυροδέτηση – Φάση Α | 86% | Triangular[0.82;0.86;0.90] |
| Αρχική σκυροδέτηση – Φάση Β | 78% | Triangular[0.74;0.78;0.82] |
| Ολίσθηση – Φάση Α | 79% | Triangular[0.75;0.79;0.83] |
| Ολίσθηση – Φάση Β | 82% | Triangular[0.78;0.82;0.86] |
| Συναρμολόγηση | 72% | Triangular[0.68;0.72;0.76] |

Πίνακας 6.8: Δεδομένα εισόδου για το μοντέλο προσομοίωσης φαινομένου μάθησης

| Στοιχείο μοντέλου | Τύπος στοιχείου | Περιγραφή | C1-2-3-4 |
|-------------------|------------------|---|-------------------------------------|
| | | | Uniform[38,40] |
| Act1 (Act1Dur) | Combi (Δ.Ε.*) | Κατασκευή ξυλοτύπου θεμελίωσης (διάρκεια) | Uniform[1.15,3.60]*81 |
| Act2 (Act2Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Τοποθέτηση σιδηρού οπλισμού θεμελίωσης (διάρκεια) | Uniform[0.20,0.24]*241.80 |
| Act3 (Act3Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Σκυροδέτηση πλάκας θεμελίωσης (διάρκεια) | |
| Act4 (Act4Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Τοποθέτηση δευτερεύοντος σ.ο. θεμελίωσης (διάρκεια) | Triangular[27,30,33] |
| Act5 (Act5Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Συναρμολόγηση εξοπλισμού ολίσθησης (διάρκεια) | Uniform[180,615] |
| Act6 (Act6Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Προετοιμασία αρχικής σκυροδέτησης – Φάση Α (διάρκεια) | Uniform[20,50] |
| Act7 (Act7Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Έλεγχος ασφαλείας – Φάση Α (διάρκεια) | 1 |
| Act8 (Act8Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Αρχική σκυροδέτηση – Φάση Α (διάρκεια) | Uniform[90,120] |
| Act9 (Act9Dur) | Normal (Δ.Ε.) | Ολίσθηση – Φάση Α (διάρκεια) | Triangular[71.01,88.667,261.6]*9.00 |

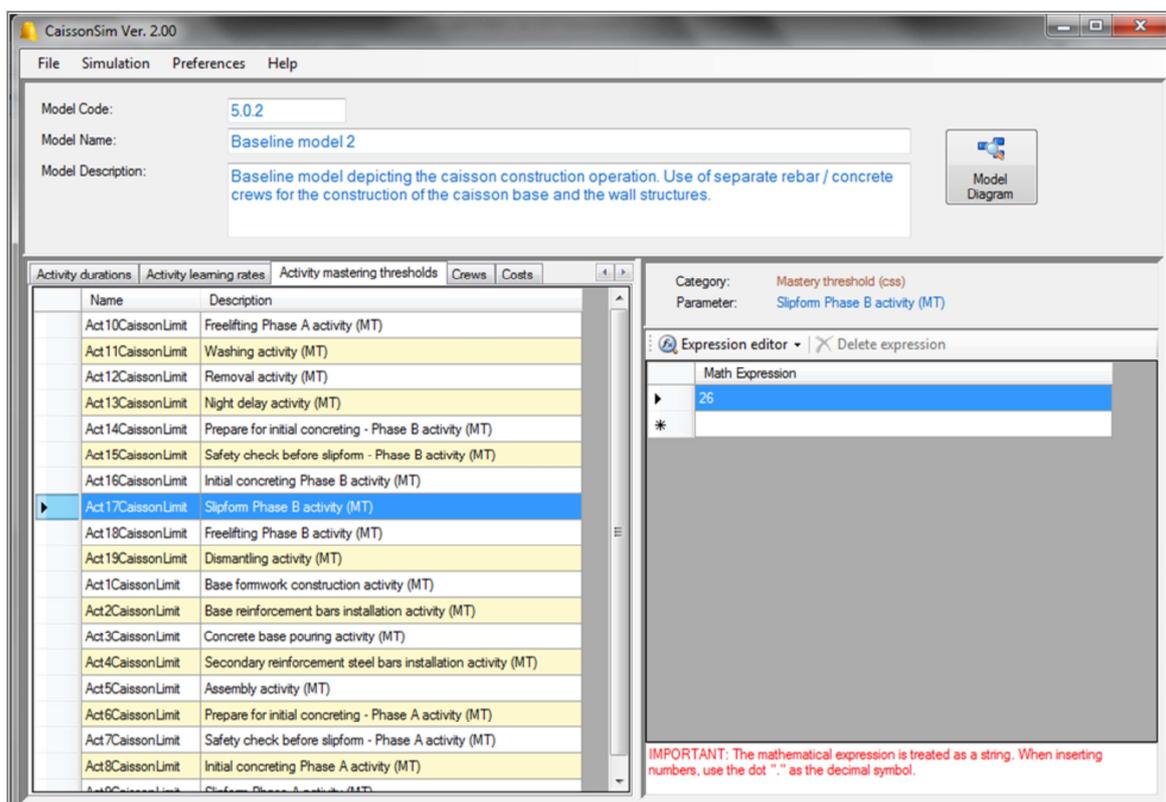
| | | | |
|---------------------|------------------|--|--|
| Act10 (Act10Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Ελεύθερη ολίσθηση – Φάση Α (διάρκεια) | Uniform[45,165]*0.50 |
| Act11 (Act11Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Καθαρισμός – υδροβολή (διάρκεια) | Uniform[20,450] |
| Act12 (Act12Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Καθέλκυση (διάρκεια) | Uniform[40,110] |
| Act13 (Act13Dur) | Normal (Δ.Ε.) | Σταλία νυκτός (διάρκεια) | Uniform[8,10] |
| Act14 (Act14Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Προετοιμασία αρχικής σκυροδέτησης – Φάση Β (διάρκεια) | Uniform[0,21] |
| Act15 (Act15Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Έλεγχος ασφαλείας – Φάση Β (διάρκεια) | 1 |
| Act16 (Act16Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Αρχική σκυροδέτηση – Φάση Β (διάρκεια) | Uniform[200,405] |
| Act17 (Act17Dur) | Normal (Δ.Ε.) | Ολίσθηση – Φάση Β (διάρκεια) | Triangular[65.717,84,304.72]* 10.70 |
| Act18 (Act18Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Ελεύθερη ολίσθηση – Φάση Β (διάρκεια) | Uniform[35,160]*0.50 |
| Act19 (Act19Dur) | Combi (Δ.Ε.) | Αποσυναρμολόγηση (διάρκεια) | Triangular[160,160,377.58] |
| nAbl | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων συναρμολόγησης | 1 |
| nCaisson | Δ.Ε. | Αριθμός caisson που θα κατασκευαστούν | 34 |
| nCncr | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων σκυροδέτησης | 1 |
| nDock | Δ.Ε. | Αριθμός πλωτών δεξαμενών | 1 |
| nDsmntl | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων αποσυναρμολόγησης | 1 |
| nEq | Δ.Ε. | Αριθμός σετ εξοπλισμού ολίσθησης | 1 |
| nForm | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων τοποθέτησης ξύλου | 1 |
| nRebar | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων τοποθέτησης σ.ο. | 1 |
| nRmvl | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων καθέλκυσης | 1 |
| nSCncr | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων σκυροδέτησης κατά την ολίσθηση | 1 |
| nSft | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων ασφαλείας | 1 |
| nSRebar | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων τοποθέτησης σ.ο. κατά την ολίσθηση | 1 |
| nWash | Δ.Ε. | Αριθμός συνεργείων καθαρισμού – υδροβολής | 1 |

*Δ.Ε. = Δεδομένα Εισόδου

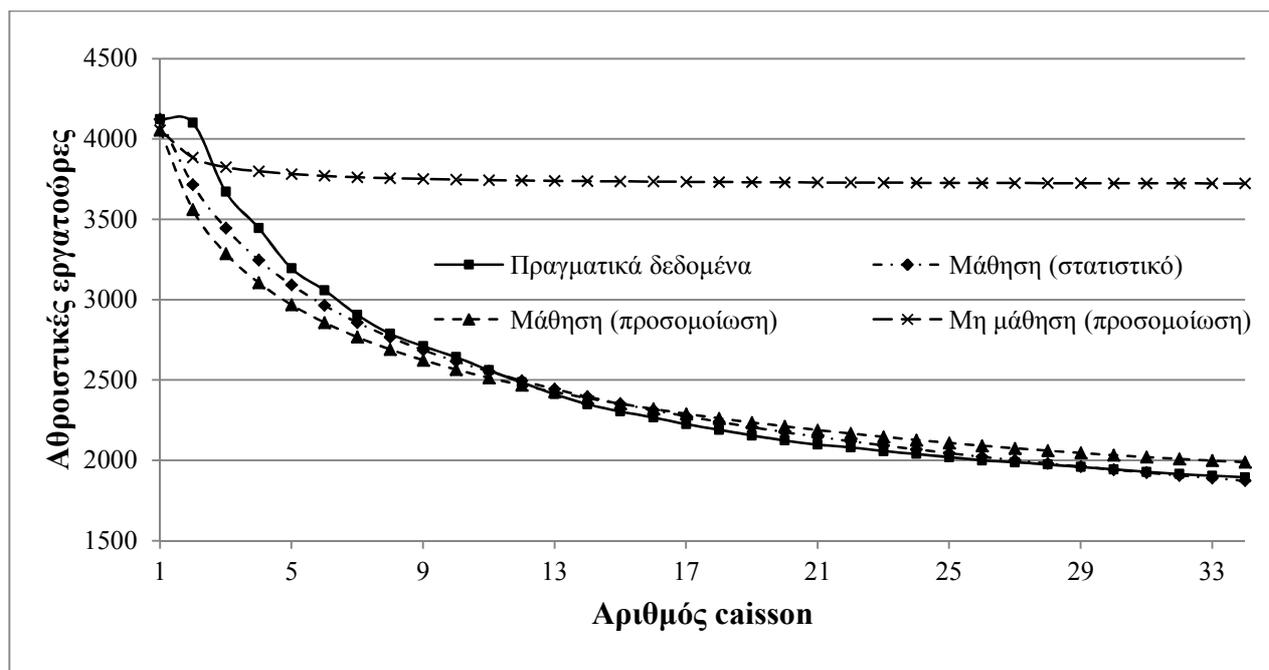
Η υπέρθεση της γραφικής απεικόνισης των πραγματικών δεδομένων, της στατιστικής ανάλυσης και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων της προσομοίωσης απεικονίζονται στο Σχήμα 6.21. Η ανάλυση της προσομοίωσης γίνεται για δύο σενάρια: στο ένα λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα, όπως εκφράζεται μέσα από το φαινόμενο της μάθησης, ενώ στο άλλο αγνοείται η επίδρασή του. Καταρχήν, στο σενάριο όπου αγνοείται η μάθηση (δηλ. ρυθμός μάθησης για όλες τις δραστηριότητες ίσος με 100%), η εκτιμώμενη μέση

αθροιστική παραγωγικότητα είναι ίση με 3.723 wh/caisson, ενώ η αντίστοιχη τιμή για το σενάριο της μάθησης ισούται με 1.988 wh/caisson. Συνεπώς, στην περίπτωση της μάθησης, οι απαιτούμενες εργατοώρες είναι ελαφρώς λιγότερες από τις μισές που απαιτούνται χωρίς την μάθηση. Αυτή η διαπίστωση υποδηλώνει τη σημασία του φαινομένου της μάθησης, που είναι εντονότερο για την κατασκευή των πρώτων 26 caisson και μετά εξασθενεί. Ακόμη, οι μέσες τιμές της στατιστικής ανάλυσης και της προσομοίωσης είναι πολύ κοντά όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.21. Το μέγιστο σφάλμα για την στατιστική ανάλυση ανέρχεται σε 9,40% για την εκτίμηση των πρώτων δύο caisson και το ελάχιστο σφάλμα ανέρχεται σε 0,10% για την εκτίμηση της μέσης αθροιστικής παραγωγικότητας για τα πρώτα τριάντα caisson.

Οι αντίστοιχες τιμές του σφάλματος για την προσομοίωση είναι 13,19% και -0,56% για την αθροιστική μέση διάρκεια κατασκευής των πρώτων δύο και δώδεκα caisson. Η πραγματική τιμή των εργατοωρών που απαιτήθηκαν για την κατασκευή των 34 caisson ήταν 64.403 wh. Η εκτιμηθείσα μέση αθροιστική παραγωγικότητα για την στατιστική ανάλυση υπολογίστηκε ως 1.874wh, συνεπώς η εκτίμηση του συνολικού χρόνου κατασκευής είναι 63.704 wh, δηλ. η διάρκεια του έργου υποεκτιμάται κατά 1,09%. Η προσομοίωση εκτίμησε την τελική διάρκεια κατασκευής ίση με 67.605 wh που υποδηλώνει μία υπερεκτίμηση της διάρκειας κατά 4,97%. Τέλος, ο εκτιμώμενος ρυθμός μάθησης για την συνολική διάρκεια κατασκευής των caisson στο μοντέλο προσομοίωσης πρακτικά συμπίπτει με τον αντίστοιχο ρυθμό που υπολογίζεται με την στατιστική ανάλυση και ισούται με 80,5%.



Σχήμα 6.20: Προσδιορισμός του 26^{ου} caisson ως σημείου τυπικής παραγωγικότητας



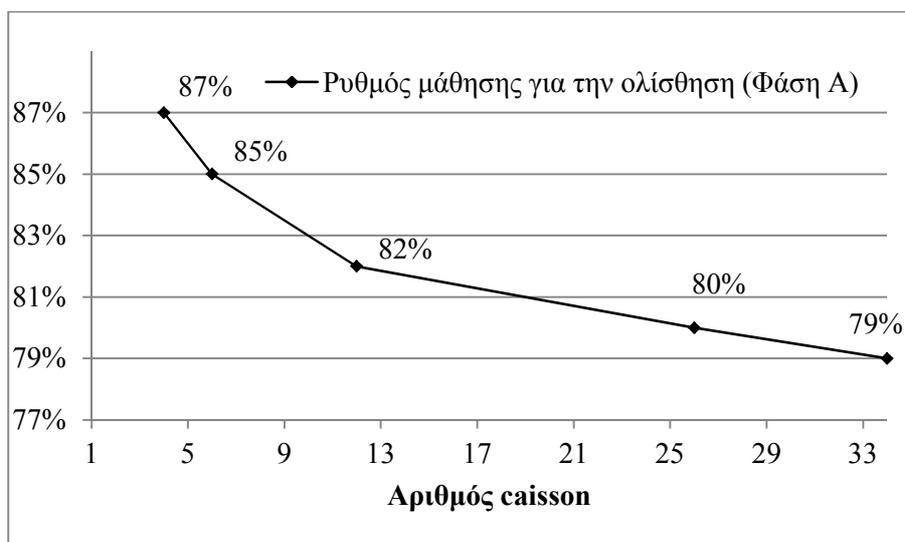
Σχήμα 6.21: Συσχέτιση ιστορικών δεδομένων παραγωγικότητας για την κατασκευή των caisson

6.6.2. Εκτίμηση παραγωγικότητας για μελλοντικές εργασίες

Η ικανότητα πρόβλεψης της παραγωγικότητας είναι πολύ σημαντική για τον χρονικό και οικονομικό προγραμματισμό ενός έργου. Η ερευνητική πρόκληση της πρόβλεψης της μελλοντικής απόδοσης του συστήματος κατασκευής caisson είναι διπλή: πρώτον, θα πρέπει να προσδιοριστεί ο αριθμός των κύκλων παραγωγής των caisson που αντιπροσωπεύει το βέλτιστο σημείο διαχωρισμού ιστορικών δεδομένων και μελλοντικών προβλέψεων. Με άλλα λόγια, θα πρέπει να προσδιοριστεί ο βέλτιστος αριθμός των σημείων διαχωρισμού της παραγωγικότητας που θα δώσουν τις ακριβέστερες προβλέψεις, αν θεωρηθεί ότι αποτελούν το δείγμα ιστορικών δεδομένων. Δεύτερον, η διαδικασία της μοντελοποίησης θα πρέπει να λάβει υπόψη της τον δυναμικά μεταβαλλόμενο ρυθμό μάθησης για όλες τις επιλεχθείσες δραστηριότητες. Η πρώτη ερευνητική πρόκληση θα αντιμετωπιστεί εκτιμώντας την παραγωγικότητα σε διακριτά χρονικά διαστήματα, δηλ. μετά την κατασκευή των πρώτων τεσσάρων, έξι, δώδεκα και είκοσι έξι caisson. Το βέλτιστο σημείο διαχωρισμού του δείγματος ορίζεται ως το χρονικό διάστημα για το οποίο οι εκτιμηθείσες τιμές της παραγωγικότητας είναι πιο κοντά στις πραγματικές τιμές. Η επιλογή των διαστημάτων δικαιολογείται από το γεγονός πως η μεγαλύτερη βελτίωση στην παραγωγικότητα παρατηρείται συνήθως κατά το πρώτο μισό του συνολικού κύκλου παραγωγής, γι' αυτό τον λόγο θα είναι χρήσιμο να διαπιστωθεί η εξέλιξη της παραγωγικότητας κατά την κατασκευή του τέταρτου, έκτου και δωδέκατου caisson. Επιπρόσθετα, δοθέντος ότι η βελτίωση της παραγωγικότητας εξαντλείται κατά την κατασκευή του 26^{ου} caisson, αυτό είναι και το τελευταίο χρονικό διάστημα που λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση.

6.6.2.1 Ανάλυση με βάση την προσομοίωση

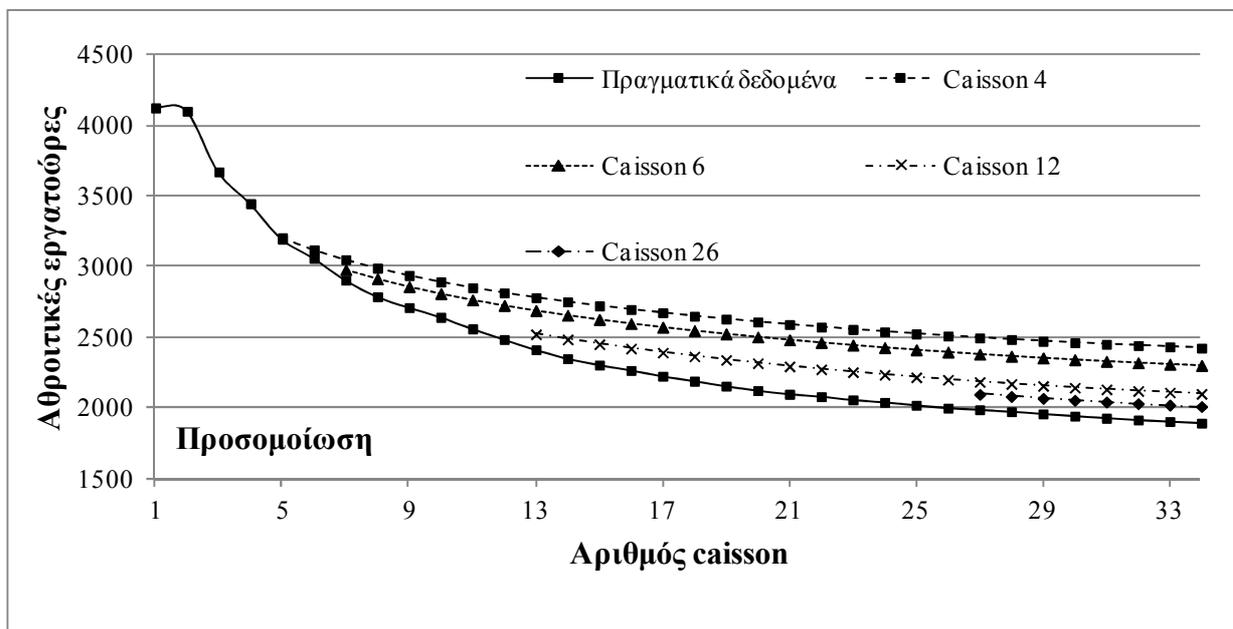
Ο μεταβαλλόμενος ρυθμός μάθησης απαιτεί την εκτίμηση της διακύμανσης της καμπύλης μάθησης για κάθε δραστηριότητα και για κάθε χρονικό διάστημα, έτσι ώστε να διασφαλιστεί η εκτέλεση έγκυρων πειραμάτων προσομοίωσης. Για παράδειγμα, ο ρυθμός μάθησης για τη δραστηριότητα «Ολίσθηση – Φάση Α» μεταβάλλεται σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 6.22. Συνεπώς, η μοντελοποίηση του φαινομένου της μάθησης μετά την κατασκευή του τέταρτου caisson απαιτεί τον καθορισμό του ρυθμού μάθησης με χρήση της τριγωνικής κατανομής ως $\text{Triangular}[0,83;0,87;0,91]$, έτσι ώστε να ενσωματωθεί η διακύμανση $\pm 5\%$ που αναφέρθηκε παραπάνω. Με τον ίδιο τρόπο καθορίζεται ο ρυθμός μάθησης των υπόλοιπων δραστηριοτήτων για όλα τα χρονικά διαστήματα που έχουν οριστεί. Οι προβλέψεις της παραγωγικότητας απεικονίζονται στα διαγράμματα του Σχήματος 6.23. Φαίνεται πως η ακρίβεια στις εκτιμήσεις βελτιώνεται όσο το δείγμα αυξάνεται. Η εκτιμώμενη μέση αθροιστική διάρκεια κατασκευής των caisson μετά την ολοκλήρωση των πρώτων τεσσάρων caisson ήταν 2.425wh/caisson και η συνολική διάρκεια κατασκευής είναι $2.425\text{wh/caisson} \times 34 \text{ caissons} = 82.450\text{wh}$. Συνεπώς, το μοντέλο υπερεκτιμά τον χρόνο κατασκευής κατά 28,02%. Οι εκτιμηθείσες τιμές για τα έξι, δώδεκα και είκοσι έξι caisson είναι 2.301wh, 2.101wh και 2.011wh ανά caisson αντίστοιχα. Ο χρόνος ολοκλήρωσης του έργου και η αντίστοιχη ακρίβεια υπολογίζεται ως 78.234wh (21,47% υπερεκτίμηση), 71.429wh (10,91% υπερεκτίμηση) και 68.371wh (6,16% υπερεκτίμηση) αντίστοιχα. Το πιο ακριβές μοντέλο είναι αυτό που προκύπτει μετά την ολοκλήρωση των 26 caisson ($E_f = 5,8\%$), όπως φαίνεται και από την τιμή του δείκτη E_f στον Πίνακα 6.9. Η πρόβλεψη στα 12 caisson είναι η αμέσως καλύτερη με $E_f = 9,0\%$, ακολουθεί το μοντέλο των 6 caisson με $E_f = 15,6\%$ και, τέλος, το μοντέλο των 4 caisson έχει τον μεγαλύτερο δείκτη $E_f = 19,1\%$. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι, μετά την κατασκευή των πρώτων 12 caisson, η παραγωγικότητα του συστήματος μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια πάνω από 90%. Συνεπώς, το σημείο διαχωρισμού της ιστορικής και μελλοντικής παραγωγικότητας μπορεί να καθοριστεί ως το ένα τρίτο του δείγματος.



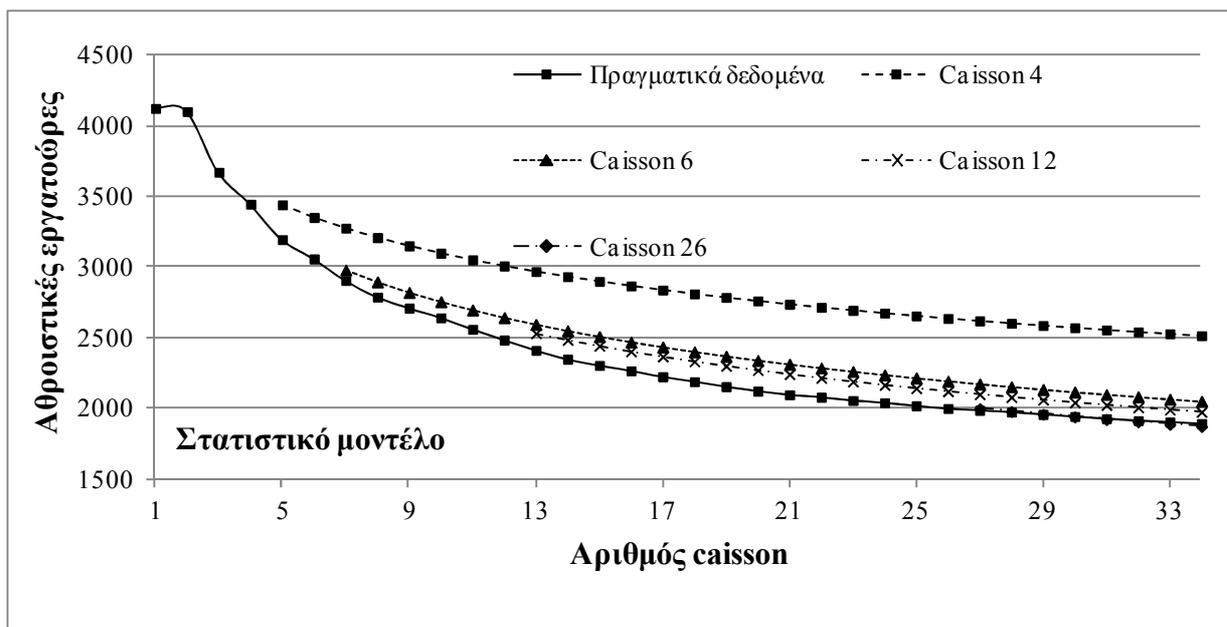
Σχήμα 6.22: Μεταβαλλόμενος ρυθμός μάθησης για τη δραστηριότητα «Ολίσθηση – Φάση Α»

6.6.2.2. Στατιστική ανάλυση

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για την εκτίμηση της παραγωγικότητας φαίνονται στο Σχήμα 6.24. Με παρόμοιο τρόπο, όπως και στην προηγούμενη παράγραφο, όσο περισσότερα δεδομένα παραγωγικότητας ενσωματώνονται στο δείγμα, τόσο βελτιώνεται η ακρίβεια των προβλέψεων. Αυτό οφείλεται στον βελτιούμενο ρυθμό μάθησης που κυμαίνεται στο 87,3% για το μοντέλο των 4 caisson, 82,4% για το μοντέλο των 6 caisson, 81,5% για το μοντέλο των 12 caisson και 80,2% για το μοντέλο των 26 caisson. Ο μέση αθροιστική διάρκεια κατασκευής των caisson προβλέπεται στις 2.515wh, 2.051wh, 1.975wh και 1.872wh βασιζόμενοι σε δεδομένα από την κατασκευή των 4, 6, 12 και 26 caissons αντίστοιχα. Ομοίως, η συνολική διάρκεια του έργου υπολογίζεται στις 85.511wh (32,77% υπερεκτίμηση), 69.724wh (8,26% υπερεκτίμηση), 67.168wh (4,29% υπερεκτίμηση) και 63.659wh (1,16% υποεκτίμηση) αντίστοιχα. Είναι ξεκάθαρο ότι, όπως και πριν, το μοντέλο των 26 caisson είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Η συγκριτική αξιολόγηση των τιμών του δείκτη E_f για την προσομοίωση και την στατιστική προσέγγιση φαίνεται στον Πίνακα 6.9. Στο μοντέλο των 4 caisson υπερισχύει η προσομοίωση, ενώ για τα αντίστοιχα μοντέλα των 6, 12 και 26 caisson η στατιστική προσέγγιση δίνει καλύτερα αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση, μία εκτίμηση με βάση τα πρώτα έξι caisson θα είχε ένα σφάλμα μικρότερο του 10%, υποδεικνύοντας ότι αυτό θα μπορούσε να είναι το σημείο διαχωρισμού ιστορικών δεδομένων και μελλοντικών προβλέψεων.



Σχήμα 6.23: Εκτίμηση της παραγωγικότητας των caisson με χρήση τεχνικών προσομοίωσης



Σχήμα 6.24: Εκτίμηση της παραγωγικότητας των caisson με εφαρμογή της στατιστικής ανάλυσης

Πίνακας 6.9: Τιμές του δείκτη E_f για την ανάλυση προσομοίωσης και την στατιστική προσέγγιση

| Caisson | E_f (Προσομοίωση) (%) | E_f (Στατιστική) (%) |
|---------|-------------------------|------------------------|
| 4 | 19,1 | 26,0 |
| 6 | 15,6 | 8,2 |
| 12 | 9,0 | 5,8 |
| 26 | 5,8 | 4,8 |

6.6.3. Ερμηνεία αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Τα σημαντικότερα συμπεράσματα καθώς και η ερμηνεία των ερευνητικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα συνοψίζονται παρακάτω:

1. Διαπιστώνεται ότι ο συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα, όπως εκφράζεται μέσα από το φαινόμενο της μάθησης, έχει σημαντική επίδραση, τόσο στην κάθε δραστηριότητα, όσο και στη συνολική διαδικασία του κύκλου παραγωγής των caisson. Πιο συγκεκριμένα, από τις έξι δραστηριότητες που αναλύθηκαν, οι ρυθμοί μάθησης της συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης διαφοροποιήθηκαν σε σχέση με τον ρυθμό βελτίωσης της παραγωγικότητας για το σύστημα των caisson. Από την άλλη, οι ρυθμοί μάθησης για την αρχική σκυροδέτηση και την ολίσθηση ήταν πιο κοντά στον συνολικό ρυθμό μάθησης του συστήματος. Αυτή η διαπίστωση ενισχύει την ένδειξη πως η δραστηριότητα της ολίσθησης είναι ο βασικός συντελεστής παραγωγικότητας του κύκλου παραγωγής των caisson. Αν και δεν βρίσκονται σχετικά δεδομένα στη βιβλιογραφία για να γίνει η συγκριτική αξιολόγηση των ρυθμών μάθησης που παρατηρήθηκαν, ο ρυθμός βελτίωσης της παραγωγικότητας υποδεικνύει ότι το φαινόμενο της μάθησης εκδηλώθηκε αρκετά έντονα και είχε ως αποτέλεσμα σημαντικές βελτιώσεις στην παραγωγικότητα.

2. Η εκτίμηση της απόδοσης με χρήση ιστορικών δεδομένων παραγωγικότητας, έδειξε ότι τόσο η στατιστική προσέγγιση, όσο και η προσομοίωση συγκλίνουν γρήγορα στα πραγματικά αποτελέσματα, αφού μετά την κατασκευή του 6^{ου} caisson, το σφάλμα έχει μειωθεί κάτω από 5% και σταδιακά μειώνεται περαιτέρω. Η στατιστική προσέγγιση φαίνεται πως δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα σε σχέση με την προσομοίωση, όμως οι διαφορές ως προς τον αθροιστικό μέσο χρόνο κατασκευής είναι μικρές. Η στατιστική προσέγγιση παρουσιάζει μεγαλύτερη διακύμανση στην πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης σε σχέση με την προσομοίωση, παρόλο που η σύγκλισή της με τα πραγματικά δεδομένα είναι ταχύτερη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.9.
3. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι, η ακρίβεια της προσομοίωσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εγκυρότητα των δεδομένων εισόδου, καθώς αυτά καθορίζουν το σημείο έναρξης με βάση το οποίο εκτιμάται η εκδήλωση του φαινομένου της μάθησης για το σύνολο του κύκλου παραγωγής. Η προσθήκη περισσότερων δεδομένων (δηλ. στοιχείων παραγωγικότητας caisson) στο δείγμα απλώς προσαρμόζει τον ρυθμό μάθησης κάθε δραστηριότητας, οι οποίοι όμως ακολουθούν τις κατανομές πιθανότητας που καθορίζονται πριν από την εκτέλεση της προσομοίωσης. Αντίθετα, η στατιστική προσέγγιση λαμβάνει υπόψη σε κάθε διακριτό χρονικό διάστημα (π.χ. 4, 6, 12 και 26 caisson) την πραγματική παραγωγικότητα των caisson που έχουν κατασκευαστεί, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η μελλοντική απόδοση και οι αντίστοιχοι ρυθμοί μάθησης. Αυτός είναι ίσως ο βασικός λόγος που δικαιολογεί την ταχύτερη σύγκλιση της στατιστικής προσέγγισης σε σχέση με την αντίστοιχη συμπεριφορά του μοντέλου προσομοίωσης.
4. Σε κάθε περίπτωση, φαίνεται πως και για τις δύο προσεγγίσεις, ακριβείς προβλέψεις μπορούν να γίνουν μετά την ολοκλήρωση του 6^{ου} caisson και πριν την έναρξη του 13^{ου} caisson. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι σε σχέση με το πραγματικό χρονοδιάγραμμα του έργου, με την πάροδο του τρίτου μήνα εργασιών, θα είχε δημιουργηθεί μία αρκετά ξεκάθαρη εικόνα της αναμενόμενης παραγωγικότητας για τους επόμενους πέντε μήνες που θα απέμεναν.

6.7. Σύνοψη κεφαλαίου

Σε αυτή την ενότητα περιγράφηκε το μεθοδολογικό πλαίσιο που επιτρέπει τον μετασχηματισμό ενός σεναρίου εκτέλεσης μίας κατασκευαστικής δραστηριότητας σε ισοδύναμα και συγκρίσιμα μαθηματικά μοντέλα διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας. Ο καθορισμός των «συνθηκών βάσης αναφοράς» για κάθε συντελεστή παραγωγικότητας και αντίστοιχο διορθωτικό πολλαπλασιαστή επιτρέπει την στατιστικά έγκυρη συγκριτική αξιολόγηση. Αν και η ανάλυση περιορίστηκε στην εξέταση χωματουργικών δραστηριοτήτων, αποδείχθηκε ότι μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού με μηχανήματα κυκλικής λειτουργίας. Στη συνέχεια η μεθοδολογία γενικεύθηκε για την ανάλυση οποιασδήποτε κατασκευαστικής δραστηριότητας και τον προσδιορισμό νέων συντελεστών παραγωγικότητας. Η εφαρμογή του μεθοδολογικού πλαισίου σε πραγματικές δραστηριότητες κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση της στατιστικής ανάλυσης και των τεχνητών νευρωνικών δικτύων υπέδειξε ότι η

συσχέτιση του λειτουργικού πλαισίου της μελέτης με την παραγωγικότητα είναι κρίσιμη παράμετρος για την αξιοπιστία και την εφαρμοσιμότητα των αποτελεσμάτων.

Ακόμη, αυτή η ενότητα παρουσίασε ένα πλαίσιο ανάλυσης της προσομοίωσης με χρήση του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim* για τη μελέτη των δραστηριοτήτων κατασκευής των caisson. Χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προσομοίωσης STROBOSCOPE και δημιουργήθηκαν επτά πρότυπα μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία ενσωματώθηκαν στη βιβλιοθήκη του συστήματος. Τα πρότυπα μοντέλα αντιπροσωπεύουν διαφορετικές πτυχές της παραγωγικής διαδικασίας. Παρουσιάστηκε η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου καθώς και μία μελέτη περίπτωσης που χρησιμοποιήθηκε για να επικυρώσει την εφαρμοσιμότητα του *CaissonSim* για την ανάλυση κατασκευαστικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Οι αποκρίσεις του συστήματος μελετήθηκαν κάτω από διαφορετικές συνθήκες και μεταβλητές, όπως αριθμός συνεργείων, μέσα παραγωγής και αλληλουχία εκτέλεσης των δραστηριοτήτων. Η ανάλυση απέδειξε ότι ο αυξανόμενος αριθμός των συνεργείων δεν οδηγεί σε ουσιαστική βελτίωση της παραγωγικότητας. Ομοίως, η παράλληλη εκτέλεση των δραστηριοτήτων υδροβολής – καθέλκυσης, είτε για την κατασκευή σε μία φάση, είτε για την αντίστοιχη κατασκευή σε δύο φάσεις δεν βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Τέλος, φάνηκε ότι είναι προτιμότερο η πλωτή αυτοβυθιζόμενη δεξαμενή να είναι διαθέσιμη για την κατασκευή της επόμενης πλάκας θεμελίωσης το συντομότερο δυνατόν, παρά να επιδιώκεται η ολοκλήρωση ενός caisson εξ' ολοκλήρου επάνω στην πλωτή δεξαμενή.

Τέλος, περιγράφηκε η διερεύνηση της επίδρασης του ρυθμού μάθησης στην κατασκευή των caisson. Η αξιολόγηση ιστορικών στοιχείων παραγωγικότητας για την κατασκευή των caisson ερμηνεύεται ικανοποιητικά από την εφαρμογή της θεωρίας καμπυλών μάθησης. Ομοίως, η πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης είναι ακριβής μετά την ολοκλήρωση λιγότερου από το ένα τρίτο του συνόλου των κύκλων παραγωγής. Τόσο η στατιστική προσέγγιση, όσο και η προσομοίωση δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, αν και το επίπεδο της ακρίβειας και η διακύμανση των αποτελεσμάτων διαφέρει. Η μελέτη περίπτωσης δείχνει ξεκάθαρα τη χρησιμότητα της εφαρμογής της καμπύλης μάθησης για την κατασκευή των caisson, παρά την έλλειψη αντίστοιχων δεδομένων στη βιβλιογραφία. Η μελέτη υποστηρίχθηκε σε πολύ μεγάλο βαθμό από το πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης *CaissonSim*, καθώς η χρησιμοποίησή του διασφάλισε την εγκυρότητα του μοντέλου, ενώ προσέδωσε ευελιξία στην εξέταση διαφορετικών τιμών των κρίσιμων παραμέτρων. Η μελέτη και άλλων δραστηριοτήτων ίδιας ή παρόμοιας φύσης θα βοηθήσει στην ενίσχυση της αξιοπιστίας των συμπερασμάτων της έρευνας και στον προσδιορισμό των δυνατοτήτων γενίκευσης των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

Κεφάλαιο 7 Συμπεράσματα

7.1. Σκοπός

Η ενότητα παρουσιάζει μία συνοπτική επισκόπηση της έρευνας που εκπονήθηκε στο πλαίσιο της διατριβής, περιγράφει τα κυριότερα συμπεράσματα της έρευνας, αναφέρεται στην ερευνητική συμβολή της διατριβής και διατυπώνει προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση.

7.2. Σύνοψη της ερευνητικής προσπάθειας

Η έρευνα που εκπονήθηκε και περιγράφηκε στα προηγούμενα κεφάλαια της διατριβής αποσκοπεί στην ικανοποίηση των τεσσάρων βασικών στόχων που διατυπώθηκαν στην ενότητα §1.4 και παρατίθενται για λόγους εποπτικότητας παρακάτω:

1. Ανάλυση των δημοσιευμένων μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας με σκοπό τη συγκριτική τους αξιολόγηση.
2. Μέτρηση των συντελεστών παραγωγικότητας με στατιστικά έγκυρο τρόπο σε εργοταξιακές συνθήκες για μετέπειτα χρήση τους στις μεθόδους εκτίμησης της παραγωγικότητας.
3. Διατύπωση στοχαστικού μοντέλου για τον ακριβέστερο προσδιορισμό της επιρροής των συντελεστών παραγωγικότητας με χρήση πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης.
4. Ενσωμάτωση του ρυθμού μάθησης στο στοχαστικό μοντέλο για την καλύτερη απεικόνιση της επιρροής του ανθρώπινου παράγοντα.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων και δοθέντων των ευνοϊκών συνθηκών αλλά και των περιορισμών της έρευνας (§ 1.6), η ερευνητική εργασία της διατριβής διαχωρίστηκε εννοιολογικά σε επτά ενότητες:

1. **Η ανάλυση μεθόδων εκτίμησης παραγωγικότητας** με σκοπό την καλύτερη κατανόηση των διαφορετικών μοντέλων παραγωγικότητας (παραγοντικό, αθροιστικό) για δραστηριότητες έντασης εξοπλισμού και έντασης εργασίας, τις τεχνικές μέτρησης της παραγωγικότητας, τους βασικούς συντελεστές επιρροής της, καθώς και τους τρόπους ανάλυσης της παραγωγικότητας (στατιστική ανάλυση, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, προσομοίωση). Το Κεφάλαιο 2 εξετάζει τις σχετικές έννοιες με λεπτομέρεια και καθορίζει τον τρόπο και το πλαίσιο εφαρμογής τους στην διατριβή.
2. **Η διατύπωση της ερευνητικής μεθοδολογίας** με σκοπό την πληρέστερη αντιμετώπιση του θέματος της διατριβής και των αντίστοιχων στόχων, που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 1. Η μεθοδολογία της έρευνας περιγράφεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.
3. **Η διατύπωση μεθοδολογίας για την συγκριτική αξιολόγηση γνωστών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας.** Η μεθοδολογία συμβάλλει στον προσδιορισμό των αντίστοιχων διορθωτικών πολλαπλασιαστών των συντελεστών παραγωγικότητας που λαμβάνονται υπόψη (π.χ. γωνία στροφής, βάθος εκσκαφής), με βάση τον μετασχηματισμό τους σε μαθηματικά ισοδύναμα λειτουργικά σενάρια, για

κάθε μέθοδο που εφαρμόζεται (π.χ. Caterpillar, Komatsu, BML). Οι σχετικές έννοιες αναλύονται στην ενότητα §4.3.

4. **Η διατύπωση μεθοδολογίας για τη μέτρηση και συγκριτική αξιολόγηση άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας**, με σκοπό τον προσδιορισμό των διορθωτικών πολλαπλασιαστών και τον καθορισμό των συνθηκών βάσης αναφοράς για κάθε συντελεστή αναπτύσσοντας (α) στατιστικά μοντέλα και (β) μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Οι σχετικές έννοιες αναλύονται στην ενότητα §4.4.
5. **Ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η αξιολόγηση στοχαστικού μοντέλου εκτίμησης της παραγωγικότητας με βάση την προσομοίωση και ανάπτυξη πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης (*CaissonSim*) για την κατασκευή κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα.** Η αναλυτική περιγραφή της δομής του στοχαστικού μοντέλου, η ενσωμάτωσή του στο πρωτότυπο λογισμικό *CaissonSim* και τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του αναφέρονται στην ενότητα §5.4.
6. **Η επέκταση του στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης και του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim*, έτσι ώστε να ενσωματωθεί ο στοχαστικός συντελεστής ανθρώπινου παράγοντα, όπως εκφράζεται από τον ρυθμό μάθησης**, σε κάθε δραστηριότητα του μοντέλου, τόσο για την αποτίμηση, όσο και για την εκτίμηση της παραγωγικότητας. Οι σχετικές αναφορές γίνονται στην ενότητα §5.5.
7. **Η αξιολόγηση της έρευνας μέσα από έναν συνδυασμό ερευνητικών προσεγγίσεων όπως αναφέρεται λεπτομερέστερα στην ενότητα §6:** (i) θεωρητική διερεύνηση της συγκριτικής αξιολόγησης των γνωστών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας για δραστηριότητες εκσκαφής με χρήση υδραυλικού εκσκαφέα, (ii) μελέτη περίπτωσης για την μέτρηση συντελεστών παραγωγικότητας με στατιστικά έγκυρο τρόπο σε εργοταξιακές συνθήκες για δραστηριότητες κατασκευής δαπέδων βαρέως τύπου από οπλισμένο σκυρόδεμα και (iii) μελέτη περίπτωσης για την αξιολόγηση του στοχαστικού μοντέλου παραγωγικότητας και του αντίστοιχου πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim*, καθώς και την ενσωμάτωση του στοχαστικού συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα στην προσομοίωση για δραστηριότητες κατασκευής κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson) σε μεγάλο λιμενικό έργο υποδομής.

Ως αποτέλεσμα της ερευνητικής εργασίας προέκυψαν μία σειρά από συμπεράσματα, τα οποία απαριθμούνται στην επόμενη ενότητα.

7.3. Παρουσίαση συμπερασμάτων

Τα συμπεράσματα κάθε αυτοτελούς ενότητας της έρευνας συνοψίζονται αμέσως μετά την ολοκλήρωση της σχετικής ερευνητικής εργασίας (δες σχετικές παραγράφους στις προηγούμενες ενότητες). Όμως, για λόγους πληρότητας, επαναδιατυπώνονται παρακάτω σε πληρέστερη μορφή. Ακόμη, διατυπώνονται περαιτέρω συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν από την συνδυαστική αξιολόγηση και την εννοιολογική επέκταση των ερευνητικών ευρημάτων που έχουν παρουσιαστεί στις προηγούμενες ενότητες. Πιο συγκεκριμένα, τα κυριότερα συμπεράσματα της έρευνας, ανά θεματική ενότητα της διατριβής, είναι τα εξής:

7.3.1. Μεθοδολογία για την συγκριτική αξιολόγηση γνωστών συντελεστών παραγωγικότητας

1. Η ερευνητική εργασία απέδειξε ότι η παραγωγικότητα κατασκευαστικών δραστηριοτήτων εμφανίζει σημαντική ευαισθησία όσον αφορά στον τύπο των συντελεστών παραγωγικότητας και τη μορφή των εκτιμητικών μεθόδων που εφαρμόζονται. Η προτεινόμενη μεθοδολογία καθορίζει ένα δομημένο πλαίσιο για τη σύγκριση διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας. Όπως φάνηκε και από το παράδειγμα εφαρμογής, η χρησιμότητα της μεθοδολογίας σχετίζεται με την ικανότητα ενσωμάτωσης των φυσικών παραμέτρων εκτέλεσης της εργασίας (π.χ. βάθος εκσκαφής, γωνία στροφής) που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη για τον χρονικό και οικονομικό προγραμματισμό ενός έργου.
2. Η διατυπωθείσα μεθοδολογία αποτελεί ένα πρακτικό και εύκολα εφαρμόσιμο εργαλείο υπολογισμού με σκοπό την εξέταση της επιρροής διαφορετικών συντελεστών παραγωγικότητας κάτω από διαφορετικές λειτουργικές συνθήκες.
3. Το παράδειγμα της θεωρητικής διερεύνησης περιορίστηκε στην εξέταση χωματουργικών εργασιών, όμως η εφαρμογή της μεθοδολογίας μπορεί να επεκταθεί στην ανάλυση συντελεστών παραγωγικότητας και άλλων κατασκευαστικών δραστηριοτήτων με τη χρήση μηχανικού εξοπλισμού κυκλικής λειτουργίας (π.χ. φορτωτής, προωθητής, αποξεστικό όχημα).
4. Θα μπορούσε να διατυπωθεί ο ισχυρισμός ότι η απευθείας χρήση πραγματικών μετρήσεων χρόνου κύκλου υπερτερεί σε σχέση με την προσαρμογή θεωρητικών τιμών χρόνου κύκλου μέσω διορθωτικών πολλαπλασιαστών. Όμως, η παραμετρική εκτίμηση της παραγωγικότητας δημιουργεί ένα υπόβαθρο για την εξέταση διαφορετικών λειτουργικών σεναρίων και μεθόδων κατασκευής με τη χρήση δεικτών, όπως το μέγεθος του στόλου των φορητών οχημάτων και η διακύμανση του μοναδιαίου κόστους των δραστηριοτήτων. Η λήψη αποφάσεων που σχετίζεται με τέτοιας φύσης συντελεστές παραγωγικότητας είναι προτιμότερο να στηρίζεται στην σαφή κατανόηση κάθε μίας από τις φυσικές παραμέτρους που υπεισέρχονται στην ανάλυση.
5. Μία ακόμα συμβολή της μεθοδολογίας στην Λειτουργική Ανάλυση είναι ο καθορισμός του πειραματικού πλαισίου για την μέτρηση και επικύρωση των τιμών των συντελεστών παραγωγικότητας επί τόπου του έργου. Έτσι, η συλλογή στατιστικά έγκυρων και πραγματικών δεδομένων παραγωγικότητας μπορεί να μετουσιωθεί σε μία δυναμική βάση δεδομένων πραγματικών διορθωτικών πολλαπλασιαστών με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, όπως γεωγραφική θέση, τύπος εξοπλισμού, χαρακτηριστικά της μεθόδου εργασίας κ.ο.κ. Ανάλογα με τον όγκο, την προέλευση και την ποικιλία τους, τα συλλεχθέντα στοιχεία, μπορούν να αποτελέσουν την βάση αναφοράς για τον χρονικό και οικονομικό προγραμματισμό μελλοντικών δραστηριοτήτων.
6. Η αξιολόγηση της επιρροής κάθε συντελεστή παραγωγικότητας εμπεριέχει στοιχεία ασάφειας, δοθείσης της μεγάλης διακύμανσης στις τιμές παραγωγικότητας κατασκευαστικών δραστηριοτήτων. Εναλλακτικά, η εφαρμογή διαφορετικών τεχνικών ανάλυσης (π.χ. στατιστική, στοχαστική – προσομοίωση) στο πλαίσιο της διατυπωθείσας μεθοδολογίας δημιουργεί μεγαλύτερη αξιοπιστία στα αποτελέσματα, όπως άλλωστε φάνηκε και στις σχετικές ενότητες της διατριβής. Σε κάθε περίπτωση όμως, ο προσδιορισμός της καταλληλότερης

μεθόδου εκτίμησης παραγωγικότητας (π.χ. BML, Caterpillar, Komatsu) εξαρτάται από την ικανότητα πρόβλεψης και τις θεωρητικές της παραδοχές.

7. Η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε συνδυασμό με την βάση δεδομένων ιστορικών στοιχείων παραγωγικότητας θα βελτιώσει την αξιοπιστία της ανάλυσης μακροσκοπικά. Σε βάθος χρόνου, η καταλληλότητα της κάθε γνωστής μεθόδου εκτίμησης της παραγωγικότητας θα προσδιοριστεί με βάση τη σύγκριση των εκτιμήσεων και των πραγματικών αποτελεσμάτων από την ανάλυση των δεδομένων παραγωγικότητας ολοκληρωμένων τεχνικών έργων και των αντίστοιχων δραστηριοτήτων.
8. Η διατύπωση της έννοιας των «συνθηκών βάσης αναφοράς» (ΣΒΑ) για κάθε συντελεστή παραγωγικότητας αποτελεί στοιχείο ουσιαστικής διαφοροποίησης και ερευνητικής συμβολής της διατριβής. Η χρήση των ΣΒΑ επέτρεψε τον μετασχηματισμό κάθε λειτουργικού σεναρίου σε ισοδύναμα μαθηματικά μοντέλα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας.

7.3.2. Μεθοδολογία για τη μέτρηση και συγκριτική αξιολόγηση άγνωστων συντελεστών παραγωγικότητας

1. Η μελέτη απέδειξε ότι η διατύπωση ενός δομημένου μεθοδολογικού πλαισίου για την εκτίμηση της παραγωγικότητας μεταφράζεται σε συγκεκριμένα και πρακτικά βήματα που πρέπει να εφαρμοστούν για να παράσχουν πλήρη έλεγχο της υπολογιστικής διαδικασίας. Επιπρόσθετα, διαφάνηκε η σημασία της αποσαφήνισης του πλαισίου εκτέλεσης της κάθε δραστηριότητας, καθώς η εξέταση διαφορετικών λειτουργικών σεναρίων προϋποθέτει την εφαρμογή συγκεκριμένων διαδικασιών για τον υπολογισμό των διορθωτικών πολλαπλασιαστών. Μόνο με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξασφαλιστεί ότι η ανάλυση θα δώσει έγκυρα και συγκρίσιμα αποτελέσματα. Το περιορισμένο στατιστικό δείγμα δεν περιορίζει την αξιοπιστία της έρευνας. Σε κάθε περίπτωση όμως, όταν ο πίνακας κατανομής δεδομένων περιέχει κελιά, όπου ο αριθμός των δεδομένων είναι μικρός, τότε προτείνονται δύο λύσεις: είτε συγχώνευση των κελιών, έτσι ώστε να αυξηθεί ο αριθμός των δεδομένων, είτε εφαρμογή των στατιστικών μοντέλων ως «γεννιότερες» νέων δεδομένων για τα συγκεκριμένα λειτουργικά σενάρια.
2. Ο αναλυτικός προσδιορισμός των διορθωτικών πολλαπλασιαστών επιτρέπει την δυναμική παραμετροποίηση της υπολογιστικής διαδικασίας, καθώς η ανάλυση μπορεί εύκολα να φύγει από τις «συνθήκες βάσης αναφοράς» και να περάσει σε άλλα λειτουργικά σενάρια. Με αυτόν τον τρόπο ποσοτικοποιείται η κάθε μεταβολή στις συνθήκες εργασίας από την πλευρά της παραγωγικότητας, δεδομένου ότι κάθε διορθωτικός πολλαπλασιαστής σχετίζεται απευθείας με κάποιον συντελεστή παραγωγικότητας: στην περίπτωση που εξετάστηκε ήταν το πλάτος και το μήκος εργασίας. Σε κάθε περίπτωση, θα πρέπει να τονιστεί ότι το πεδίο εφαρμογής της ανάλυσης περιορίζεται από τους συντελεστές παραγωγικότητας και τις αντίστοιχες ιδιότητές τους, έτσι όπως αυτές ορίζονται στον πίνακα κατανομής δεδομένων. Οποιαδήποτε γενίκευση πέρα από αυτά τα χαρακτηριστικά μεγέθη δεν είναι στατιστικά αποδεκτή.

3. Η ερευνητική συμβολή από την «διάσπαση» του ενιαίου διορθωτικού πολλαπλασιαστή σε επί μέρους πολλαπλασιαστές ανά συντελεστή παραγωγικότητας είναι διπλή: πρώτον, επέτρεψε την μελέτη της επιρροής των επιλεγμένων συντελεστών στην παραγωγικότητα. Η μεθοδολογία δεν περιορίζεται στον αριθμό των συντελεστών παραγωγικότητας, καθώς μπορεί συμπεριλάβει περισσότερους από δύο συντελεστές, ανάλογα με τις ανάγκες της ανάλυσης. Δεύτερον, η μεθοδολογία αξιολογεί την επιρροή του πειραματικού πλαισίου στην παραγωγικότητα σε σχέση με μία συγκεκριμένη μεταβλητή. Ο όρος «πειραματικό πλαίσιο» αφορά στην κατάσταση των συντελεστών παραγωγικότητας που δεν περιλαμβάνονται στην ανάλυση ευαισθησίας. Συνεπώς, είναι ξεκάθαρο ότι δεν επαρκεί η διακύμανση των τιμών των συντελεστών και η εκτίμηση της επιρροής τους στην παραγωγικότητα, εάν ο μηχανικός δεν γνωρίζει ή δεν μπορεί να «ελέγξει» την μεταβαλλόμενη κατάσταση των υπόλοιπων συντελεστών παραγωγικότητας του μοντέλου. Θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι όλοι οι συντελεστές που δεν συμμετέχουν στην ανάλυση βρίσκονται σε συνθήκες βάσης αναφοράς, έτσι ώστε να μπορεί να αγνοηθεί η επιρροή τους στην παραγωγικότητα. Αυτό σημαίνει ότι ο διορθωτικός πολλαπλασιαστής f_x θα πρέπει να ισούται με την μονάδα για όλους τους συντελεστές παραγωγικότητας, εκτός από αυτούς που ερευνώνται. Σε κάθε άλλη περίπτωση θα πρέπει να εξετάζεται με προσεκτικό και συγκεκριμένο τρόπο η μετάβαση από τις «συνθήκες βάσης αναφοράς» σε άλλα λειτουργικά σενάρια στον πίνακα κατανομής δεδομένων, όπως τονίστηκε στην παράγραφο της μελέτης περίπτωσης για την κατασκευή δαπέδων βαρέως τύπου από οπλισμένο σκυρόδεμα (ενότητα §6.4.1).
4. Η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για δραστηριότητες έντασης εργασίας, όσο και για δραστηριότητες έντασης μηχανικού εξοπλισμού. Βασική και ουσιαστική προϋπόθεση για την εφαρμογή της αποτελεί η μαθηματική διατύπωση της σχέσης υπολογισμού της παραγωγικότητας με χρήση της γενικευμένης εξίσωσης του παραγοντικού μοντέλου (§2.5).

7.3.3. Ανάπτυξη στοχαστικού μοντέλου και πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim*

1. Το κατασκευαστικό σύστημα που μοντελοποιήθηκε δεν έχει εξεταστεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, παρόλο που βρίσκει αρκετές εφαρμογές στα σύγχρονα λιμενικά έργα. Ουσιαστικά όλη η διαδικασία παραγωγής των caisson δεν έχει μελετηθεί ξανά σε αυτό το επίπεδο λεπτομέρειας. Ταυτόχρονα, το επίπεδο της αφαίρεσης (abstraction level) του μοντέλου είναι τέτοιο που επιτρέπει την εφαρμογή των προτύπων προσομοίωσης και σε άλλα έργα με διαφορετικές λειτουργικές διατάξεις και παραγωγικές διαδικασίες, καθώς οι βασικές αρχές της μεθοδολογίας κατασκευής παραμένουν οι ίδιες. Με αυτόν τον τρόπο, η μοντελοποίηση του συστήματος μπορεί να επεκταθεί και να εφαρμοστεί, μετά από κατάλληλες προσαρμογές, όχι μόνο στην κατασκευή των caisson, αλλά και στην κατασκευή σιλό, καμινάδων, πυλώνων γεφυρών και πλατφορμών πετρελαίου, καθώς και για την κατασκευή πολυώροφων κτιρίων, όπου η μέθοδος του ολισθαίνοντα μεταλλότυπου χρησιμοποιείται αρκετά συχνά.
2. Το πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης που αναπτύχθηκε αποτελεί ένα σύστημα προσομοίωσης ειδικού σκοπού (special purpose simulation system), με φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον και σκοπό την

αυτοματοποίηση της διαδικασίας της προσομοίωσης. Η ενσωματωμένη βιβλιοθήκη των μοντέλων προσομοίωσης μειώνει τις απαιτήσεις μοντελοποίησης εκ μέρους των χρηστών.

3. Αν και θα μπορούσε να ειπωθεί ότι το μοντέλο περιορίζει την ευελιξία στην μοντελοποίηση, καθώς τα περιεχόμενα πρότυπα μοντέλα δεν είναι επεξεργάσιμα, παρόλα αυτά, τα διαφορετικά πρότυπα αντιπροσωπεύουν βασικές επιλογές στον τρόπο εκτέλεσης των εργασιών, όπως αλλαγές στην αλληλουχία εκτέλεσης των δραστηριοτήτων, την στρατηγική χρήσης των μέσων παραγωγής και εναλλακτικές κατασκευαστικές μεθόδους, που συναντώνται συχνά στην πράξη.
4. Ο γεννήτορας διαφορετικών εναλλακτικών συνδυασμών επιτρέπει την εκ των προτέρων διερεύνηση πιθανών σεναρίων υλοποίησης. Έτσι, τα διαφορετικά σενάρια εφαρμογής εξετάζονται με στατιστικά έγκυρο και κατανοητό τρόπο, χωρίς να επιφορτίζουν τον χρήστη με περιττή πληροφορία. Η επιλογή του εύρους της ανάλυσης εκ μέρους των χρηστών με την επιβολή «φίλτρου» στα αποτελέσματα διευκολύνει την μελέτη συγκεκριμένων λειτουργικών σεναρίων και των αντίστοιχων κρίσιμων συντελεστών παραγωγικότητας.
5. Ο σαφής προσδιορισμός του πειραματικού πλαισίου, όπως διαμορφώνεται από τον γεννήτορα των εναλλακτικών σεναρίων, επιτρέπει στο *CaissonSim* να δίνει αποτελέσματα προσομοίωσης με ακριβές πεδίο εφαρμογής. Το *CaissonSim* δεν εκμεταλλεύεται απλώς τον μεγάλο αριθμό δεδομένων που έχουν συλλεχθεί, αλλά εφαρμόζει ένα αυστηρό πρωτόκολλο για τη διερεύνηση των στατιστικών ιδιοτήτων των δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι η ενσωμάτωση κάθε στοιχείου δεδομένων στην ανάλυση δεν λειτουργεί σε βάρος της εγκυρότητας της έρευνας. Η εφαρμογή ενός τέτοιου μεθοδολογικού πλαισίου ήταν ο κύριος λόγος που οδήγησε στην στατιστικά έγκυρη επεξεργασία του ισχυρά διαφοροποιημένου συνόλου δεδομένων, όπως έδειξε η μελέτη περίπτωσης.
6. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η εφαρμογή της προσδιοριστικής προσέγγισης στο σύνολο των δεδομένων, χωρίς να ληφθεί υπόψη το εννοιολογικό πλαίσιο, του οποίου κύρια παράμετρος είναι ο ρυθμός ολίσθησης, θα μπορούσε να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα. Αυτό θα συνέβαινε καθώς η μεγάλη διακύμανση των δεδομένων θα περιόριζε τόσο την ακρίβεια, όσο και την εφαρμοσιμότητα των αποτελεσμάτων. Η εφαρμογή της προσομοίωσης σε συνδυασμό με την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων επιτρέπει τη μοντελοποίηση και τη μελέτη της στοχαστικής φύσης της ολίσθησης, που αποτελεί και την βασική δραστηριότητα του συστήματος.

7.3.4. Ενσωμάτωση του συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα στην προσομοίωση

1. Η απευθείας συγκριτική αξιολόγηση της στατιστικής προσέγγισης και της προσομοίωσης για την ανάλυση του συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα μέσω της εφαρμογής της θεωρίας των καμπύλων μάθησης πραγματοποιείται για πρώτη φορά και θα πρέπει να τονιστεί ότι διαφοροποιείται τόσο το εύρος της ανάλυσης, όσο και το μεθοδολογικό πλαίσιο. Όσον αφορά στο εύρος της ανάλυσης, η στατιστική προσέγγιση διενεργείται στο επίπεδο της διαδικασίας του κύκλου παραγωγής και ο βαθμός μάθησης εκτιμάται για το σύνολο των δραστηριοτήτων που τον απαρτίζουν. Αν και ο ρυθμός μάθησης κάθε

δραστηριότητας μπορεί να υπολογιστεί, η στατιστική προσέγγιση δεν τον συσχετίζει με την συνολική απόδοση του έργου. Από την άλλη πλευρά, η προσομοίωση εκτελείται στο επίπεδο της κάθε δραστηριότητας. Συνεπώς, κάθε δραστηριότητα έχει τον δικό της ρυθμό μάθησης και η συνολική απόδοση του έργου εκτιμάται ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασής τους στο πλαίσιο του πειράματος της προσομοίωσης.

2. Όσον αφορά στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων, η στατιστική προσέγγιση είναι πιο ακριβής, όμως αποτελεί ένα πιο άκαμπτο πλαίσιο ανάλυσης, όπου οι βασικές παράμετροι υπολογισμού μπορούν να διαφοροποιηθούν μόνο ως προς το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται (π.χ. ευθύγραμμο μοντέλο) και τον τύπο των δεδομένων (π.χ. μοναδιαία ή αθροιστικά). Η προσομοίωση είναι πιο ευέλικτη όσον αφορά στην εξέταση διαφορετικών λειτουργικών σεναρίων και το γεγονός πως κάθε ρυθμός μάθησης αντιστοιχίζεται σε μία συγκεκριμένη δραστηριότητα, έχει ως αποτέλεσμα της παροχή μίας πιο ρεαλιστικής απεικόνισης του συστήματος που μελετάται. Όμως, η μεγαλύτερη ευελιξία στην μοντελοποίηση και την ανάλυση του συστήματος φαίνεται πως λειτουργεί εις βάρος της ακρίβειας, καθώς επιφέρει μεγαλύτερη διακύμανση στα αποτελέσματα της παραγωγικότητας.
3. Στη βάση των παραπάνω διαπιστώσεων δεν μπορεί να εκτιμηθεί με βεβαιότητα ποια προσέγγιση είναι η καταλληλότερη, καθώς αυτό εξαρτάται κυρίως από τα κριτήρια της αξιολόγησης. Συνεπώς, πιστεύεται ότι είναι καλύτερο να εφαρμόζονται και οι δύο προσεγγίσεις συμπληρωματικά, καθώς έτσι δημιουργείται ένα ισχυρό πλαίσιο ανάλυσης, το οποίο εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα της κάθε μεθόδου. Ο τρόπος εφαρμογής των αποτελεσμάτων εξαρτάται από την προσωπική κρίση και προτίμηση του μηχανικού με την προϋπόθεση ότι είναι γνωστό το πεδίο προέλευσης των δεδομένων και οι περιορισμοί της κάθε μεθόδου.

7.4. Η ερευνητική συμβολή της διατριβής

Η ερευνητική συμβολή της διατριβής μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε δύο βασικές ερευνητικές περιοχές του χρονικού και οικονομικού προγραμματισμού των τεχνικών έργων: (α) την διατύπωση μεθοδολογίας που συσχετίζει με στατιστικά έγκυρο τρόπο διαφορετικές μεθόδους εκτίμησης παραγωγικότητας και, επεκτεινόμενη, συμβάλει στον εκ νέου προσδιορισμό και τη συγκριτική αξιολόγηση των αντίστοιχων διορθωτικών πολλαπλασιαστών για άγνωστους συντελεστές παραγωγικότητας με χρήση προσδιοριστικών μεθόδων και (β) την εφαρμογή της προσομοίωσης, μέσω ενός στοχαστικού μοντέλου και του αντίστοιχου πρωτότυπου λογισμικού, σε κατασκευαστικές δραστηριότητες με τη χρήση μεθόδων που δεν έχουν εφαρμοστεί ξανά στο παρελθόν για την αποτίμηση και την εκτίμηση της παραγωγικότητας. Οι επόμενες παράγραφοι περιγράφουν λεπτομερώς τον τρόπο με τον οποίο η ερευνητική συμβολή εξειδικεύεται για κάθε μία από τις θεματικές ενότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω:

7.4.1. Μεθοδολογία για την συγκριτική αξιολόγηση της παραγωγικότητας

Η συμβολή της διατριβής αφορά τους παρακάτω βασικούς άξονες:

1. Συμβολή στη θεωρία της Λειτουργικής Ανάλυσης μέσω της διατύπωσης μεθοδολογίας για την ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση γνωστών μεθόδων εκτίμησης παραγωγικότητας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η αξιολόγηση της αξιοπιστίας και του πεδίου εφαρμογής των αποτελεσμάτων τους.
2. Διατύπωση της έννοιας των «συνθηκών βάσης αναφοράς» (ΣΒΑ) που επιτρέπει τον εννοιολογικό μετασχηματισμό οποιουδήποτε κατασκευαστικού σεναρίου σε ισοδύναμα μαθηματικά μοντέλα, έτσι ώστε να είναι δυνατή η συγκριτική αξιολόγηση διαφορετικών μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας με στατιστικά έγκυρο τρόπο.
3. Διατύπωση μεθοδολογίας για την μέτρηση επί τόπου του έργου των διορθωτικών πολλαπλασιαστών της παραγωγικότητας ανεξάρτητα από τον τύπο των δραστηριοτήτων, το πλήθος των συντελεστών παραγωγικότητας και τη φύση των εργασιών. Η μόνη προϋπόθεση είναι η δυνατότητα της υπό μελέτη κατασκευαστικής μεθόδου να διατυπωθεί μαθηματικά με βάση το παραγοντικό μοντέλο παραγωγικότητας.

7.4.2. Στοχαστικό μοντέλο και πρωτότυπο λογισμικό προσομοίωσης

Η συμβολή της διατριβής όσον αφορά στον σχεδιασμό, την υλοποίηση και την εφαρμογή του στοχαστικού μοντέλου και του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim* εξειδικεύεται όπως παρακάτω:

1. Το στοχαστικό μοντέλο απευθύνεται στη μελέτη και στην προσομοίωση βασικών κοστολογικών και χρονικών παραμέτρων της διαδικασίας κατασκευής κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (caisson). Αντίστοιχο πλαίσιο προσομοίωσης δεν έχει παρουσιαστεί στην βιβλιογραφία μέχρι σήμερα.
2. Οι λειτουργικές μονάδες του πρωτότυπου λογισμικού προσομοίωσης *CaissonSim*, με ιδιαίτερη έμφαση στον γεννήτορα συνδυασμών εφαρμογής, επιτρέπουν την ταυτόχρονη διερεύνηση εναλλακτικών σεναρίων υλοποίησης μίας δεδομένης κατασκευαστικής δραστηριότητας.
3. Το σύστημα αναφοράς του *CaissonSim* επιτρέπει την πρόσβαση στο κατώτερο επίπεδο των δεδομένων εξόδου όχι μόνο για ένα πείραμα προσομοίωσης, αλλά για κάθε επανάληψη ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο, ο χρήστης έχει πλήρη έλεγχο της διαδικασίας μοντελοποίησης και μπορεί να αξιολογήσει όλες τις βασικές παραμέτρους που εμπεριέχονται στα μοντέλα της βιβλιοθήκης του *CaissonSim*.
4. Διερεύνηση του συντελεστή ανθρώπινου παράγοντα μέσω της εξέλιξης του φαινομένου της μάθησης για την κατασκευή κυψελωτών κιβωτίων από οπλισμένο σκυρόδεμα και εφαρμογή της προσομοίωσης για την εκτίμηση της αναμενόμενης παραγωγικότητας. Η συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έγινε μεταξύ της στατιστικής μεθόδου και της προσομοίωσης. Είναι η πρώτη φορά που πραγματοποιείται μία τέτοια ερευνητική προσπάθεια.

7.5. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Η έρευνα της διατριβής θα πρέπει να ενισχυθεί στο πλαίσιο του υπάρχοντος ερευνητικού πεδίου και, στη συνέχεια, να επεκταθεί πέραν αυτού του πλαισίου. Η ενίσχυση του υπάρχοντος ερευνητικού πεδίου σχετίζεται με τα παρακάτω:

- Αύξηση του στατιστικού δείγματος, έτσι ώστε να συλλεχθούν περισσότερες τιμές των υπαρχουσών μεταβλητών εισόδου. Με αυτόν τον τρόπο θα αυξηθεί η παραλλακτικότητα του δείγματος, έτσι ώστε τα στοιχεία δεδομένων να προσομοιάζουν στην κανονική κατανομή, με αποτέλεσμα τη μείωση της διακύμανσης των δεδομένων εξόδου στα αντίστοιχα μοντέλα. Ανάλογα με το πλήθος των δεδομένων εισόδου θα μπορούσε να δημιουργηθεί μία βάση δεδομένων, η οποία θα πρέπει να τροφοδοτείται συνεχώς με νέα στοιχεία, έτσι ώστε να αποτελέσει μία χρήσιμη βιβλιοθήκη πρότυπων τιμών παραγωγικότητας.
- Εφαρμογή των μοντέλων που αναπτύχθηκαν με την στατιστική μέθοδο, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και την προσομοίωση σε περισσότερες δραστηριότητες και περισσότερα έργα. Η πρακτική εφαρμογή των μοντέλων θα πρέπει να καλύψει όσο το δυνατόν περισσότερα λειτουργικά σενάρια. Με αυτόν τον τρόπο θα ενισχυθεί η εκτιμητική ικανότητα (prediction capability) των σχεδιασθέντων μοντέλων και η αξιοπιστία των διατυπωθεισών μεθόδων εκτίμησης και συγκριτικής αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.
- Ειδικά για το λογισμικό προσομοίωσης *CaissonSim*, η βιβλιοθήκη των πρότυπων μοντέλων προσομοίωσης θα πρέπει να επικαιροποιείται τακτικά, έτσι ώστε να καλύπτει (α) νέες μεθόδους / τεχνολογίες κατασκευής και (β) διαφορές στη μέθοδο εργασίας ή την τεχνική περιγραφή των δραστηριοτήτων.

Η επέκταση του ερευνητικού πλαισίου αφορά τα παρακάτω:

- Συλλογή δεδομένων πεδίου πέρα από το πεδίο τιμών των γνωστών μεταβλητών εισόδου, αλλά και για άλλες, νέες μεταβλητές εισόδου, έτσι ώστε το δείγμα να διαφοροποιηθεί επαρκώς και να καλύψει διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργικών σεναρίων.
- Προσθήκη περισσότερων μεταβλητών εισόδου, για διαφορετικούς τύπους παραμέτρων. Επέκταση του δείγματος με ποιοτικές μεταβλητές εισόδου και διερεύνηση της απόκρισης των μοντέλων σε διαφορετικά σενάρια εκτέλεσης των δραστηριοτήτων.
- Επέκταση της συγκριτικής αξιολόγησης μεθόδων παραγωγικότητας, έτσι ώστε να είναι δυνατή η εφαρμογή και άλλων αναλυτικών μεθόδων (π.χ. θεωρία των ασαφών συνόλων) για τον προσδιορισμό του εύρους τιμών των συντελεστών παραγωγικότητας.
- Επέκταση της βιβλιοθήκης μοντέλων προσομοίωσης του λογισμικού *CaissonSim*, έτσι ώστε να καλυφθούν περισσότερες εναλλακτικές κατασκευής των κυψελωτών κιβωτίων. Διερεύνηση του φαινομένου της μάθησης για διαφορετικές περιπτώσεις κατασκευής (π.χ. χωρίς χρήση ολισθαίνοντος μεταλλότυπου), καθώς δεν έχει εξετασθεί στη βιβλιογραφία μέχρι σήμερα.
- Επέκταση της λειτουργικής μονάδας του λογισμικού *CaissonSim*, έτσι ώστε να είναι δυνατή η βελτιστοποίηση των αποτελεσμάτων με βάση συγκεκριμένα κοστολογικά ή χρονικά κριτήρια σχεδιασμού.
- Εφαρμογή της μεθοδολογίας διατύπωσης του *CaissonSim* για την ανάπτυξη ενός γενικευμένου, στοχαστικού μοντέλου προσομοίωσης (general purpose simulation system) που δεν θα αφορά σε συγκεκριμένο τύπο δραστηριοτήτων, αλλά θα παρέχει την ευελιξία για την μοντελοποίηση διαφορετικών κατασκευαστικών δραστηριοτήτων.

Βιβλιογραφία

Abdelssayed, M. and Navon, R. (1999). "An information sharing, internet-based, system for project control." *Civil Engineering and Environmental Systems*, 16(3), 211-233.

Abdel-Razek, R. H., Elshakour, H. A. M., and Abdel-Hamid, M. (2007). "Labor productivity: Benchmarking and variability in Egyptian projects." *International Journal of Project Management*, 25, 189-197.

AbouRizk, S. (2010). "Role of simulation in construction engineering and management." *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(10), 1140-1153.

AbouRizk, S., Halpin, D., Mohamed, Y., and Hermann, U. (2011). "Research in modeling and simulation for improving construction engineering operations." *Journal of Construction Engineering Management*, 137(10), 843-852.

AbouRizk, S. M., and Hague, S. (2009). "An overview of the COSYE environment for construction simulation." in: Rossett, M., D., Hill, R., R., Johansson, B., Dunkin, A. and Ingalls, R., G. (eds.), *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, USA.

AbouRizk, S. M., and Halpin, D. W. (1990). "Probabilistic simulation studies for repetitive construction processes." *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(4), 575-594.

AbouRizk, S. M., Knowles, P., and Hermann, U. A. (2001). "Estimating labor production rates for industrial construction activities." *Journal of Construction Engineering and Management*, 127, 6, 502 - 511.

Abowitz, D. A., and Toole, T. M. (2010). "Mixed method research: fundamental issues of design, validity, and reliability in construction research." *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), 108-116.

Adeli, H. (2001). "Neural Networks in Civil Engineering: 1989-2000." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 16, 126-142.

Adrian, J. J., and Boyer, L. T. (1976). "Modeling method productivity." *Journal of the Construction Division*, 102(1), 157-168.

- Adrian, J. J. (2004). "Construction productivity: measurement and improvement." Stipes Publishing, Champaign, Illinois, USA.
- Ahn, S., Hislop-Lynch, S. R. and Caldwell, S. (2015). "RapidBridgeBuilder – Simulation tool for accelerated bridge design and construction." in: L. Yilmaz, W.K.V. Chan, I. Moon, T.M.K. Roeder, C. Macal, and M. D. Rossetti (Eds.), Winter Simulation Conference, IEEE, Huntington Beach, California, USA, 3310-3321.
- Al-Hussein, M., Niaz, M. A., Yu, H. and Kim, H. (2006). "Integrating 3D visualization and simulation for tower crane operations on construction sites." *Automation in Construction*, 15, 554-562.
- Al-Sudairi, A. A. (2007). "Evaluating the effect of construction process characteristics to the applicability of lean principles." *Construction Innovation*, 7(1), 99-121.
- Anson, M., Tang, S. L. and Ying, K. C. (2002). "Measurement of the performance of ready mixed concreting resources as data for system simulation." *Construction Management and Economics*, 20, 237-250.
- Bauer, H. (2007). "Baubetrieb." 3rd edition, Springer, Berlin.
- Bernold, L. E. (2007). "Quantitative assessment of backhoe operator skill." *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(11), 889-899.
- Bernold, L. E. and Lee, T. S. (2010). "Experimental research in construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), 26-35.
- BGL (2015). "Hauptverband der Deutschen Bauindustrie: Baugerätliste 2015." Bauverlag, Wiesbaden.
- BML (1983). "Handbuch BML: Daten für die Berechnung von Baumaschinen-Leistungen." Zeittechnik Verlag, Neu-Isenburg.
- Caterpillar (2016). "Caterpillar Performance Handbook." 46th edition, Caterpillar Inc., Illinois, USA.
- CECE (1972). "Teil VIII – für Radlader und ihre Anbaugeräte." Committee for European Construction Equipment, Brussels.
- CECE (1973). "Section VI: Hydraulic excavators." Committee for European Construction Equipment, Brussels.

- Chan, P. W. and Kaka, A. (2007). "Productivity improvements: understand the workforce perceptions of productivity first." *Personnel Review*, 36(4), 564-584.
- Chao, L. C. (2001). "Assessing earth-moving operation capacity by neural network-based simulation with physical factors." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 16, 287-294.
- Chao, L. C. and Chien, C. F. (2010). "A model for updating project S-curve by using neural networks and matching progress." *Automation in Construction*, 19, 84-91.
- Cheng, M. Y., Tsai, H. C., and Hsieh, W. S. (2009). "Web-based conceptual cost estimates for construction projects using evolutionary fuzzy neural inference model." *Automation in Construction*, 18, 164-172.
- Cheng, M. Y., Tsai, H. C., and Sudjono, E. (2012). "Evolutionary fuzzy hybrid neural network for dynamic project success assessment in construction industry." *Automation in Construction*, 21, 46-51.
- Cheng, T., Teizer, J., Migliaccio, G. C. and Gatti, U. C. (2013). "Automated task-level activity analysis through fusion of real time location sensors and worker's thoracic posture data." *Automation in Construction*, 29, 24-39.
- Cheng, T. M., and Feng, C. W. (2003). "An effective simulation mechanism for construction operations." *Automation in Construction*, 12, 227-244.
- Chin, S., Kim, K., and Kim, Y. S. (2005). "Generate-select-check based daily reporting system." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 19(4), 412-45.
- Cottrell, D. S. (2006). "Contractor process improvement for enhancing construction productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(2), 189-196.
- Coutermarsch, B. (2007). "Velocity effect of vehicle rolling resistance in sand." *Journal of Terramechanics*, 44, 275-291.
- Couto, J. P., and Teixeira, J. C. (2005). "Using linear model for learning curve effect on highrise floor construction." *Construction Management and Economics*, 23(4), 355-364.
- Crawford, P., and Vogl, B. (2006). "Measuring productivity in the construction industry." *Building Research and Information*, 34(3), 208-219.

- Dai, J., Goodrum, P. M., Maloney, W. F. (2007). "Analysis of craft workers' and foremen' perceptions on the factors affecting labour productivity." *Construction Management and Economics*, 25, 1139-1152.
- Dai, J., Goodrum, P. M. and Maloney, W. F. (2009). "Construction craft workers' perceptions of the factors affecting their productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(3), 217-226.
- Dainty, A. (2008). "Methodological pluralism in construction management research." in: A. Knight and L. Ruddock (eds.), *Advanced Research Methods in the Built Environment*, Wiley-Blackwell, New York.
- DIN 18300 (2012). "German construction contract procedures (VOB) – Part C: General technical specifications in construction contracts (ATV) – Earthworks." Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- DIN 24095 (1983). "Erdbaumaschinen; Leistungsermittlung; Begriffe, Einheiten, Formelzeichen." Beuth Verlag, Berlin, Germany.
- Doloi, H. (2008). "Application of AHP in improving construction productivity from a management perspective." *Construction Management and Economics*, 26(8), 841-854.
- Dozzi, S. P., and AbouRizk, S. M. (1993). "Productivity in Construction." Report for the Institute of Research in Canada, National Research Council, Ontario, Canada.
- Drewin, F. J. (1982). "Construction productivity: measurement and improvement through work study." Elsevier, USA.
- Dunlop, P. and Smith, S. D. (2004). "Planning, estimation and productivity in the lean concrete pour." *Engineering, Construction and Architectural Management*, 11(1), 55-64.
- Εφραιμίδης, Χ. (2002). «Δομικές Μηχανές.» Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.
- Edwards, D. J. and Holt, G. D. (2000). "ESTIVATE: a model for calculating excavator productivity and output costs." *Engineering, Construction and Architectural Management*, 7(1), 52-62.
- Edwards, D. J. and Holt, G. D. (2009). "Construction plant and equipment management research: thematic review." *Journal of Engineering Design and Technology*, 7(2), 186-206.
- Edwards, D. J., Yang, J., Cabahug, R., and Love, P. E. D. (2005). "Intelligence and maintenance proficiency: an examination of plant operators." *Construction Innovation*, 5, 243-254.

- El-Rayes, K. and Moselhi, O. (2001). "Impact of rainfall on the productivity of highway construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(2), 125-131.
- Enshassi, A., Mohamed, S., Mayer, P., and Abed, K. (2007). "Benchmarking masonry labor productivity." *International Journal of Productivity and Performance Management*, 56(4), 358-368.
- Euroliste (2015). "EUROLISTE / Baugeräteliste", < <http://www.bgl-online.info/>>, (4/4/16).
- Everett, J. G., and Farghal, S. (1994). "Learning curve predictors for construction field operations." *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(3), 603–616.
- Everett, J. G., and Farghal, S. (1997). "Data representation for predicting performance with learning curves." *Journal of Construction Engineering and Management*, 123(1), 46–52.
- Everett, J. G., Halkali, H., and Schlaff, T. G. (1998). "Time-lapse video applications for construction project management." *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(3), 204-209.
- Ezeldin, A. S., and Sharara, L. M. (2006). "Neural networks for estimating the productivity of concreting activities." *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(6), 650-656.
- Farghal, S., and Everett, J. G. (1997). "Learning curves: Accuracy in predicting future performance." *Journal of Construction Engineering and Management*, 123(1), 41–45.
- Fellows, R., and Liu, A. (2008). "Research methods for construction." 3rd edition, JohnWiley and Sons, United Kingdom.
- Fenn, P. (1997). "Rigour in research and peer review." *Construction Management and Economics*, 15, 383-385.
- Flood, I., and Issa, R. R. A. (2010). "Empirical modeling methodologies for construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), 36-48.
- Fritz, H.J. (1970). "Leistungsermittlung und Leistungslohn bei maschinen-intensiven Bauarbeiten." Bauverlag, Berlin.
- Garbotz, G. (1966). "Die Leistungen von Baumaschinen." Koln-Braunsfeld : Muller, Germany.

- Girmscheidt, G. (2010). "Leistungsermittlungshandbuch für Baumaschinen und Bauprozesse." 4th edition, Springer, Berlin.
- Goodrum, P. M. and Haas, C. T. (2004). "Long-term impact of equipment technology on labour productivity in the US construction industry at the activity level." *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(1), 124-133.
- Goodrum, P. M., Zhai, D., and Yasin, M. F. (2009). "Relationship between changes in material technology and construction productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(4), 278-287.
- Gouett, M. C., Haas, C. T., Goodrum, P. M., and Caldas, C. H. (2011). "Activity analysis for direct-work rate improvement in construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(12), 1117-1124.
- Graham, D., and Smith, S. D. (2004). "Estimating the productivity of cyclic construction operations using case-based reasoning." *Advanced Engineering Informatics*, 18, 17-28.
- Graham, L. D., Smith, S. D., and Dunlop, P. (2005). "Lognormal distribution provides an optimum representation of the concrete delivery and placement process." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(2), 230-238.
- Grau, D., Caldas, C. H., Haas, C. T., Goodrum, P. M., and Gong, J. (2009). "Assessing the impact of materials tracking technologies on construction craft productivity." *Automation in Construction*, 18, 903-911.
- Grix, J. (2001). "Demystifying postgraduate research: From MA to PhD." University of Birmingham Press, Birmingham.
- Hajdasz, M. (2014). "Flexible management of repetitive construction processes by an intelligent support system." *Expert Systems with Applications*, 41(4), 962-973.
- Hajjar, D., and AbouRizk, S. M. (2002). "Unified modeling methodology for construction simulation." *Journal of Construction Engineering and Management*, 128(2), 174-185.
- Halligan, D. W., Demsetz, L. A., Brown, J. D., and Pace, C. B. (1994). "Action-response model and loss of productivity in construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(1), 47-64.

Halpin, D. W. (1973). "An investigation of the use of simulation networks for modeling construction operations." PhD dissertation, Department of Civil Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA.

Halpin, D. W., and Martinez, L. H. (1999). "Real world applications of construction process simulation." in: P.A. Farrington, H.B. Nembhard, D.T. Sturrock, G.W. Evans (Eds.), Winter Simulation Conference, IEEE, Squaw Peak, Phoenix, AZ, USA, 956-962.

Halpin, D. W., and Riggs, L. S. (1992). "Planning and analysis of construction operations." John Wiley and Sons, USA.

Halpin, D. W., and Woodhead, R. (1976). "Design of construction process operations." John Wiley and Sons, USA.

Han, S., and Halpin, D. W. (2005). "The use of simulation for productivity estimation based on multiple regression analysis." in: M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines (eds.), Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, 1492-1499.

Hanna, A. S., Chang, C. K., Lackney, J. A., and Sullivan, K. T. (2007). "Impact of overmanning on mechanical and sheet metal labor productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(1), 22-28.

Hanna, A. S., Chang, C. K., Sullivan, K. T., and Lackney, J. A. (2008). "Impact of shift work on labor productivity for labor intensive contractor." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(3), 197-204.

Hanna, A. S., Lotfallah, W. B., and Lee, M. J. (2002). "Statistical-fuzzy approach to quantify cumulative impact of change orders." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 16(4), 252-258.

Hanna, A. S., Russell, J. S., Gotzian, T. W., and Nordheim, E. V. (1999a). "Impact of change orders on labor efficiency for mechanical construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(3), 176-184.

Hanna, A. S., Russell, J. S., Nordheim, E. V., and Brugginnk, M. J. (1999b). "Impact of change orders on labor efficiency for electrical construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(4), 224-232.

Hanna, A. S., Taylor, C. S., and Sullivan, K. T. (2005). "Impact of extended overtime on construction labor productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(6), 734-739.

- Harriss, C. (1998). "Why research without theory is not research: A reply to Seymour, Crook and Rooke." *Construction Management and Economics*, 16(1), 113-116.
- Hasan, S., Bouferguene, A., Al-Hussein, M., Gillis, P., and Telyas, A. (2013) "Productivity and CO₂ emission analysis for tower crane utilization on high-rise building projects." *Automation in Construction*, 31, 255-264.
- Hassan, M. M., and Gruber, S. (2008). "Simulation of concrete paving operations on Interstate-74." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(1), 2-9.
- Hegab, M. Y., and Smith, G. R. (2007). "Delay time analysis in microtunneling projects." *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(2), 191-195.
- Hegazy, T., and Kassab, M. (2003). "Resource optimization using combined simulation and genetic algorithms." *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(6), 698-705.
- Hinze, J., and Olbina, S. (2009). "Empirical analysis of the learning curve principle in prestressed concrete piles." *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(5), 425-431.
- Hijazi, A. M., AbouRizk, S. M., and Halpin, D. W. (1992) "Modeling and simulating learning development in construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 118(4), 685-700.
- Hoffmann, M. (2006). "Zahlentafeln für den Baubetrieb." 7. Auflage, Wiesbaden, Teubner.
- Hola, B., and Schabowicz, K. (2010). "Estimation of earthworks execution time cost by means of neural networks." *Automation in Construction*, 19, 570-579.
- Holt, G.D. and Edwards, D. (2015). "Analysis of interrelationships among excavator productivity modifying factors." *International Journal of Productivity and Performance Management*, 64(6), 853-869.
- Hong, T., and Hastak, M. (2007). "Simulation study on construction process of FRP bridge deck panels." *Automation in Construction*, 16(5), 620-631.
- Hong, Z., Shi, J. J., and Tam, C. M. (2002). "Visual modeling and simulation for construction operations." *Automation in Construction*, 11, 47-57.

- Huang, R. Y., and Hsieh, B. C. (2005). "A construction simulation system (COMSim) with object-oriented modeling elements." *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 28(2), 267-280.
- Huang, R. Y., Chen, J. J., and Sun, K. S. (2004). "Planning gang formwork operations for building construction using simulations." *Automation in Construction*, 13, 765-779.
- Hughes, W. (1994). "The PhD in construction management." in: Proceedings of the 10th Annual ARCOM Conference, 14-16 September, Loughborough.
- Hüster, F. (2005). "Leistungsberechnung der Baumaschinen." Shaker Verlag.
- ISO (1980). "ISO 6483:1980: Earth-moving machinery – Dumper bodies – Volumetric rating." International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (1983). "ISO 7546:1983: Earth-moving machinery -- Loader and front loading excavator buckets -- Volumetric ratings." International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (1991). "ISO 9245:1991: Earthmoving machinery – Machine productivity – Vocabulary, symbols and units." International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (2007). "ISO 7451:2007: Earth-moving machinery -- Volumetric ratings for hoe-type and grab-type buckets of hydraulic excavators and backhoe loaders." International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Jang, H., Kim, K., Kim, J., and Kim, J. (2011). "Labour productivity model for reinforced concrete construction projects." *Construction Innovation*, 11(1), 92-113.
- Jarkas, A., and Horner, M. (2011). "Revisiting the applicability of learning curve theory to formwork labour productivity." *Construction Management and Economics*, 29(5), 483–493.
- JIS (1976). "Testing method of hydraulic excavators." Japanese Industrial Standard A8401, Japan.
- Κοπανέζου, Ε. και Λαμπρόπουλος, Σ. (1988). «Ανάλυση Συστημάτων Παραγωγής και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων – Εφαρμογές Λειτουργικής Ανάλυσης.» Αθήνα.
- Kaboli, A. S. and Carmichael, D. G. (2014). "Optimum scraper load time and fleet size for minimum emissions." *International Journal of Construction Management*, 14(4), 209-226.

- Kamarthi, S. V., Sanvido, V. E., and Kumara, R. T. (1992). "Neuroform-Neural network system for vertical formwork selection." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 6(2), 178-199.
- Kannan, G., and Vorster, M. (2000). "Development of an experience database for truck loading operations." *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(3), 201-209.
- Khosrowshahi, F. (2011). "Innovation in artificial neural network learning: Learn-on-demand methodology." *Automation in Construction*, 20, 1204-1210.
- Kiehl, P. (1973). "Die Leistung der Hydraulikbagger und Möglichkeiten ihrer Erfassung." Dissertation Doktor-Ingenieur, Technische Universität Berlin, Deutschland.
- Kim, G. H., An, S. H. and Kyung, K. I. (2004). "Comparison of construction cost estimating models based on regression analysis, neural networks, and case-based reasoning." *Building and Environment*, 39(10), 1235-1242.
- Kim, K. J., and Gibson Jr. G. E. (2003). "Interactive simulation modeling for heavy construction operations." *Automation in Construction*, 12, 97-109.
- Kiziltas, S., and Akinci, B., (2009). "Contextual information requirements of cost estimators from past construction projects." *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(9), 841-852.
- Klanfar, M., Kujundzic, T. and Vrkljan, D. (2014). "Calculation analysis of bulldozer's productivity in gravitational transport in open pits." *Technical Gazette* 21, 3, 517-523.
- Knutson, K., Schexnayder, C. J., Fiori, C., and Mayo, R. (2008). "Construction management fundamentals." McGraw-Hill, New York.
- Komatsu (2013). "Specifications and Application Handbook." 31st edition, Komatsu, Japan.
- König, M., and Habenicht, I. (2012). "Intelligent BIM-based construction scheduling using discrete event simulation." in: Laroque, C., Himmelspach, J, Pasupathy, R., and Uhrmacher, A., M. (eds.), Proceedings of the 2012 Winter Simulation Conference, 662-673.
- Kotte, G. (1997). "Ermittlung der Nutzförderleistung von Hydraulikbaggern." TIS, Tiefbau Ingenieurbau Strassenbau, Bertelsmann Fachzeitschriften, 9/1997.

Kühn, G. (1984). “Der maschinelle Erdbau.” Teubner Verlag.

Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., and Li, W. (2005). “Applied linear statistical models.” Mc-Graw Hill, New York.

Λαμπρόπουλος, Σ. (1991). «Ολοκληρωμένο Αλγοριθμικό Σύστημα Λειτουργικής Ανάλυσης και Προκοστολόγησης Χωματουργικών Εργασιών.», Διδακτορική Διατριβή, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ.

Lambropoulos, S. and Manolopoulos, N. (1990). “Ein integrierter rechnergestuetzter Algorithmus fur die Kostenermittlung von Erdbauarbeiten”, *BMT*, 2, 75 – 81.

Lambropoulos, S., Manolopoulos, N., and Pantouvakis, J. P. (1996). “SEMANTIC: Smart EarthMoving ANalysis and estimation of Cost.” *Construction Management and Economics*, 14(2), 79–92.

Law, A. M. (2007). “Simulation modeling and analysis.” 4th edition, McGraw Hill, New York. USA.

Lee, B., Lee, H., Park, M., and Kim, H. (2015). ”Influence Factors of Learning-Curve Effect in High-Rise Building Constructions.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 141(8), 04015019.

Lee, D. E., Yi, C. Y., Lim, T. K., and Arditi, D. (2010). “Integrated simulation system for construction operation and project scheduling.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 24(6), 557-569.

Lee, E. B., Ibbs, C. W., Harvey, J. T., and Roesler, J. R. (2000). “Construction productivity and constraints for concrete pavement rehabilitation in urban corridors.” *Transportation Research Record*, 17(12), 13-24.

Lee, E. B., Lee, H., and Ibbs, C. W. (2007). “Productivity aspects of urban freeway rehabilitation with accelerated construction.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 133(10), 798-806.

Lee, J., Lorenc, S. J., and Bernold, L. E. (2003). “Comparative performance evaluation of tele-operated pipe laying.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(1), 32-40.

Liebherr (1986). “Technisches Handbook – Erdbewegung.” Liebherr International, France.

Liebherr (2003). “Technical Handbook – Earthmoving.” Liebherr International, Germany.

Liu, F. S., and Borcharding, J. D. (1986). “Work sampling can predict unit rate productivity.” *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(1), 90-103.

- Liu, L. Y., Stumpf, A. L., Chin, S. Y., Ganeshan, R., and Hicks, D. (1995). "Construction daily log management system using multi media technology." in: Mohsen, J.P. (ed.) Proceedings of the Second Congress of Computing in Civil Engineering, 5-8 July, ASCE, New York, 1084-1089.
- Lowe, J. G. (1987). "The measurement of productivity in the construction industry." *Construction Management and Economics*, 5, 101-113.
- Lu, M. (2003). "Simplified discrete-event simulation approach for construction simulation." *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(5), 537-546.
- Lu, M., Anson, M., Tang, S. L., and Ying, Y. C. (2003). "HKCONSIM: A practical simulation solution to planning concrete plant operations in Hong Kong." *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(5), 547-554.
- Lu, M., Lau, S., and Ariaratnam, S. (2009). "Productivity study of microtunneling pipe installation using simulation – Discussion." *Journal of Infrastructure systems*, 15(2), 133-135.
- Lu, M., Shen, X. and Chen, W. (2009) "Automated Collection of Mixer Truck Operations Data in Highly Dense Urban Areas." *Journal of Construction Engineering and Management*, 1(1), 17-23.
- Lucko, G., and Mitchell, Z. W. Jr. (2010). "Quantitative research: Preparation of incongruous economic data sets for archival data analysis." *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), 49-57.
- Lucko, G., and Rojas, E. M. (2010). "Research validation: Challenges and opportunities in the construction domain." *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), 127-135.
- Luo, R. Y., and Najafi, M. (2007). "Productivity study of microtunneling pipe installation using simulation." *Journal of Infrastructure Systems*, 13(3), 247-260.
- Lutz, J. D., Halpin, D. W., and Wilson, J. R. (1994) "Simulation of learning development in repetitive construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(4), 753-773.
- Maio, C., Schexnayder, C., Knutson, K., and Weber, S. (2000). "Probability distribution functions for construction simulation." *Journal of Construction Engineering and Management*, 126(4), 285-292.

- Marinelli, M. and Lambropoulos, S. (2013). "Algorithmic Method for Scraper Load-Time Optimization." *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(5), 459-465.
- Martinez, J. C. (1996). "STROBOSCOPE: State and resource based simulation of construction processes." PhD dissertation, Civil Engineering, University of Michigan, USA.
- Martinez, J. C. (2001). "EZStrobe - General-purpose simulation system based on activity cycle diagrams." in: B.A. Peters, J.S. Smith, D.J. Medeiros, M.W. Rohrer (Eds.), Winter Simulation Conference, IEEE, Arlington, VA, USA, 1556-1564.
- Martinez, J. C. (2010). "Methodology for conducting discrete-event simulation studies in construction engineering and management." *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), 3-16.
- Martinez, J. C., and Ioannou, P. G. (1999). "General-purpose systems for effective construction simulation." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(4), 265-276.
- Martinez, L. H., and Rodriguez, I. (1997). "Floating caissons." Report for the advanced construction methods course, Purdue University, West Lafayette, IN, USA.
- Marzouk, M., and Moselhi, O. (2003). "Object-oriented simulation model for earthmoving operations." *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(2), 173-181.
- Marzouk, M., and Moselhi, O. (2004). "Multiobjective optimization of earthmoving operations." *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(1), 105-113.
- McCahill, D. F., and Bernold, L. E. (1993). "Resource-oriented modeling and simulation in construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(3), 590-606.
- Miller, S. R., Hartmann, T., and Doree, A. G., (2011). "Measuring and visualizing hot mix asphalt concrete paving operations." *Automation in Construction*, 20(4), 474-481.
- Mohamed, S., and Srinavin, K. (2005). "Forecasting labor productivity changes in construction using the PMV index." *International Journal of Industrial Economics*, 35, 345-351.
- Mohamed, Y., and AbouRizk, S. M. (2005). "Framework for building intelligent simulation models of construction operations." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 19(3), 277-291.

- Morgan, W. C., and Peterson, L. L. (1968). "Determining shovel-truck productivity." *Mining Engineering*, December, 76-80.
- Moselhi, O., Assem, I., and El-Rayes, K. (2005). "Change orders impact on labor productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(3), 354-359.
- Moselhi, O., Hegazy, T., and Fazio, P. (1991). "Neural networks as tools in construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 117(4), 606-625.
- Moselhi, O., and Khan, Z. (2012). "Significance ranking of parameters impacting construction labour productivity." *Construction Innovation*, 12(3), 272-296.
- Muqem, S., Idrus, A., Khamidi, M. F., Ahmad, J. B., and Zakaria, S. B. (2011). "Construction labor production rates modeling using artificial neural networks." *Journal of Information Technology in Construction*, 16, 713 - 725.
- Naresh, A. L., and Jahren, C. T. (1999) "Learning outcomes from construction simulation modeling", *Civil Engineering and Environmental Systems*, 16(2), 129-144.
- Nassar, K., Thabet, W., and Beliveau, Y. (2003). "Simulation of asphalt paving operations under lane closure conditions." *Automation in Construction*, 12, 527-541.
- Navon, R., and Haskaya, I. (2006). "Is detailed progress monitoring possible without designated manual data collection?" *Construction Management and Economics*, 24, 1225-1229.
- Nasereddin, M., Mullens, M. A., and Cope, D. (2007). "Automated simulator development: A strategy for modeling modular housing production." *Automation in Construction*, 16, 212-223.
- Neter, J., Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., and Wasserman, W. (1996). "Applied linear statistical models." IRWIN, The McGraw-Hill Companies, Inc., USA.
- Neuroshell (2000). "Neuroshell2 user's manual." Ward System Group Inc., Frederick, Md.
- Nicholls, H. L., and Day, D. A. (2004). "Moving the earth." 5th edition, McGraw-Hill, New York.
- Nunnally, S.W. (2007). "Construction methods and management." 7th edition, Prentice Hall, Upper Saddle River.

- O'Connor, J. T., and Huh, Y. (2006). "Crew production rates for contract time estimation: Beam erection, deck and rail of highway bridges." *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(4), 408-415.
- Ok, S. C., and Sinha, S. K. (2006). "Construction equipment productivity estimation using artificial neural network model." *Construction Management and Economics*, 24, 1029-1044.
- Ostwald, P. F. (2000). "Construction cost analysis and estimating." Prentice Hall, USA.
- Palaniappan, S., Sawhney, A., and Sarrjoughian, H. (2006). "Application of DEVS framework in construction simulation." in: L. F. Perrone, F. P. Wieland, J. Liu, B. G. Lawson, D. M. Nicol and R. M. Fujimoto (eds.), *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, [1-10].
- Palisade (2009). @RISK, Palisade Corporation, New York, USA.
- Panas, A., and Pantouvakis, J. P. (2010a). "Evaluating research methodology in construction productivity studies." *The Built and Human Environment Review*, 3(1), 63-85.
- Panas, A., and Pantouvakis, J. P. (2010b). "Comparative analysis of operational coefficients' impact on excavation operations." *Engineering Construction and Architectural Management*, 17(5), 461-475.
- Panas, A., Pantouvakis, J. P., and Lambropoulos, S. (2010). "The role of health, safety and green principles in estimating construction productivity: an empirical framework." in: Pantouvakis, J.P. (eds.) *Proceedings of the PM-05 International Conference*, 29-31 May, Heraklion, Crete, Greece, 519-526.
- Panas, A., and Pantouvakis, J. P. (2011). "Multi-attribute regression analysis for concrete pavement productivity estimation." *Organisation, Technology and Management in Construction: An International Journal*, 3, 2, 347-353.
- Panas, A., and Pantouvakis, J. P. (2014). "Simulation-based and statistical analysis of the learning effect in floating caisson construction operations." *Journal of Construction Engineering and Management*, 140(1), 04013033.
- Panas, A. and Pantouvakis, J. P. (2015). "Efficiency multipliers for construction productivity: A comparative evaluation", *Organisation, Technology and Management in Construction: An International Journal*, 7, 1, 1186-1196.

- Pantouvakis, J. P., and Panas, A. (2010). "The contribution of health and safety management to sustainable development: A case study from the construction industry." Proceedings, IPMA Expert Seminar, Zurich, 52-62.
- Pantouvakis, J. P., and Panas, A. (2013). "Computer simulation and analysis framework for floating caisson construction operations." *Automation in Construction*, 36, 196-207.
- Park, H. S. (2006). "Conceptual framework of construction productivity estimation." *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10(5), 311-317.
- Park, H. S., Thomas, S. R., and Tucker, R. L. (2005). "Benchmarking of construction productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(7), 772-778.
- PCSA (1983). "Mobile hydraulic excavator standards." PCSA Standard No. 5, Association of Equipment Manufacturers.
- Pellegrino, R., Costantino, N., Pietroforte, R., and Sancilio, S. (2012). "Construction of multi-storey concrete structures in Italy: patterns of productivity and learning curves." *Construction Management and Economics*, 30(2), 103-115.
- Peurifoy, R. and Schexnayder, C. J. (2002). "Construction Planning, Equipment, and Methods." McGraw-Hill Science, USA.
- Pidd, M. (2004). "Computer simulation in management science." 5th edition, John Wiley and Sons, Chichester, England.
- Pogorilich, D. A. (1992). "The daily report as a job management tool." *Cost Engineering*, 34(2), 23-25.
- Portas, J. B. (1996). "Estimating concrete formwork productivity." M.Sc. Thesis, Construction Engineering and Management, Department of Civil Engineering, University of Alberta, Canada.
- Price, A. D., and Harris, F. C. (1985). "Methods of measuring production times for construction work." *The Chartered Institute of Building*, 49, 1-11.
- Pritsker, A. B., O'Reilly, J. J., and LaVal, D. J. (1997). "Simulation with Visual Slam and AweSim." Systems Publishing Corporation, West Lafayette, Indiana and John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.

- Raftery, J., McGeorge, D., and Walters, M. (1997). "Breaking up methodological monopolies: a multi-paradigm approach to construction management research." *Construction Management and Economics*, 15, 291-297.
- REFA (1991). "REFA – Methodenlehre der Betriebsorganisation, Grundlagen der Arbeitsgestaltung." Hanser Verlag, München.
- Riediger, H. G., and Steinmetzger, R. (2000). "Rationalisierung im Baubetrieb: Möglichkeiten der REFA-Methodenlehre." *Thesis: Wissenschaftlicher Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar*, 45(1), 38-50.
- Rojas, E. M., and Aramvareekul, P. (2003). "Labor productivity drivers and opportunities in the construction industry." *Journal of Management in Engineering*, 19(2), 78-82.
- Rooke, J. A., and Kagioglou, M. (2007). "Criteria for evaluating research: the unique adequacy requirement of methods." *Construction Management and Economics*, 25(9), 979-987.
- Rooke, J., Seymour D., and Crook, D. (1997). "Preserving methodological consistency: a reply to Raftery, McGeorge and Walters." *Construction Management and Economics*, 15(5), 491-494.
- RSMeans (2009). "Building construction cost data: 67th annual edition." R. S. Means Company Inc., Kingston.
- Russell, A. D. (1993). "Computerized daily site reporting." *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(2), 385-402.
- Rustom, R. N., and Yahia, A. (2007). "Estimating productivity using simulation: A case study of Gaza beach embankment protection project." *Construction Innovation*, 7(2), 167-186.
- SAE (1985a). "SAE J 742 Capacity rating – Loader Bucket." in: SAE Handbook 1999: On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery, Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale.
- SAE (1985b). "SAE J 1363 Capacity rating – Dumper Body and Trailer Body." in: SAE Handbook 1999: On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery, Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale.
- SAE (1988). "SAE 1265 Capacity Rating – Dozer." in: SAE Handbook 1999: On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery, Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale.
- SAE (1993). "Standard J296 – Excavator hoe bucket rating." in: SAE Handbook 1999: On-Highway Vehicles and Off-Highway Machinery, Society of Automotive Engineers Inc., Warrendale.

- Said, H., Marzouk, M., and El-Said, M. (2009). "Application of computer simulation to bridge deck construction: Case study." *Automation in Construction*, 18, 377-385.
- Sarker, B. R., Egbelu, P. J., Liao, T. W., and Yu, Y. (2012). "Planning and design models for construction industry: A critical survey." *Automation in Construction*, 22, 123-134.
- Schabowicz, K., and Hola, B. (2007). "Mathematical-neural model for assessing productivity of earthmoving machinery." *Journal of Civil Engineering and Management*, 13(1), 47-54.
- Schexnayder, C. J. (1997). "Analysis of earth moving systems using discrete-event simulation – Discussion." *Journal of Construction Engineering and Management*, 123(2), 199.
- Shi, J. J. (2002). "Three methods for verifying and validating the simulation of a construction operation." *Construction Management and Economics*, 20, 483-491.
- Seymour, D., Crook, D., and Rooke, J. (1997). "The role of theory in construction management: a call for debate." *Construction Management and Economics*, 15(1), 117-119.
- Shan, Y., Goodrum, P. M., Zhai, D., Haas, C., and Caldas, C. H. (2011). "The impact of management practices on mechanical construction productivity." *Construction Management and Economics*, 29(3), 305–316.
- Shi, J. J. (1998). "Modeling and simulation of public housing construction in Hong Kong", in Medeiros, D. J., Watson, E. F., Carson, J. S. and Manivannan, M. S. (eds.), *Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference*, 1305-1311.
- Shi, J. J. (1999a). "Activity-based construction (ABC) modeling and simulation method." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(5), 354-360.
- Shi, J. J. (1999b). "A neural network based system for predicting earthmoving production." *Construction Management and Economics*, 17, 463-471.
- Smith, S. D. (1999). "Earthmoving productivity estimation using linear regression techniques." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(3), 133-141.
- Smith, S. D., Osborne, J. R. and Forde, M. C. (1995). "Analysis of earth-moving systems using discrete-event simulation." *Journal of Construction Engineering and Management*, 121(4), 388-396.

- Smith, S. D., Wood, G. S. and Gould, M. (2000). "A new earthworks estimating methodology." *Construction Management and Economics*, 18, 219-228.
- Song, L., and AbouRizk, S. M. (2005). "Quantifying engineering project scope for productivity modeling." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(3), 360-367.
- Song, L and AbouRizk, S. M. (2008). "Measuring and modelling labor productivity using historical data." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(10), 786-794.
- Srouf Jordan, F., Kiomjian, D. and Srouf I. M. (2016). "Learning curves in construction: A critical review and new model." *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(4), 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001096, 06015004.
- Steinmetzger, H., R. (2005). "Technik und Einsatz der Baumaschinen – Allgemeine Grundlagen der Baumechanisierung." Lecture notes, University of Weimar, Germany.
- STLB-Bau (2014). "Dynamische BauDaten." <<http://www.stlb-bau-online.de>> (2/1/2014).
- Tam, C. M., Tong, T. K. L., and Tse, S. L. (2002). "Artificial neural networks model for predicting excavator productivity." *Engineering, Construction and Architectural Management*, 9(5/6), 446-452.
- Tam, C. M., Tong, T. K. L., Lau, T. C. T. and Chan, K. K. (2005). "Selection of vertical formwork system by probabilistic neural network models." *Construction Management and Economics*, 23, 245-254.
- Tang, S. L., Ying, K. C., Anson, M., and Lu, M. (2005). "RMCSIM: A simulation model of a ready-mixed concrete plant serving multiple sites using multiple truckmixers." *Construction Management and Economics*, 23(1), 15-32.
- Thiengburanatham, P. (2003). "Design of construction production systems: representation, taxonomy and design framework." PhD Thesis, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Colorado.
- Thomas, H. R. (2009). "Construction learning curves." *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 14(1), 14-20.

- Thomas, H. R. and Daily, J. (1983). "Crew performance measurement via activity sampling." *Journal of Construction Engineering and Management*, 109(3), 309-320.
- Thomas, H. R., and Kramer, D. F. (1988). "The Manual of Construction Productivity Measurement and Performance Evaluation." Construction Industry Institute (CII), Austin, TX.
- Thomas, H. R., Guevara, J. M., and Gustenhoven, C. T. (1984). "Improving productivity estimates by work sampling." *Journal of Construction Engineering and Management*, 110(2), 178-188.
- Thomas, H. R., Maloney, W. F., Horner, R. M. W., Smith, G. R., Handa, V. K., and Sanders, S. R. (1990). "Modeling construction labor productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(4), 705-726.
- Thomas, H. R., Mathews, C. T., and Ward, J. G. (1986). "Learning curve models of construction productivity." *Journal of Construction Management and Economics*, 112(2), 245-258.
- Thomas, H. R., and Yiakoumis, I. (1987). "Factor model of construction productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 113(4), 623-639.
- Thomas, H. R., Riley, D. R., and Sanvido, V. E. (1999). "Loss of labor productivity due to delivery methods and weather." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(1), 39-46.
- Thomas, H. R., and Sakarcan, A. S. (1994). "Forecasting labor productivity using factor model." *Journal of Construction Engineering and Management*, 120(1), 228-239.
- Thomas, H. R., Smith, G. R., Sanders, S. R., and Mannering, F. L. (1989). "An exploratory study of productivity forecasting using the factor model for masonry." Rep. No. MSM-8611600, National Science Foundation, Washington, D.C. (Dec).
- Thomas, H. R., and Zavrski, I. (1999). "Construction baseline productivity: theory and practice." *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(5), 295-303.
- Tsoukalas, L. H., and Uhring, R. E. (1997). "Fuzzy and neural approaches in engineering." John Wiley & Sons, Inc., USA.
- U.N. (1965). "Effect of Repetition on Building Operations and Processes on Site." United Nations Committee on Housing, Building and Planning, United Nations, N.Y., ST/ECE/HOU/14.

- Vandenbossche, J. M., Mu, F., and Burnham, T. R. (2011). "Comparison of measured vs. predicted performance of jointed plain concrete pavements using the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guideline." *International Journal of Pavement Engineering*, 12(3), 239-251.
- Walker, D. H. T. (1997). "Choosing an appropriate research methodology." *Construction Management and Economics*, 15, 149-159.
- Wang, S., and Halpin, D. W. (2004). "Simulation experiment for improving construction processes." in: R.G. Ingalls, M.D. Rossetti, J.S. Smith, B.A. Peters (Eds.), Winter Simulation Conference, IEEE, Washington Hilton and Towers Washington, D.C., USA, 1252-1259.
- Wilmot, C. G., and Mei, B. (2005). "Neural network modeling of highway construction costs." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(7), 765-771.
- Yang, J., Edwards, D. J., and Love, P. E. D. (2003). "A computational intelligent fuzzy model approach for excavator cycle time simulation." *Automation in Construction*, 12, 725-735.
- Yiang, Y., and Wu, H., (2007). "Production rates of highway construction activities." *International Journal of Construction Education and Research*, 3(2), 91-98.
- Yin, R. K. (2013). "Case study research design and methods." 5th edition, SAGE Publications, Thousand Oaks, California, USA.
- Yousefi, S., Hegazy, T., Capurco, R., and Attalla, M. (2008). "System of multiple ANNs for online planning of numerous building improvements." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(5), 342-351.
- Zayed, T., Sharifi, M. R., Baci, S., and Amer, M. (2008). "Slip-form application to concrete structures." *Journal of Construction Engineering and Management*, 134(3), 157-168.
- Zayed, T. M., and Halpin, D. (2001). "Simulation of concrete batch plant production." *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(2), 132-141.
- Zayed, T. M., and Halpin, D. W. (2004a). "Process versus data oriented techniques in pile construction productivity assessment." *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(4), 490-499.

- Zayed, T. M., and Halpin, D. W. (2004b). "Simulation as a tool for pile productivity assessment." *Journal of Construction Engineering and Management*, 130(3), 394-404.
- Zayed, T. M., and Halpin, D. W. (2005a). "Deterministic models for assessing productivity and cost of bored piles." *Construction Management and Economics*, 23(5), 531-543.
- Zayed, T. M., and Halpin, D. W. (2005b). "Pile construction productivity assessment." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(6), 705-714.
- Zayed, T. M., and Halpin, D. W. (2005c). "Productivity and cost regression models for pile construction." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131(7), 779-789.
- Zayed, T. M., Halpin, D. W., and Basha, I. M. (2005). "Productivity and delays assessment for concrete batch plant-truck mixer operations." *Construction Management and Economics*, 23, 839-850.
- Zhai, D., Goodrum, P. M., Haas, C. T., and Caldas, C. H. (2009). "Relationship between automation and integration of construction information systems and labor productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(8), 746-753.
- Zhang, C., Hammad, A., Zayed, T. M., Wainer, G., and Pang, H. (2007). "Cell-based representation and analysis of spatial resources in construction simulation." *Automation in Construction*, 16, 436-448.
- Zhang, H. (2008). "Multi-objective simulation-optimization for earthmoving operations." *Automation in Construction*, 18, 79-86.
- Zhang, H., Shi, J. J., and Tam, C. M. (2002). "Application of simulation related techniques to construction operations." *Engineering, Construction and Architectural Management*, 9(5/6), 433-445.
- Zhang, H., Tam, C. M., and Li, H. (2005). "Activity object-oriented simulation strategy for modeling construction operations." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 19(3), 313-322.
- Zhou, F., AbouRizk, S. M., and Al-Battaineh, H. (2009). "Optimisation of construction site layout using a hybrid simulation-based system." *Simulation Modelling Practice and Theory*, 17, 348-363.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Παράρτημα Α: Εκτίμηση παραγωγικότητας δομικών μηχανών

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάστηκαν δεκατέσσερις (14) μέθοδοι εκτίμησης της παραγωγικότητας. Στις επόμενες παραγράφους αναφέρεται ο τρόπος υπολογισμού της παραγωγικότητας για τα δομικά μηχανήματα της ενότητας §2.5. Η παρουσίαση τυποποιείται για όλα τα μηχανήματα με τη μορφή ενός δελτίου υπολογισμού παραγωγικότητας το οποίο:

- Διευκολύνει την ανάλυση των παραμέτρων υπολογισμού της παραγωγικότητας,
- Συνοψίζει τους συντελεστές παραγωγικότητας για κάθε μηχάνημα και μέθοδο εκτίμησης της παραγωγικότητας,
- Διευκολύνει την εποπτική και συγκριτική αξιολόγηση των μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας,
- Παρέχει παράδειγμα υπολογισμού της παραγωγικότητας για καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη

A.1. Εκσκαφέας

| | | | | | |
|--|--|------------------------------------|---|---|---------------------------------|
| Μηχάνημα: | Εκσκαφέας | | | | |
| Κατασκευαστής: | Liebherr / R 924 | Χαρακτηριστικό μέγεθος: | 120 kW | BGL-Nr.: | D.1 |
| Τύπος κίνησης: | Ερπίστριες | Κάδος: | Ανεστραμμένος | Όγκος κάδου (V_{rated}): | 1,00 m ³ |
| Είδος εργασίας: | Εργασία σε περιορισμένο χώρο | | | | |
| Τύπος εδάφους: | Αμμοχάλικο, ελαφρώς συνεκτικό, έδαφος με μεγάλη εκσκαψιμότητα (Κατηγορία 3 κατά DIN 18300:2012), μέτριες συνθήκες εργασίας, σχετικά έμπειρος χειριστής | | | | |
| Συντ. επιπλ. (f_s): | (Πίνακας 2.3) | 1,23 | | | |
| | | Komatsu (2013), Liebherr (2003) | Peurifoy and Schexnayder (2002); Caterpillar (2016) | BML (1983) | Nunally (2007) |
| Συντ. πλήρωσης κάδου (f_m): | Πίνακας 2.5 Πίνακας 2.6 | 1,05 | 1,02 | 1,13 | 0,95 |
| Χρόνος κύκλου: | V _{CECE} = 1,00m ³ V _{SAE} = 1,15m ³ (Σχήμα 2.9) | | Κατηγ. εδ.: 3 (Σχήμα 2.10) | | Ισχύς: 120kW (Σχήμα 2.11) |
| BML (1983) | 17,00 sec | Hüster (2005) | 16,90 sec | Caterpillar (2016) | 14,00 sec |
| Peurifoy and Schexnayder | 15,00 sec | Nunally (2007) | 20,77 sec | Komatsu (2013) | 16,00 sec |

| | | | | | |
|--|---|--|---|--|------------|
| (2002) | | | | | |
| | | Liebherr (2003) | 20,39 sec | | |
| Edwards and Holt (2000) | Γωνία 120° Βάρος 25t | $h_{max} = 7,55m$ $h_d/h_{max} = 53\%$ | 24 sec (εξ. 2.18) | | |
| Συντ. γωνίας στροφής (f_{swing}) | Σχήμα 2.26 | Γωνία 120° | BML (1983) | 0,95 | |
| Συντ. βάθους εκσκαφής (f_{depth}) | Σχήμα 2.27 | Βάθος 4m | BML (1983) | 0,86 | |
| | Πίνακας 2.20 | $h_{max} = 7,55m$ $h_d/h_{max} = 53\%$ Απόθεση σε μικρό χώρο | Komatsu (2013) | 1,30 | |
| Συντ. γωνίας στροφής – βάθους εκσκαφής ($f_{swing-depth}$) | Σχήμα 2.30 | Γωνία 120° $h_d/h_{max} = 53\%$ | Peurifoy and Schexnayder (2002) | 0,78 | |
| | | | Nunally (2007) | 1,01 | |
| Συντ. εκκένωσης κάδου (f_{dump}) | Πίνακας 2.21 | Εκκένωση σε φορτηγό στο ίδιο επίπεδο με τον εκσκαφέα | Kühn (1984) | 0,90 | |
| | | | BML (1983) | 0,90 | |
| Συντ. συναρμογής όγκων (f_{vol}) | Σχήμα 2.31 | $V_{truck} = 18m^3$ $V_{CECE} = 1m^3$ $V_{truck} / V_{SAE} = 18$ | BML (1983) | 1,00 | |
| Συντ. φθοράς δοντιών κάδου (f_{wear}) | Πίνακας 2.22 | Ελαφρώς χρησιμοποιημένα | Kotte (1997) | 0,90 | |
| Συντ. υψομέτρου (f_{alt}) | Πίνακας 2.23 | < 300m | Kotte (1997) | 1,00 | |
| Συντ. διαθεσιμότητας (f_{avail}) | Πίνακας 2.29 | 1500-2000 ώρες λειτουργίας | Kotte (1997) | 0,85 | |
| Συντ. ικανότητας χειριστή (f_{skill}) | Μέτρια εμπειρία / κατάσταση (Πίνακας 2.30) (Πίνακας 2.31) | Liebherr (2003) | Garbotz (1966), Girmscheidt (2010), Hüster (2005), Kotte (1997) | Caterpillar (2016), Peurifoy and Shexnayder (2002) | Kühn, 1984 |
| | | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,64 |
| Συντ. | Εξίσωση 2.33 | (Δες φορτηγό) | Caterpillar (2016) | 0,84 | |

| | | | | | |
|--|--|---|-------------|--|--|
| συναρμογής (f_{match}) | | $t_{th, truck} = 6,94 \text{ min}$ $t_{th, exc} = 14 \text{ sec}$ $n_{truck} = 25$ $n_{exc} = 1$ | | | |
| Συντ. εκμετάλλευσης μηχ/τος (f_E) | Πίνακας 2.35 | Εργασία σε περιορισμένο χώρο | 0,75 | | |
| Ταχεία εκτίμηση παραγωγικότητας | Σχήμα 2.33 | $t_{th, exc} = 0,30 \text{ min}$ $V_{SAE} = 1,00 \text{ m}^3$ $1/f_s = 0,81$ $f_{fill} = 1,00$ $f_E = 0,80$ | Fritz, 1970 | $Q_{eff} \approx 130 \text{ m}^3/\text{h}$ | |
| Αναλυτική εκτίμηση παραγωγικότητας [m^3/h] | | | | | |
| Γενική εξίσωση αναλυτικής εκτίμησης παραγωγικότητας | $Q_{eff} = 3600 \times \frac{V_{exc}}{t_{th, exc}} \times \prod_{x=1}^n f_x,$ <p>με $V_{exc} = V_{rated} \times f_s \times f_{fill}$</p> <p>όπου V_{exc} = όγκος κάδου εκσκαφέα [m^3], $t_{th, exc}$ = θεωρητικός χρόνος κύκλου [s], V_{rated} = ονομαστική χωρητικότητα κάδου εκσκαφέα σύμφωνα με συγκεκριμένο πρότυπο (π.χ. SAE, CECE, JIS, PCSA) [m^3], f_{fill} = συντελεστής πλήρωσης κάδου, f_s = συντελεστής επιπλήσματος υλικού.</p> | | | | |
| Komatsu (2013) | $Q_{eff, exc}^{KOM} = 3600 \times \frac{V_{SAE}^{rated} \times f_s^{KOM} \times f_{fill}^{KOM}}{t_{th, exc}^{KOM} \times f_{depth}^{KOM}} \times f_E^{KOM} = 3600 \times \frac{1,15 \times 1,23 \times 1,05}{16 \times 1,30} \times 0,75 = 192,80$ | | | | |
| Edwards and Holt (2000) | $Q_{eff, exc}^{EDW} = 3600 \times \frac{V_{SAE}^{rated} \times f_s^{CAT} \times f_{fill}^{CAT}}{t_{th, exc}^{EDW}} \times f_{skill}^{CAT} \times f_E^{CAT} = 3600 \times \frac{1,15 \times 1,23 \times 1,02}{24} \times 0,75 \times 0,75 = 121,74$ | | | | |
| Nunally (2007) | $Q_{eff, exc}^N = 3600 \times \frac{V_{SAE}^{rated} \times f_s^N \times f_{fill}^N}{t_{th, exc}^N} \times f_{swing-depth}^N \times f_E^N = 3600 \times \frac{1,15 \times 1,23 \times 0,95}{20,77} \times 1,01 \times 0,75 = 176,43$ | | | | |
| Caterpillar (2016) | $Q_{eff, exc}^{CAT} = 3600 \times \frac{V_{SAE}^{rated} \times f_s^{CAT} \times f_{fill}^{CAT}}{t_{th, exc}^{CAT}} \times f_{match}^{CAT} \times f_{skill}^{CAT} \times f_E^{CAT} = 3600 \times \frac{1,15 \times 1,23 \times 1,02}{14} \times 0,84 \times 0,75 \times 0,75 = 175,30$ | | | | |
| Liebherr (2003) | $Q_{eff, exc}^{LB} = 3600 \times \frac{V_{CECE}^{rated} \times f_s^{LB} \times f_{fill}^{LB}}{t_{th, exc}^{LB}} \times f_{skill}^{LB} \times f_E^{LB} = 3600 \times \frac{1,00 \times 1,23 \times 1,05}{20,39} \times 0,85 \times 0,75 = 145,37$ | | | | |
| Peurifoy and Schexnayder (2002) | $Q_{eff, exc}^P = 3600 \times \frac{V_{SAE}^{rated} \times f_s^P \times f_{fill}^P}{t_{th, exc}^P} \times f_{swing-depth}^P \times f_{skill}^P \times f_E^P = 3600 \times \frac{1,15 \times 1,23 \times 1,02}{15} \times 0,78 \times 0,75 \times 0,75 = 151,93$ | | | | |
| Kühn (1984) | $Q_{eff, exc}^K = 3600 \times \frac{V_{CECE}^{rated} \times f_s^K \times f_{fill}^{BML}}{t_{th, exc}^{BML}} \times f_{swing}^{BML} \times f_{depth}^{BML} \times f_{dump}^K \times f_{vol}^{BML} \times f_{skill}^K \times f_E^K$ $= 3600 \times \frac{1,00 \times 1,23 \times 1,13}{17} \times 0,95 \times 0,86 \times 0,90 \times 1,00 \times 0,64 \times 0,75 = 103,88$ | | | | |

| | |
|---------------------------------|--|
| BML (1983), Hoffmann (2006) | $Q_{\text{eff,exc}}^{\text{BML}}/Q_{\text{eff,exc}}^{\text{HOF}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{CECE}} \times f_s^{\text{BML}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,exc}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{depth}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{BML}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_E^{\text{BML}}$ $= 3600 \times \frac{1,00 \times 1,23 \times 1,13}{17} \times 0,95 \times 0,86 \times 0,90 \times 1,00 \times 0,75 = 162,32$ |
| Hüster (2005) | $Q_{\text{eff,exc}}^{\text{H}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{CECE}} \times f_s^{\text{H}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,exc}}^{\text{H}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{depth}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{BML}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_{\text{skill}}^{\text{H}} \times f_{\text{avail}}^{\text{H}} \times f_E^{\text{H}}$ $= 3600 \times \frac{1,00 \times 1,23 \times 1,13}{16,90} \times 0,95 \times 0,86 \times 0,90 \times 1,00 \times 0,80 \times 0,80 \times 0,75 = 104,50$ |
| Bauer (2007) | $Q_{\text{eff,exc}}^{\text{BML}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{BML}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,exc}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{depth}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{BML}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_{\text{wear}}^{\text{KT}} \times f_E^{\text{BML}}$ $= 3600 \times \frac{1,15 \times 1,23 \times 1,13}{17} \times 0,95 \times 0,86 \times 0,90 \times 1,00 \times 0,90 \times 0,75 = 168,00$ |
| Girmscheidt (2010) | $Q_{\text{eff,exc}}^{\text{GM}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{GM}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,exc}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{depth}}^{\text{BML}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_{\text{wear}}^{\text{KT}} \times f_{\text{skill}}^{\text{GM}} \times f_{\text{avail}}^{\text{KT}} \times f_E^{\text{GM}}$ $= 3600 \times \frac{1,15 \times 1,23 \times 1,13}{17} \times 0,95 \times 0,86 \times 1,00 \times 0,90 \times 0,80 \times 0,85 \times 0,75 = 126,94$ |
| Garbotz (1966), Kotte (1997) | $Q_{\text{eff,exc}}^{\text{GAR}}/Q_{\text{eff,exc}}^{\text{KT}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{CECE}} \times f_s^{\text{BML}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,exc}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{depth}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{BML}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_{\text{wear}}^{\text{KT}} \times f_{\text{alt}}^{\text{KT}} \times f_{\text{avail}}^{\text{KT}} \times f_{\text{skill}}^{\text{KT}} \times f_E^{\text{BML}}$ $= 3600 \times \frac{1,00 \times 1,23 \times 1,13}{17} \times 0,95 \times 0,86 \times 0,90 \times 1,00 \times 0,90 \times 1,00 \times 0,85 \times 0,80 \times 0,75 = 99,34$ |

A.2. Φορτωτής

| | | | | | |
|---|---|---------------------------------------|--|---|---------------------|
| Μηχάνημα: | Φορτωτής | | | | |
| Κατασκευαστής : | Caterpillar / 972H | Χαρακτηριστικό μέγεθος: | 214 kW | BGL-Nr.: | D.3 |
| Τύπος κίνησης: | Ελαστικά | Κάδος: | - | Όγκος κάδου (V_{rated}): | 4,00 m ³ |
| Είδος εργασίας: | Εργασία σε περιορισμένο χώρο, μεταφορά και απόθεση σε φορτηγό, φόρτωση τύπου “V” | | | | |
| Τύπος εδάφους: | Αμμοχάλικο, ελαφρώς συνεκτικό, Έδαφος με μεγάλη εκσκαμτικότητα (Κατηγορία 3 κατά DIN 18300:2012), Μέτριες συνθήκες εργασίας | | | | |
| Συντ. επιπλ. (f_s): | (Πίνακας 2.3) | 1,23 | | | |
| | | Komatsu (2013), | Peurifoy and Schexnayder (2002); Caterpillar (2016), Liebherr (2003) | BML (1983) | Nunally (2007) |
| Συντ. πλήρωσης κάδου (f_{fill}): | Πίνακας 2.5 Πίνακας 2.6 | 0,98 | 1,05 | 0,86 | 0,95 |
| Χρόνος | Σχήμα 2.12 | V _{SAE} = 4,00m ³ | BML (1983) | 7,70 sec | |

| | | | | | |
|---|--------------------------|--|---------------------------------------|--|-----------|
| πλήρωσης κάδου: | | | | | |
| | | | Kühn (1984) | 5,16 sec | |
| Χρόνος εκκένωσης κάδου: | Σχήμα 2.13 | $V_{SAE} = 4,00m^3$ | BML (1983) | 3,91 sec | |
| Χρόνος φόρτωσης, εκκένωσης, ελιγμών και πρόσθετος χρόνος Δt | Πίνακας 2.7 | Εδαφικό υλικό: μικτό Απόθεση: σε φορτηγό Μικρός χώρος απόθεσης | Caterpillar (2016) Liebherr (2003) | 0,50+0,02+ 0,02+0,04= =0,58min/34,8sec | |
| | Πίνακας 2.8 | Φόρτωση τύπου V Μέτριες συνθήκες | Komatsu (2013) | 0,65 min/39sec | |
| | | | | Μετάβαση | Επιστροφή |
| Χρόνος μετάβασης και επιστροφής: | Σχήμα 2.14 Σχήμα 2.15 | Μέση απόσταση: 50m Κλίση 10% | Caterpillar (2016) | 19,20 sec | 14,40 sec |
| | | | Komatsu (2013) | 21,00 sec | 15,60 sec |
| | Σχήμα 2.16 | Επίπεδο σκληρό έδαφος | BML (1983) | 0,5min/30 sec | |
| Συντ. γωνίας στροφής (f_{swing}) | Σχήμα 2.26 | Γωνία 45° | BML (1983) | 1,08 | |
| Συντ. ύψους φόρτωσης (f_{height}) | Σχήμα 2.28 Σχήμα 2.29 | $h_{h-opt} = 4,9m$ $h_h = 3,5m$ → $h_h / h_{h-opt} = 0,71$ | Kühn (1984) | 0,94 | |
| Συντ. γωνίας στροφής – ύψους εκσκαφής ($f_{swing-height}$) | Σχήμα 2.30 | $h_{max} = 4,9m$ → $h_h / h_{max} = 0,71$ | Peurifoy and Schexnayder (2002) | 1,18 | |
| | | | Nunally (2007) | 1,18 | |
| Συντ. εκκένωσης κάδου (f_{dump}) | Πίνακας 2.21 | Εκκένωση σε φορτηγό στο ίδιο επίπεδο με τον φορτωτή | Kühn (1984) | 0,90 | |
| | | | BML (1983) | 0,90 | |
| Συντ. συναρμογής όγκων (f_{vol}) | Σχήμα 2.31 | $V_{truck} = 18m^3$ $V_{SAE} = 4m^3$ $V_{truck} / V_{SAE} = 4,5$ | BML (1983) | 0,92 | |

| | | | | | |
|--|--|--|---|--|---|
| Συντ. φθοράς δοντιών κάδου (f_{wear}) | Πίνακας 2.22 | Ελαφρώς χρησιμοποιημένα | Kotte (1997) | 0,90 | |
| Συντ. διαθεσιμότητας (f_{avail}) | Πίνακας 2.29 | 1500-2000 ώρες λειτουργίας | Kotte (1997) | 0,85 | |
| Συντ. ικανότητας χειριστή (f_{skill}) | Μέτρια εμπειρία / κατάσταση (Πίνακας 2.30) (Πίνακας 2.31) | Liebherr (2003) | Garbotz (1966), Girmscheidt (2010), Hüster (2005), Kotte (1997) | Caterpillar (2016), Peurifoy and Shexnayder (2002) | Kühn (1984) |
| | | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,64 |
| Συντ. συναρμογής (f_{match}) | Εξίσωση 2.33 | (Δες φορτηγό) $t_{th, truck} = 6,94 \text{ min}$ $t_{th, load} = 0,58 \text{ min}$ $n_{truck} = 25$ $n_{load} = 1$ | Caterpillar (2016) | 2,089 → 1,00 | |
| Συντ. εκμετάλλευσης μηχ/τος (f_E) | Πίνακας 2.35 | Εργασία σε περιορισμένο χώρο | 0,75 | | |
| Ταχεία εκτίμηση παραγωγικότητας | Σχήμα 2.35 | Απόσταση = 50m $V_{SAE} = 4,00 \text{ m}^3$ | $V_{fill/empty} = 10 \text{ km/h}$ $t_{th} = 0,60 \text{ min}$ $f_E = 0,75$ | Hoffmann (2006) | $Q_{eff} \approx 48 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| | Σχήμα 2.37 | Απόσταση = 50m $V_{SAE} = 4 \text{ m}^3$ | Girmscheidt (2010) | $Q_{eff} \approx 154 \text{ m}^3/\text{h}$ | |
| Αναλυτική εκτίμηση παραγωγικότητας [m^3/h] | | | | | |
| Γενική εξίσωση αναλυτικής εκτίμησης παραγωγικότητας | $Q_{eff} = 3600 \times \frac{V_{load}}{t_{th, load}} \times \prod_{x=1}^n f_x,$ <p>με $V_{load} = V_{rated} \times f_s \times f_{fill}$</p> <p>όπου V_{load} = όγκος κάδου φόρτωσης [m^3], $t_{th, load}$ = θεωρητικός χρόνος κύκλου [s], V_{rated} = ονομαστική χωρητικότητα κάδου φορτωτή σύμφωνα με συγκεκριμένο πρότυπο (π.χ. SAE, CECE, JIS, PCSA) [m^3], f_{fill} = συντελεστής πλήρωσης κάδου, f_s = συντελεστής επιπλήσματος υλικού.</p> | | | | |
| Komatsu (2013) | $Q_{eff, load}^{KOM} = 3600 \times \frac{V_{rated}^{SAE} \times f_s^{KOM} \times f_{fill}^{KOM}}{t_{th, load}^{KOM}} \times f_E^{KOM} = 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 0,98}{39 + 21 + 15,6} \times 0,75 = 172,20$ | | | | |
| Nunally (2007) | $Q_{eff, load}^N = 3600 \times \frac{V_{rated}^{SAE} \times f_s^N \times f_{fill}^N}{t_{th, load}^{CAT}} \times f_E^N = 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 0,95}{34,8} \times 0,75 = 362,64$ | | | | |

| | |
|---------------------------------|---|
| Caterpillar (2016) | $Q_{\text{eff,load}}^{\text{CAT}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{CAT}} \times f_{\text{fill}}^{\text{CAT}}}{t_{\text{th,load}}^{\text{CAT}}} \times f_{\text{match}}^{\text{CAT}} \times f_{\text{skill}}^{\text{CAT}} \times f_E^{\text{CAT}} = 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 1,05}{34,8} \times 1,00 \times 0,75 \times 0,75$ $= 271,98$ |
| Liebherr (2003) | $Q_{\text{eff,load}}^{\text{LB}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{LB}} \times f_{\text{fill}}^{\text{LB}}}{t_{\text{th,load}}^{\text{LB}}} \times f_{\text{skill}}^{\text{LB}} \times f_E^{\text{LB}} = 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 1,05}{34,8} \times 0,85 \times 0,75 = 340,69$ |
| Peurifoy and Schexnayder (2002) | $Q_{\text{eff,load}}^{\text{P}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{P}} \times f_{\text{fill}}^{\text{P}}}{t_{\text{th,load}}^{\text{CAT}}} \times f_{\text{swing-height}}^{\text{P}} \times f_{\text{skill}}^{\text{P}} \times f_E^{\text{P}}$ $= 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 1,05}{34,8} \times 1,18 \times 0,75 \times 0,75 = 354,72$ |
| Kühn (1984) | $Q_{\text{eff,load}}^{\text{K}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{K}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,load}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{K}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_{\text{skill}}^{\text{K}} \times f_{\text{height}}^{\text{K}} \times f_E^{\text{K}}$ $= 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 0,86}{7,70 + 3,91 + 30,00} \times 1,08 \times 0,90 \times 0,92 \times 0,64 \times 0,94 \times 0,75 = 147,70$ |
| BML (1983), Hoffmann (2006) | $Q_{\text{eff,load}}^{\text{BML}} / Q_{\text{eff,load}}^{\text{HOF}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{BML}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,load}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{BML}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_E^{\text{BML}}$ $= 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 0,86}{7,70 + 3,91 + 30,00} \times 1,08 \times 0,90 \times 0,92 \times 0,75 = 245,52$ |
| Hüster (2005) | $Q_{\text{eff,load}}^{\text{H}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{H}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,load}}^{\text{H}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{BML}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_{\text{skill}}^{\text{H}} \times f_{\text{avail}}^{\text{H}} \times f_E^{\text{H}}$ $= 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 0,86}{7,70 + 3,91 + 30,00} \times 1,08 \times 0,90 \times 0,92 \times 0,80 \times 0,80 \times 0,75 = 157,13$ |
| Bauer (2007) | $Q_{\text{eff,load}}^{\text{BR}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{BML}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,load}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{BML}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_{\text{wear}}^{\text{KT}} \times f_E^{\text{BML}}$ $= 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 0,86}{7,70 + 3,91 + 30,00} \times 1,08 \times 0,90 \times 0,92 \times 0,90 \times 0,75 = 220,97$ |
| Girmscheidt (2010) | $Q_{\text{eff,load}}^{\text{GM}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{GM}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,load}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{BML}} \times f_{\text{wear}}^{\text{KT}} \times f_{\text{skill}}^{\text{GM}} \times f_{\text{avail}}^{\text{KT}} \times f_E^{\text{GM}}$ $= 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 0,86}{7,70 + 3,91 + 30,00} \times 1,08 \times 0,90 \times 0,90 \times 0,80 \times 0,85 \times 0,75 = 163,32$ |
| Garbotz (1966), Kotte (1997) | $Q_{\text{eff,load}}^{\text{GAR}} / Q_{\text{eff,load}}^{\text{KT}} = 3600 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{BML}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,load}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{swing}}^{\text{BML}} \times f_{\text{dump}}^{\text{BML}} \times f_{\text{vol}}^{\text{BML}} \times f_{\text{wear}}^{\text{KT}} \times f_{\text{avail}}^{\text{KT}} \times f_{\text{skill}}^{\text{KT}} \times f_E^{\text{BML}}$ $= 3600 \times \frac{4,00 \times 1,23 \times 0,86}{7,70 + 3,91 + 30,00} \times 1,08 \times 0,90 \times 0,92 \times 0,90 \times 0,85 \times 0,80 \times 0,75 = 150,26$ |

A.3. Φορτηγό αυτοκίνητο οπίσθιας ανατροπής

| | | | | | |
|-----------------------|-------------------|--------------------------------|----------|-----------------|-----|
| Μηχάνημα: | Φορτηγό | | | | |
| Κατασκευαστής: | Komatsu / HD255-5 | Χαρακτηριστικό μέγεθος: | 241 kW | BGL-Nr.: | P.2 |
| | | Απόβαρο: | 22450 kg | | |
| | | Μέγιστο ωφέλιμο φορτίο: | 47525 kg | | |

| | | | | | |
|---|--|--|--|--|---|
| Τύπος κίνησης: | Ελαστικά | Κάδος: | - | Όγκος σκάφης (V_{rated}): | 17,70 m ³ |
| Είδος εργασίας: | Εργασία σε περιορισμένο χώρο, φόρτωση από φορτωτή στο ίδιο επίπεδο με το φορτηγό, απόθεση με ανατροπή (rear-dump truck), προσέγγιση φορτωτή με εμπρόσθια κίνηση | | | | |
| Τύπος & μορφολογία εδάφους: | Αμμοχάλικο, ελαφρώς συνεκτικό, Έδαφος με μεγάλη εκσκαψιμότητα (Κατηγορία 3 κατά DIN 18300:2012), μέτριες συνθήκες εργασίας, συνολική αντίσταση (κλίσης & κίνησης) 20%, 1 τμήμα, μέση απόσταση 200m, πλάτος οδού >15m, ήπιες αυλακώσεις | | | | |
| Συντ. επιπλ. (f_s): | (Πίνακας 2.3) | 1,23 (γ _{loose} = 1.510 kg/m ³) | | | |
| | | Komatsu (2013), | Peurifoy and Schexnayder (2002); Caterpillar (2016), Liebherr (2003) | BML (1983) | Nunally (2007) |
| Συντ. πλήρωσης κάδου (f_{fill}): | Πίνακας 2.5 Πίνακας 2.6 | - | - | 1,08 | - |
| Έλεγχος επάρκειας: | Εξ. 2.16 | $V_{rated} \times f_{fill} \leq \frac{G_{max, truck}}{\gamma_{loose}} \Rightarrow 17,70 \times 1,08 = 19,12 m^3 < \frac{47,525}{1,51} = 31,47 m^3$ | | | |
| Χρόνος πλήρωσης σκάφης: | Εξ. 2.22 Εξ. 2.23 | $t_{fill} = \frac{V_{truck}}{V_{load}} \times \frac{t_{th, load}}{60} = \frac{17,70 \times 1,08}{4,00 \times 1,05} \times \frac{34,80}{60} = 2,64 \text{ min}$ | | | $\xi = \frac{V_{truck} \times f_{fill}}{V_{load} \times f_{fill}} = 4,55$ |
| | | $t_{fill} = \left(\frac{V_{truck}}{V_{load/exc}} - 1 \right) \times t_{th, load / exc} = (\xi - 1) \times t_{th, load / exc} = (4,55 - 1) \times 34,80 = 2,06 \text{ min}$ | | | |
| Χρόνος κίνησης φορτηγού αυτοκινήτου: | Εξ. 2.26 (Kühn, 1984) | $v_{max} = \frac{P_{mach} \times \eta}{(G_{load} + G_{truck}) \times (w_r + w_s)} = \frac{241 \times 0,75}{[(17,70 \times 1,08 \times 1,51 \times 9,96) + (22,45 \times 9,96)] \times (0,020)} = 18,08 \text{ km/h}$ | | | |
| | Εξ. 2.27 | $v_i = v_{max} \times f_{speed}$ | | | |
| | Εξ. 2.28 Kühn, 1984 | $\varepsilon = \frac{P_{mach}}{G_{load} + G_{truck}} = \frac{241 \times 1,36}{[(17,70 \times 1,08 \times 1,51) + (22,45)]} = 6,39$ | | | |
| | Σχήμα 2.19 | $\varepsilon = 6,39, \text{ απόσταση } 200m \Rightarrow f_{speed} = 0,43$ $v_i = v_{max} \times f_{speed} = 18,08 \times 0,43 = 7,77 \text{ km/h}$ | Kühn (1984) | | |
| | Σχήμα 2.20 | Έμφορτο όχημα, ανωφέρεια, v _{max} = 18,08km/h: A → f _{speed} = 1,00 Αδειο όχημα, κατωφέρεια, v _{max} = 18,08km/h: B → f _{speed} = 1,00 | | | BML (1983) |

| | | | | | |
|--|------------------------------|--|--|--|--------------|
| | Εξ. 2.25 | $t_{tran} / t_{ret} = \frac{60 \times 200}{1000 \times 7,77} = 1,54$ | | | |
| Σταθεροί χρόνοι: | | | t_{dump} | | t_{change} |
| | Πίνακας 2.11 Πίνακας 2.12 | Bauer, (2007); BML (1983); Garbotz, (1966); Hoffmann, (2006) | 0,60 | Bauer, (2007); BML (1983); Garbotz, (1966); Hoffmann, (2006) | 0,40 |
| | | Girmscheidt, (2010) | 1,00 | Girmscheidt, (2010) | 0,00 |
| | | Peurifoy and Schexnayder, (2002) | 1,35 | Peurifoy and Schexnayder, (2002) | - |
| | | Kühn, (1984) | 1,50 | Kühn, (1984) | 0,33 |
| | | Hüster, (2005) | 1,50 | Hüster, (2005) | 0,20 |
| | | Nunally, (2007) | 1,50 | Nunally, (2007) | - |
| | | Komatsu, (2013) | 1,25 | Komatsu, (2013) | 0,30 |
| | | Caterpillar, (2016) | 1,10 | Caterpillar, (2016) | 0,70 |
| Χρόνος κύκλου: | | Bauer, (2007); BML (1983); Garbotz, (1966); Hoffmann, (2006) | $t_{th, truck} = 2,06 + 1,54 \times 2 + 0,6 + 0,4 = 6,14 \text{ min}$ | | |
| | | Girmscheidt, (2010) | $t_{th, truck} = 2,06 + 1,54 \times 2 + 1,00 = 6,14 \text{ min}$ | | |
| | | Peurifoy and Schexnayder, (2002) | $t_{th, truck} = 2,06 + 1,54 \times 2 + 1,35 = 6,49 \text{ min}$ | | |
| | | Kühn, (1984) | $t_{th, truck} = 2,06 + 1,54 \times 2 + 1,50 + 0,33 = 6,97 \text{ min}$ | | |
| | | Hüster, (2005) | $t_{th, truck} = 2,06 + 1,54 \times 2 + 1,50 + 0,20 = 5,44 \text{ min}$ | | |
| | | Nunally, (2007) | $t_{th, truck} = 2,06 + 1,54 \times 2 + 1,50 = 5,24 \text{ min}$ | | |
| | | Komatsu, (2013) | $t_{th, truck} = 2,06 + 1,54 \times 2 + 1,25 + 0,30 = 6,69 \text{ min}$ | | |
| | | Caterpillar, (2016) | $t_{th, truck} = 2,06 + 1,54 \times 2 + 1,10 + 0,70 = 6,94 \text{ min}$ | | |
| Συντ. συναρμογής χρόνου κύκλου (f_{match}) | Εξ. 2.33 | $n_{trucks} = 10$ $\frac{t_{th, truck}}{t_{th, load}} = \frac{6,94 \times 60}{34,80} = 11,97$ | Bauer, (2007); BML (1983); Garbotz, (1966); Hoffmann, (2006) $f_{match} = 0,84$ | | |
| Συντ. εκμετάλλευσης | Πίνακας 2.35 | Εργασία σε περιορισμένο χώρο | 0,75 | | |

| | | | | | |
|--|---|--|--|--|--|
| μηχ/τος (f_E) | | | | | |
| Ταχεία εκτίμηση παραγωγικότητας | - | | | | |
| Αναλυτική εκτίμηση παραγωγικότητας [m^3/h] | | | | | |
| Γενική εξίσωση αναλυτικής εκτίμησης παραγωγικότητας | $Q_{\text{eff}} = 60 \times \frac{V_{\text{truck}}}{t_{\text{th, truck}}} \times \prod_{x=1}^n f_x,$ <p>με $V_{\text{truck}} = V_{\text{rated}} \times f_s \times f_{\text{fill}}$</p> <p>όπου $V_{\text{truck}} =$ όγκος μεταφορικού οχήματος [m^3], $t_{\text{th, truck}} =$ θεωρητικός χρόνος κύκλου [min], $V_{\text{rated}} =$ ονομαστική χωρητικότητα σκάφης οχήματος σύμφωνα με συγκεκριμένο πρότυπο (π.χ. SAE, CECE, JIS, PCSA) [m^3], $f_{\text{fill}} =$ συντελεστής πλήρωσης κάδου, $f_s =$ συντελεστής επιπλήσματος υλικού.</p> | | | | |
| Komatsu (2013) | $Q_{\text{eff, truck}}^{\text{KOM}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{KOM}} \times f_{\text{fill}}^{\text{KOM}}}{t_{\text{th, truck}}^{\text{KOM}}} \times f_E^{\text{KOM}} = 60 \times \frac{17,70 \times 1,23}{6,69} \times 0,75 = 146,44$ | | | | |
| Nunally (2007) | $Q_{\text{eff, truck}}^{\text{N}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{N}} \times f_{\text{fill}}^{\text{N}}}{t_{\text{th, truck}}^{\text{N}}} \times f_E^{\text{N}} = 60 \times \frac{17,70 \times 1,23}{5,24} \times 0,75 = 186,94$ | | | | |
| Caterpillar (2016) | $Q_{\text{eff, truck}}^{\text{CAT}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{CAT}} \times f_{\text{fill}}^{\text{CAT}}}{t_{\text{th, truck}}^{\text{CAT}}} \times f_{\text{match}}^{\text{CAT}} \times f_E^{\text{CAT}} = 60 \times \frac{17,70 \times 1,23}{6,94} \times 0,84 \times 0,75 = 118,58$ | | | | |
| Liebherr (2003) | $Q_{\text{eff, truck}}^{\text{LB}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{LB}} \times f_{\text{fill}}^{\text{LB}}}{t_{\text{th, truck}}^{\text{LB}}} \times f_E^{\text{LB}} = 60 \times \frac{17,70 \times 1,23}{6,94} \times 0,75 = 141,17$ | | | | |
| Peurifoy and Schexnayder (2002) | $Q_{\text{eff, truck}}^{\text{P}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{P}} \times f_{\text{fill}}^{\text{P}}}{t_{\text{th, truck}}^{\text{P}}} \times f_E^{\text{P}} = 60 \times \frac{17,70 \times 1,23}{6,49} \times 0,75 = 150,95$ | | | | |
| Kühn (1984) | $Q_{\text{eff, truck}}^{\text{K}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{K}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th, truck}}^{\text{K}}} \times f_E^{\text{K}} = 60 \times \frac{17,70 \times 1,23}{6,97} \times 0,75 = 140,56$ | | | | |
| Bauer (2007), BML (1983), Garbotz (1966), Hoffmann (2006) | $Q_{\text{eff, truck}}^{\text{BML}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{BML}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th, truck}}^{\text{BML}}} \times f_{\text{match}}^{\text{BML}} \times f_E^{\text{BML}} = 60 \times \frac{17,70 \times 1,23 \times 1,08}{6,14} \times 0,84 \times 0,75 = 144,75$ | | | | |
| Hüster (2005) | $Q_{\text{eff, truck}}^{\text{H}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{H}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th, truck}}^{\text{H}}} \times f_E^{\text{H}} = 60 \times \frac{17,70 \times 1,23 \times 1,08}{5,44} \times 0,75 = 194,50$ | | | | |
| Girmscheidt (2010) | $Q_{\text{eff, truck}}^{\text{GM}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{GM}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th, truck}}^{\text{G}}} \times f_{\text{match}}^{\text{BML}} \times f_E^{\text{GM}} = 60 \times \frac{17,70 \times 1,23 \times 1,08}{6,14} \times 0,84 \times 0,75 = 144,75$ | | | | |

A.4. Προωθητής

| | | | | | |
|----------------|---------------------|--------------------------------|--------|-----------------|-----|
| Μηχάνημα: | Προωθητής | | | | |
| Κατασκευαστής: | Caterpillar / 814F2 | Χαρακτηριστικό μέγεθος: | 173 kW | BGL-Nr.: | D.4 |

| | | | | | |
|---|---|--|---|--|---------------------|
| Τύπος κίνησης: | Ελαστικά | Κάδος: | - | Όγκος κοπτήρα (V_{rated}): | 2,66 m ³ |
| Είδος εργασίας: | Εργασία σε περιορισμένο χώρο, κατά μήκος προώθηση υλικού | | | | |
| Τύπος εδάφους: | Αμμοχάλικο, ελαφρώς συνεκτικό, Έδαφος με μεγάλη εκσκαψιμότητα (Κατηγορία 3 κατά DIN 18300:2012), Μέτριες συνθήκες εργασίας, Κατωφέρεια με κλίση 10% | | | | |
| Συντ. επιπλ. (f_s): | (Πίνακας 2.3) | 1,23 | | | |
| | | Komatsu (2013), | Peurifoy and Schexnayder (2002); Caterpillar (2016), Liebherr (2003) | BML (1983) | Nunally (2007) |
| Συντ. πλήρωσης κάδου (f_{fill}): | Πίνακας 2.5 Πίνακας 2.6 | 0,80 | 0,80 | 1,00 | - |
| Χρόνος κύκλου: | Σχήμα 2.23 | Έδαφος: [7-8] Απόσταση = 50m Διελεύσεις: 1 | Hüster (2005) | 1,40 – 2,00 min | |
| | Πίνακας 2.13 | Φόρτωση τύπου “V” Μέτριες συνθήκες | Komatsu (2013) | 0,60 min | |
| | | | BML (1983), Hoffmann (2006) | Girmscheidt (2010); Liebherr (2003); Hüster (2005) | Komatsu (2013) |
| Συντ. τύπου κοπτήρα (f_{blade}): | Πίνακας 2.24 Πίνακας 2.25 | Μετωπικός (“S”) Μεσαίας δυσκολίας | 1,18 | 1,00 | 0,80 |
| | | | BML (1983); Liebherr (2003); Hoffmann (2006) | Caterpillar (2016) | Komatsu (2013) |
| Συντ. κλίσης εδάφους (f_{grade}): | Σχήμα 2.32 | Κατωφέρεια 10% | 1,16 | 1,20 | 1,14 |
| Συντ. μεθόδου εργασίας (f_{method}): | Πίνακας 2.26 | Κατά μήκος προώθηση | Caterpillar, (2016); Liebherr (2003); Peurifoy and Schexnayder (2002) | 1,20 | |
| Συντ. κατάστασης χώρου εργασίας | Πίνακας 2.27 | Χαλαρά εδάφη | Caterpillar, (2016); Liebherr (2003) | 1,20 | |

| | | | | | |
|--|---|---|---|--|--------------|
| ($f_{condition}$) | | | | | |
| Συντ. διαθεσιμότητας (f_{avail}) | Πίνακας 2.29 | 1500-2000 ώρες λειτουργίας | Kotte (1997) | 0,85 | |
| Συντ. ικανότητας χειριστή (f_{skill}) | Μέτρια εμπειρία / κατάσταση (Πίνακας 2.30) (Πίνακας 2.31) | Liebherr (2003) | Garbotz (1966), Girmscheidt (2010), Hüster (2005), Kotte (1997) | Caterpillar (2016), Peurifoy and Shexnayder (2002) | Kühn, (1984) |
| | | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,64 |
| Συντ. εκμετάλλευσης μηχ/τος (f_E) | Πίνακας 2.35 | Εργασία σε περιορισμένο χώρο | 0,75 | | |
| Ταχεία εκτίμηση παραγωγικότητας | Σχήμα 2.38 | Απόσταση = 50m Ισχύς: 173 kW | BML, (1983) | $Q_{th} \approx 295,11 \text{ m}^3/\text{h}$ | |
| | Σχήμα 2.39 | Απόσταση = 50m Ισχύς: 173 kW | Caterpillar, (2016) | $Q_{th} \approx 244,04 \text{ m}^3/\text{h}$ | |
| | Σχήμα 2.39 | Απόσταση = 50m Ισοδύναμο μοντέλο: 741C – 147kW | Liebherr, (2003) | $Q_{th} \approx 250 \text{ m}^3/\text{h}$ | |
| | Πίνακας 2.36 | Αμμοχάλικο, Ισχύς: 173kW | Kühn (1984) | $Q_{th} \approx 300 \text{ m}^3/\text{h}$ | |
| | Σχήμα 2.38 | Απόσταση = 50m Ισχύς: 173 kW | Hoffmann (2006) | $Q_{th} \approx 120 \text{ m}^3/\text{h}$ | |
| Αναλυτική εκτίμηση παραγωγικότητας [m^3/h] | | | | | |
| Γενική εξίσωση αναλυτικής εκτίμησης παραγωγικότητας | $Q_{eff} = 60 \times \frac{V_{dozer}}{t_{th,dozer}} \times \prod_{x=1}^n f_x,$ <p>με $V_{dozer} = V_{rated} \times f_s \times f_{fill}$</p> <p>όπου V_{dozer} = όγκος του εδαφικού υλικού [m^3], $t_{th,dozer}$ = θεωρητικός χρόνος κύκλου [min], V_{rated} = ονομαστική χωρητικότητα κοπήρα προωθητή σύμφωνα με συγκεκριμένο πρότυπο (π.χ. SAE) [m^3], f_{fill} = συντελεστής πλήρωσης κάδου, f_s = συντελεστής επιπλήσματος υλικού.</p> | | | | |
| Komatsu (2013) | $Q_{eff,dozer}^{KOM} = 60 \times \frac{V_{rated}^{SAE} \times f_s^{KOM} \times f_{fill}^{KOM}}{t_{th,dozer}^{KOM}} \times f_{blade}^{KOM} \times f_{grade}^{KOM} \times f_E^{KOM} = 60 \times \frac{2,66 \times 1,23 \times 0,80}{0,60} \times 0,80 \times 1,14 \times 0,75 = 179,03$ | | | | |
| Nunally (2007) | $Q_{eff,dozer}^N = Q_{th}^{CAT} \times f_{grade}^{CAT} \times f_{skill}^{CAT} \times f_E^N = 244,04 \times 1,20 \times 0,75 \times 0,75 = 164,73$ | | | | |
| Caterpillar (2016) | $Q_{eff,dozer}^{CAT} = Q_{th}^{CAT} \times f_{grade}^{CAT} \times f_{method}^{CAT} \times f_{condition}^{CAT} \times f_{skill}^{CAT} \times f_E^{CAT} = 244,04 \times 1,20 \times 1,20 \times 1,20 \times 0,75 \times 0,75 = 237,20$ | | | | |

| | |
|--|--|
| Liebherr (2003) | $Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{LB}} = Q_{\text{th}}^{\text{LB}} \times f_{\text{blade}}^{\text{LB}} \times f_{\text{grade}}^{\text{LB}} \times f_{\text{method}}^{\text{LB}} \times f_{\text{condition}}^{\text{LB}} \times f_{\text{skill}}^{\text{LB}} \times f_{\text{E}}^{\text{LB}} = 250 \times 1,00 \times 1,16 \times 1,20 \times 1,20 \times 0,85 \times 0,75 = 266,22$ |
| Peurifoy and Schexnayder (2002) | $Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{P}} = Q_{\text{th}}^{\text{CAT}} \times f_{\text{grade}}^{\text{CAT}} \times f_{\text{method}}^{\text{CAT}} \times f_{\text{skill}}^{\text{CAT}} \times f_{\text{E}}^{\text{CAT}} = 244,04 \times 1,20 \times 1,20 \times 0,75 \times 0,75 = 197,67$ |
| Kühn (1984) | $Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{K}} = Q_{\text{th}}^{\text{K}} \times f_{\text{skill}}^{\text{K}} \times f_{\text{E}}^{\text{K}} = 300 \times 0,64 \times 0,75 = 144,00$ |
| BML (1983), Bauer (2007), Garbotz (1966) | $Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{GAR}} / Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{BR}} / Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{BML}} = Q_{\text{th}}^{\text{BML}} \times f_{\text{blade}}^{\text{BML}} \times f_{\text{grade}}^{\text{BML}} \times f_{\text{E}}^{\text{BML}} = 295,11 \times 1,18 \times 1,16 \times 0,75 = 302,96$ |
| Hoffmann (2006) | $Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{HOF}} = Q_{\text{th}}^{\text{HOF}} \times f_{\text{blade}}^{\text{BML}} \times f_{\text{grade}}^{\text{BML}} \times f_{\text{E}}^{\text{BML}} = 120 \times 1,18 \times 1,16 \times 0,75 = 123,19$ |
| Hüster (2005) | $Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{H}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_{\text{s}}^{\text{H}} \times f_{\text{fill}}^{\text{BML}}}{t_{\text{th,dozer}}^{\text{H}}} \times f_{\text{blade}}^{\text{BML}} \times f_{\text{grade}}^{\text{BML}} \times f_{\text{skill}}^{\text{H}} \times f_{\text{E}}^{\text{H}}$ $= 60 \times \frac{2,66 \times 1,23 \times 1,00}{1,60} \times 1,00 \times 1,16 \times 0,80 \times 0,75 = 85,39$ |
| Girmscheidt (2010) | $Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{GM}} = Q_{\text{th}}^{\text{GM}} \times f_{\text{blade}}^{\text{LB}} \times f_{\text{grade}}^{\text{LB}} \times f_{\text{method}}^{\text{LB}} \times f_{\text{skill}}^{\text{LB}} \times f_{\text{E}}^{\text{LB}} = 310 \times 1,00 \times 1,16 \times 1,20 \times 0,85 \times 0,75 = 275,09$ |

A.5. Αποξεστικό όχημα

| | | | | | |
|---|---|--------------------------------|---|--|-------------------|
| Μηχάνημα: | Αποξεστικό | | | | |
| Κατασκευαστής: | Caterpillar 631G | Χαρακτηριστικό μέγεθος: | 345 kW | BGL-Nr.: | D.5 |
| Τύπος κίνησης: | Ελαστικά | Κάδος: | - | Όγκος σκάφης (V_{rated}): | 26 m ³ |
| Είδος εργασίας: | Εργασία σε περιορισμένο χώρο, μετάβαση σε οδό με κλίση 4% και μήκος 610m, επιστροφή σε οδό με κλίση 0% και μήκος 760m | | | | |
| Τύπος εδάφους: | Αμμοχάλικο, ελαφρώς συνεκτικό, Έδαφος με μεγάλη εκσκαψιμότητα (Κατηγορία 3 κατά DIN 18300:2012), Μέτριες συνθήκες εργασίας, έδαφος σε καλή κατάσταση με μικρές αυλακώσεις | | | | |
| Συντ. επιπλ. (f_s): | (Πίνακας 2.3) | 1,23 | | | |
| | | Komatsu (2013) | Peurifoy and Schexnayder (2002); Caterpillar (2016) | BML (1983) | Nunally (2007) |
| Συντ. πλήρωσης κάδου (f_{fill}): | Πίνακας 2.5 Πίνακας 2.6 | 0,80 | 0,80 | - | - |
| Χρόνος πλήρωσης σκάφης: | Πίνακας 2.14 | Caterpillar 631G | Caterpillar (2016) | 0,60 min | |

| | | | | | |
|---|--|--|--|--|--------------|
| | Σχήμα 2.24 | Απόσταση = 1370m | Peurifoy and Schexnayder (2002) | 0,73 min | |
| Χρόνος μετάβασης (έμφορτο): | | Απόσταση = 610m Κλίση: 4% | Caterpillar (2016); Peurifoy and Schexnayder (2002) | 1,40 min | |
| Χρόνος επιστροφής (άδειο): | | Απόσταση = 760m Κλίση: 0% | Caterpillar (2016); Peurifoy and Schexnayder (2002) | 1,00 min | |
| Χρόνος ελιγμών & απόθεσης: | Πίνακας 2.14 | Caterpillar 631G | Caterpillar (2016) | 0,70 min | |
| | Πίνακας 2.15 | Χρόνος απόθεσης | Peurifoy and Schexnayder (2002) | 0,30 min | |
| | | Χρόνος απόθεσης | Hoffmann (2006) | 0,50 min | |
| | | Χρόνος ελιγμών | Peurifoy and Schexnayder (2002) | 0,25 min | |
| | | Χρόνος ελιγμών και αναμονής | Hoffmann (2006) | 1,13 min | |
| Συντ. τύπου κοπήρα (f_{method}) | Πίνακας 2.26 | Κατωφέρεια | Hoffmann (2006) | 0,70 | |
| Συντ. κατάστασης χώρου εργασίας ($f_{condition}$) | Πίνακας 2.28 | Έδαφος: Αμμοχάλικο σε καλή κατάσταση, στεγνό έδαφος, μικρές αυλακώσεις | Hoffmann (2006) | 0,85 | |
| Συντ. διαθεσιμότητας (f_{avail}) | Πίνακας 2.29 | 1500-2000 ώρες λειτουργίας | Kotte (1997) | 0,85 | |
| Συντ. ικανότητας χειριστή (f_{skill}) | Μέτρια εμπειρία / κατάσταση (Πίνακας 2.30) (Πίνακας 2.31) | Liebherr (2003) | Garbotz (1966), Girmscheidt (2010), Hüster (2005), Kotte (1997) | Caterpillar (2016), Peurifoy and Shexnayder (2002) | Kühn, (1984) |
| | | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,64 |
| Συντ. εκμετάλλευσης μηχ/τος (f_E) | Πίνακας 2.35 | Εργασία σε περιορισμένο χώρο | 0,75 | | |

| | | | | |
|--|--|------------------|---------------------|--|
| Ταχεία εκτίμηση παραγωγικότητας | Σχήμα 2.37 | Απόσταση = 1370m | Girmscheidt, (2010) | $Q_{th} \approx 126,05 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| | Πίνακας 2.36 | Απόσταση = 1370m | Kühn (1984) | $Q_{th} \approx 160,00 \text{ m}^3/\text{h}$ |
| Αναλυτική εκτίμηση παραγωγικότητας [m^3/h] | | | | |
| Γενική εξίσωση αναλυτικής εκτίμησης παραγωγικότητας | $Q_{\text{eff}} = 60 \times \frac{V_{\text{scraper}}}{t_{\text{th,scraper}}} \times \prod_{x=1}^n f_x,$ <p>με $V_{\text{scraper}} = V_{\text{rated}} \times f_s \times f_{\text{fill}}$</p> <p>όπου $V_{\text{scraper}} =$ όγκος σκάφης αποξεστικού οχήματος [m^3], $t_{\text{th,scraper}} =$ θεωρητικός χρόνος κύκλου [min], $V_{\text{rated}} =$ ονομαστική χωρητικότητα σκάφης οχήματος σύμφωνα με συγκεκριμένο πρότυπο (π.χ. SAE, CECE, JIS, PCSA) [m^3], $f_{\text{fill}} =$ συντελεστής πλήρωσης κάδου, $f_s =$ συντελεστής επιπλήσματος υλικού.</p> | | | |
| Caterpillar (2016), Nunally (2007) | $Q_{\text{eff,scraper}}^N / Q_{\text{eff,scraper}}^{\text{CAT}} = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{CAT}} \times f_{\text{fill}}^{\text{CAT}}}{t_{\text{th,scraper}}^{\text{CAT}}} \times f_{\text{skill}}^{\text{CAT}} \times f_E^{\text{CAT}} = 60 \times \frac{26 \times 1,23 \times 0,80}{0,60 + 1,40 + 1,00 + 0,70} \times 0,75 \times 0,75 = 233,37$ | | | |
| Peurifoy and Schexnayder (2002) | $Q_{\text{eff,scraper}}^P = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^{\text{CAT}} \times f_{\text{fill}}^{\text{CAT}}}{t_{\text{th,scraper}}^N} \times f_{\text{skill}}^{\text{CAT}} \times f_E^{\text{CAT}} = 60 \times \frac{26 \times 1,23 \times 0,80}{0,73 + 1,40 + 1,00 + 0,30 + 0,25} \times 0,75 \times 0,75 = 234,64$ | | | |
| Kühn (1984) | $Q_{\text{eff,scraper}}^K = Q_{\text{th}}^K \times f_{\text{skill}}^K \times f_E^K = 200 \times 0,64 \times 0,75 = 96,00$ | | | |
| Hoffmann (2006) | $Q_{\text{eff,scraper}}^H = 60 \times \frac{V_{\text{rated}}^{\text{SAE}} \times f_s^H \times f_{\text{fill}}^H}{t_{\text{th,scraper}}^H} \times f_{\text{condition}}^H \times f_{\text{skill}}^H \times f_E^H = 60 \times \frac{26 \times 1,23 \times 0,80}{0,60 + 1,40 + 1,00 + 0,50 + 1,13} \times 0,85 \times 0,75 \times 0,75 = 158,52$ | | | |
| Girmscheidt (2010) | $Q_{\text{eff,scraper}}^{\text{GM}} = Q_{\text{th}}^{\text{GM}} \times f_{\text{skill}}^{\text{GM}} \times f_{\text{avail}}^{\text{GM}} \times f_E^{\text{GM}} = 126,50 \times 0,80 \times 0,85 \times 0,75 = 64,52$ | | | |

A.6. Ισοπεδωτής

| | | | | | |
|---------------------------|--|--|--------------------|---|--------|
| Μηχάνημα: | Ισοπεδωτής | | | | |
| Κατασκευαστής: | Caterpillar / 160K | Χαρακτηριστικό μέγεθος: | 139-154 kW | BGL-Nr.: | D.7 |
| Τύπος κίνησης: | Ελαστικά | Ύψος λεπίδας (H_{rated}): | 686 mm | Μήκος λεπίδας (L_{rated}): | 4,27 m |
| Είδος εργασίας: | Εργασία σε περιορισμένο χώρο, διαμόρφωση πρανού | | | | |
| Τύπος εδάφους: | Αμμογάλικο, ελαφρώς συνεκτικό, Έδαφος με μεγάλη εκσκαψιμότητα (Κατηγορία 3 κατά DIN 18300:2012), Μέτριες συνθήκες εργασίας | | | | |
| Ταχύτητα ισοπεδωτή | Πίνακας 2.16 | Διαμόρφωση πρανού | Caterpillar (2016) | 4 km/h | |

| | | | | | |
|--|--|-----------------------------------|--|---|--------------|
| (v_{grader}) | | | | | |
| | Πίνακας 2.16 | | Komatsu (2013) | 2,1 km/h | |
| | Πίνακας 2.16 | | Nunally (2007) | 4 km/h | |
| | Πίνακας 2.16 | | Hüster (2005) | 6 km/h | |
| | Πίνακας 2.16 | | Hoffmann, (2006) | 9 km/h | |
| | Πίνακας 2.16 | | Kühn, (1984) | 8 km/h | |
| Ενεργό μήκος λεπίδας (L_e) | Πίνακας 2.17 | $L_{rated} = 4,27$ m Γωνία 30° | Caterpillar (2016) | $L_e = 3,70$ m | |
| Επικάλυψη λεπίδας (L_0) | | | Caterpillar (2016) | $L_0 = 0,60$ m | |
| Συντ. διαθεσιμότητας (f_{avail}) | Πίνακας 2.29 | 1500-2000 ώρες λειτουργίας | Kotte (1997) | 0,85 | |
| Συντ. ικανότητας χειριστή (f_{skill}) | Μέτρια εμπειρία / κατάσταση (Πίνακας 2.30) (Πίνακας 2.31) | Liebherr (2003) | Garbotz (1966), Girmscheidt (2010), Hüster (2005), Kotte (1997) | Caterpillar (2016), Peurifoy and Shexnayder (2002) | Kühn, (1984) |
| | | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,64 |
| Συντ. εκμετάλλευσης μηχ/τος (f_E) | Πίνακας 2.35 | Εργασία σε περιορισμένο χώρο | 0,75 | | |
| Ταχεία εκτίμηση παραγωγικότητας | Πίνακας 2.37 | Διαμόρφωση πρανούς | Girmscheidt (2010) | 6.000 m ² /h | |
| Αναλυτική εκτίμηση παραγωγικότητας (για 1 διέλευση) [m²/h] | | | | | |
| Γενική εξίσωση αναλυτικής εκτίμησης παραγωγικότητας | $Q_{eff} = 1000 \times v_{grader} \times (L_e - L_0) \times \prod_{x=1}^n f_x$ <p>όπου v_{grader} = η ταχύτητα κίνησης του ισοπεδωτή [km/h], L_e = ενεργό μήκος λεπίδας [m], L_0 = η επικάλυψη στο πλάτος εργασίας [m]. Η αναμενόμενη παραγωγικότητα μετράται σε m²/h και εξαρτάται από το πλήθος των διελεύσεων που απαιτούνται για την διαμόρφωση μίας δεδομένης επιφάνειας.</p> | | | | |
| Komatsu (2013) | $Q_{eff,grader}^{KOM} = 1000 \times v_{grader} \times (L_e - L_0) \times f_E^{KOM} = 1000 \times 2,1 \times (3,70 - 0,60) \times 0,75 = 4.883$ | | | | |
| Caterpillar (2016); Nunally (2007) | $Q_{eff,grader}^N / Q_{eff,grader}^{CAT} = 1000 \times v_{grader} \times (L_e - L_0) \times f_{skill}^{CAT} \times f_E^{CAT} = 1000 \times 4 \times (3,70 - 0,60) \times 0,75 \times 0,75 = 6.975$ | | | | |
| Kühn (1984) | $Q_{eff,dozer}^K = 1000 \times v_{grader} \times (L_e - L_0) \times f_{skill}^K \times f_E^K = 1000 \times 8 \times (3,70 - 0,60) \times 0,64 \times 0,75 = 11.904$ | | | | |
| Hoffmann (2006) | $Q_{eff,grader}^{HOF} = 1000 \times v_{grader} \times (L_e - L_0) \times f_E^{HOF} = 1000 \times 9 \times (3,70 - 0,90) \times 0,75 = 18.900$ | | | | |
| Hüster (2005) | $Q_{eff,grader}^H = 1000 \times v_{grader} \times (L_e - L_0) \times f_E^H = 1000 \times 6 \times (3,70 - 0,60) \times 0,75 = 13.950$ | | | | |

| | |
|-----------------------|---|
| Girmscheidt (2010) | $Q_{\text{eff,dozer}}^{\text{GM}} = Q_{\text{th}}^{\text{GM}} \times f_{\text{skill}}^{\text{GM}} \times f_{\text{E}}^{\text{GM}} = 6000 \times 0,85 \times 0,75 = 3.825$ |
|-----------------------|---|

A.7. Δομικός πυργογερανός

| | | | | | |
|--|--|--|---|--|---|
| Μηχάνημα: | Δομικός πυργογερανός | | | | |
| Κατασκευαστής: | Liebherr 140EC-H6 | Χαρακτηριστικό μέγεθος: | 140 tm | BGL-Nr.: | C.0 |
| Είδος εργασίας: | Εργασία σε περιορισμένο χώρο, ανύψωση σε ύψος 20m, γωνία στροφής προβόλου 45°, κίνηση φορείου για 15m, φορτίου 4t (χωρίς τον εξοπλισμό ανύψωσης) | | | | |
| Τύπος εδάφους: | - | | | | |
| | Χρόνος ανύψωσης / κατάβασης φορτίου ($t_{\text{lift}} / t_{\text{lower}}$) | Χρόνος στροφής προβόλου (t_{swing}) | Χρόνος πορείας φορείου (t_{move}) | Χρόνος δέσμευσης φορτίου (t_{attach}) | Χρόνος αποδέσμευσης φορτίου (t_{detach}) |
| Hoffmann (2006); Girmscheidt (2010) | 200 sec | 6,75 sec | 30 sec | 105 sec | 105 sec |
| Συντ. διαθεσιμότητας (f_{avail}) | Πίνακας 2.29 | 1500-2000 ώρες λειτουργίας | Kotte (1997) | 0,85 | |
| Συντ. ικανότητας χειριστή (f_{skill}) | Μέτρια εμπειρία / κατάσταση (Πίνακας 2.30) (Πίνακας 2.31) | Liebherr (2003) | Garbotz (1966), Girmscheidt (2010), Hüster (2005), Kotte (1997) | Caterpillar (2016), Peurifoy and Shexnayder (2002) | Kühn, (1984) |
| | | 0,85 | 0,80 | 0,75 | 0,64 |
| Συντ. εκμετάλλευσης μηχ/τος (f_{E}) | Πίνακας 2.35 | Εργασία σε περιορισμένο χώρο | 0,75 | | |
| Ταχεία εκτίμηση παραγωγικότητας | - | | | | |
| Αναλυτική εκτίμηση παραγωγικότητας [t/h] | | | | | |

| | |
|---|---|
| Γενική εξίσωση αναλυτικής εκτίμησης παραγωγικότητας | $Q_{\text{eff}} = 3600 \times \frac{m_{\text{max}} - m_0}{t_{\text{th,crane}}} \times \prod_{x=1}^n f_x,$ <p>όπου m_{max} = το μέγιστο επιτρεπόμενο βάρος του φορτίου [t], m_0 = το βάρος του εξοπλισμού ανύψωσης (π.χ. γάντζος κτλ) [t], $t_{\text{th,crane}}$ = θεωρητικός χρόνος κύκλου [min].</p> |
| Hoffmann (2006); Girmscheidt (2010) | $Q_{\text{eff,crane}}^{\text{HOF}} = 3600 \times \frac{m_{\text{max}} - m_0}{t_{\text{th,crane}}^{\text{HOF}}} \times f_{\text{avail}}^{\text{KT}} \times f_{\text{skill}}^{\text{GM}} \times f_{\text{E}}^{\text{HOF}} = 3600 \times \frac{4}{200 + 6,75 + 30 + 105 + 105} \times 0,85 \times 0,80 \times 0,75 = 16,44$ |

A.8. Αντλία σκυροδέματος

| | | | | | |
|---|---|------------------------------|-------------------------------------|----------|-----|
| Μηχάνημα: | Αντλία σκυροδέματος | | | | |
| Κατασκευαστής: | 54-5. 16H | Χαρακτηριστικό μέγεθος: | 160 m ³ /h | BGL-Nr.: | B.7 |
| Είδος εργασίας: | Εργασία σε περιορισμένο χώρο, σκυροδέτησης πλάκας | | | | |
| Τύπος εδάφους: | - | | | | |
| Συντ. πλήρωσης (f _{hose}) | Πίνακας 2.33 | Βαθμός πλήρωσης: ½ - ¾ | Hoffmann (2006); Girmscheidt (2010) | 0,80 | |
| Συντ. ακρίβειας σκυροδέτησης (f _{concrete}) | Πίνακας 2.34 | Τύπος σκυροδέτησης: Πλάκα | Hoffmann (2006); Girmscheidt (2010) | 1,00 | |
| Συντ. εκμετάλλευσης μηχαν/τος (f _E) | Πίνακας 2.35 | Εργασία σε περιορισμένο χώρο | 0,75 | | |
| Αναλυτική εκτίμηση παραγωγικότητας [m³/h] και διαστασιολόγηση μηχανήματος | | | | | |
| Γενική εξίσωση αναλυτικής εκτίμησης παραγωγικότητας | $P = \frac{Q_{\text{eff}} \times p}{25}$ <p>με $Q_{\text{eff}} = Q_{\text{th}} \times \prod_{x=1}^n f_x = Q_{\text{th}} \times f_{\text{hose}} \times f_{\text{concrete}} \times f_{\text{E}}$</p> <p>όπου P = ισχύς της αντλίας [kW], p = η πίεση του σκυροδέματος στον σωλήνα της αντλίας [bar].</p> | | | | |
| Hoffmann (2006); Girmscheidt (2010) | <p>Έστω επιθυμητή $Q_{\text{eff}} = 20 \text{ m}^3/\text{h} \Rightarrow Q_{\text{eff}} = Q_{\text{th}} \times f_{\text{hose}} \times f_{\text{concrete}} \times f_{\text{E}} \Rightarrow Q_{\text{th}} = Q_{\text{eff}} / f_{\text{hose}} \times f_{\text{concrete}} \times f_{\text{E}} = 20 / 0,80 \times 1,00 \times 0,75 = 33 \text{ m}^3/\text{h}$</p> <p>Από Σχήμα 2.40:</p> | | | | |

• Μέτρο εξάπλωσης σκυροδέματος: 40cm

• Διάμετρος δικτύου: Φ125mm

• Ύψος: 60m

• Μήκος: 300m

Πίεση $p = 50\text{bar} + 60\text{m} \times 0,25\text{bar/m} = 65\text{ bar}$

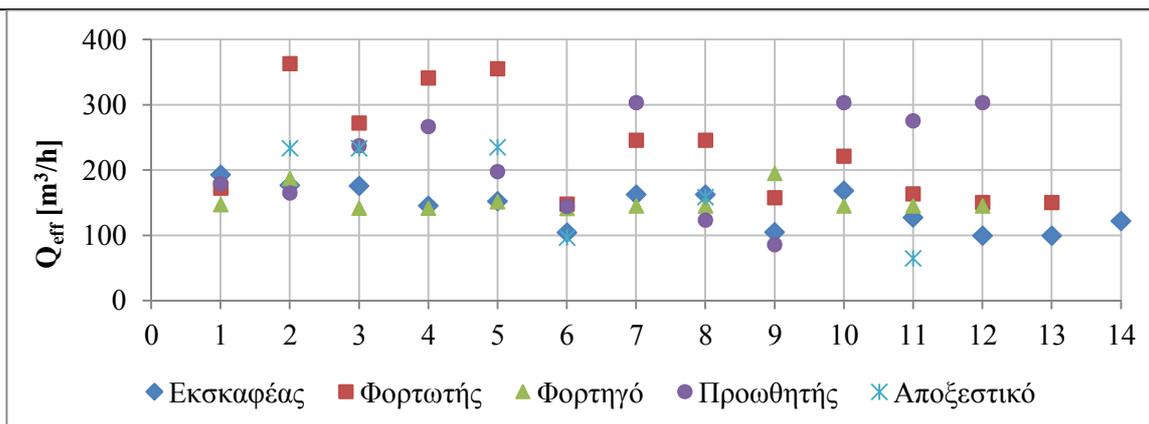
Χαρακτηριστικό μέγεθος αντλίας: $Q_{\text{eff}} \times p = 33\text{m}^3/\text{h} \times 65\text{bar} \approx 2.145\text{m}^3/\text{h bar}$

$$P = \frac{Q_{\text{eff}} \times p}{25} = \frac{2145}{25} = 86\text{kW}$$

Οι μέθοδοι που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια εκτιμούν την παραγωγικότητα με διαφορετικό τρόπο, δίνοντας διαφορετικές εκτιμήσεις για την ίδια εργασία και τύπο μηχανήματος. Ενδεικτικά, ο Πίνακας Α.1 και το Σχήμα Α.1 απεικονίζουν τη χαρακτηριστική διασπορά των αποτελεσμάτων της συγκριτικής αξιολόγησης των δεκατεσσάρων (14) μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας που μελετήθηκαν.

Πίνακας Α.1: Συγκριτική ανάλυση της παραγωγικότητας δομικών μηχανών

| A/A | Μέθοδος εκτίμησης παρ/τας | Δομικό Μηχάνημα | | | | | | | |
|-----|------------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | D.1 | D.3 | P.2 | D.4 | D.5 | D.7 | C.0 | B.7 |
| | |  |  |  |  |  |  |  |  |
| | | m ³ /h | m ² /h | t/h | kW |
| 1 | Komatsu (2013) | 167,65 | 172,20 | 146,44 | 179,03 | | 4883 | - | - |
| 2 | Nunally (2007) | 153,42 | 362,64 | 186,94 | 164,73 | 233,37 | 6975 | - | - |
| 3 | Caterpillar (2016) | 175,30 | 271,98 | 141,17 | 237,20 | 233,37 | 6975 | - | - |
| 4 | Liebherr (2003) | 145,37 | 340,69 | 141,17 | 266,22 | - | - | - | - |
| 5 | Peurifoy and Schexnayder (2002) | 132,11 | 354,72 | 150,95 | 197,67 | 234,64 | - | - | - |
| 6 | Kühn (1984) | 103,88 | 147,70 | 140,56 | 144,00 | 96,00 | 11904 | - | - |
| 7 | BML (1983) | 162,32 | 245,52 | 144,75 | 302,96 | - | - | - | - |
| 8 | Hoffmann (2006) | 162,32 | 245,52 | 144,75 | 123,19 | 158,52 | 18900 | 16,44 | 86 |
| 9 | Hüster (2005) | 104,50 | 157,13 | 194,50 | 85,39 | - | 13950 | - | - |
| 10 | Bauer (2007) | 146,09 | 220,97 | 144,75 | 302,96 | - | - | - | - |
| 11 | Girmscheidt (2010) | 110,38 | 163,32 | 144,75 | 275,09 | 64,52 | 3825 | 16,44 | 86 |
| 12 | Garbotz (1966) | 99,34 | 150,26 | 144,75 | 302,96 | - | - | - | - |
| 13 | Kotte (1997) | 99,34 | 150,26 | - | - | - | - | - | - |
| 14 | Edwards and Holt (2000) | 121,74 | | | | | | | |



Σχήμα Α.1: Συγκριτική απεικόνιση της παραγωγικότητας δομικών μηχανών

¹ Komatsu (2013), ² Nunally (2007), ³ Caterpillar (2016), ⁴ Liebherr (2003), ⁵ Peurifoy and Schexnayder (2002), ⁶ Kühn (1984), ⁷ BML (1983), ⁸ Hoffmann (2006), ⁹ Hüster (2005), ¹⁰ Bauer (2007), ¹¹ Girmscheidt (2010), ¹² Garbotz (1966), ¹³ Kotte (1997), ¹⁴ Edwards and Holt (2000)

Παράρτημα Β: Ευρετήριο βασικών όρων

A

αθροιστικά δεδομένα, 94, 190
αθροιστικός ή απολογιστικός ρυθμός παραγωγής, 30
αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης του λάθους, 101
αναμενόμενη παραγωγικότητα, 31, 36, 131, 173, 174, 179
ανάστροφος υπολογισμός του σφάλματος, 101
ανεξάρτητες επαναλήψεις, 120
ανεξάρτητη μεταβλητή, 96
απευθείας παρατήρηση, 113, 168
απλή παλινδρόμηση, 97
αυτοσυσχετιστικά νευρωνικά δίκτυα, 99
αφηρημένο μοντέλο, 103

B

βαθμός μάθησης του δικτύου, 129
βαθμωτό μοντέλο, 95
βέλτιστη εκτίμηση, 123
βραχυπρόθεσμη παραγωγικότητα, 30

Γ

γραμμικό στατιστικό μοντέλο, 96

Δ

δείκτες βάσης αναφοράς, 131
δείκτης μέτρησης πεδίου, 91
δεσμευμένη δραστηριότητα, 110
διάγραμμα διασποράς, 98, 129
διάγραμμα μόχλευσης, 169
διαδικασία κατάταξης, 125
διακλαδωτής, 110
διακριτή προσομοίωση, 103
διακύμανση, 92, 95, 129, 132, 154, 175, 195, 198, 200, 205, 206, 207
διαστρωτής σκυροδέματος, 168
διεπιφάνεια εισαγωγής δεδομένων, 142
δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης πολλών επιπέδων, 176
διορθωτικοί πολλαπλασιαστές, 32
δοκιμαστικές εκτελέσεις προσομοίωσης, 120
δραστηριότητα υπό αίρεση, 109, 110, 111

E

εκθετικό μοντέλο, 95
εκπαίδευση ΤΝΔ, 129
ελάχιστο απόλυτο σφάλμα, 179
ελεγχόμενοι παράγοντες, 34, 122
έλεγχος δραστηριοτήτων, 104
έλεγχος καλής προσαρμογής, 98
έλεγχος ΤΝΔ, 129

ενδιάμεσα ή κρυφά επίπεδα, 99
εξαρτημένη μεταβλητή, 96
επαλήθευση, 120
επικύρωση, 120, 178, 179
επίπεδα εισόδου, 99
επίπεδα εξόδου, 99
επίπεδο αφαίρεσης μοντέλου, 205
ετεροσυσχετιστικά νευρωνικά δίκτυα, 99
ευθύγραμμο μοντέλο, 95, 207
εύρεση εκτόπων, 98

H

ημερήσιο δελτίο παραγωγικότητας, 91

K

καμπύλη εμπιστοσύνης, 169
κυβικό μοντέλο, 95

Λ

λειτουργικά σενάρια, 130, 173, 201, 204, 205, 209
λειτουργική διάταξη, 130, 131, 142, 183
λειτουργική συσχέτιση, 97
λογαριθμική κλίμακα, 95

M

μακροπρόθεσμη παραγωγικότητα, 30
μακροσκοπικό επίπεδο, 90
μέγιστο απόλυτο σφάλμα, 179
μέθοδοι προσανατολισμένες στα δεδομένα, 122
μέθοδοι προσανατολισμένες στη διαδικασία υπολογισμού, 122
μέθοδος εργασίας, 34, 158, 203
μέθοδος πεντάλεπτης μέτρησης, 91
μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων, 155, 190
μελέτη περίπτωσης, 133, 149, 182, 183, 199, 200, 206, 253
μέσο απόλυτο σφάλμα, 179
μέσο τετραγωνικό σφάλμα, 129, 179, 180, 181
μεταβλητές δείκτες, 98
μεταβλητή εισόδου, 97
μεταβλητή εξόδου, 97
μη γραμμικό στατιστικό μοντέλο, 96
μη ελεγχόμενοι παράγοντες, 122
μηχανές κυκλικής λειτουργίας, 37
μικροσκοπικό επίπεδο, 90
μοναδιαία δεδομένα, 94
μοναδιαίος ρυθμός παραγωγής, 30, 31
μοντέλο έντασης εξοπλισμού, 37, 41, 43, 46, 48, 83
μοντέλο έντασης εργασίας, 35
μοντέλα μελέτης εργασίας, 33, 44
μοντέλα παλινδρόμησης, 96, 97, 98, 128

μοντέλο έντασης εξοπλισμού, 35
μοντέλο έντασης εργασίας, 35
μοντέλο παραγωγικότητας, 35, 37, 133, 171, 175
μοντέλο παραγωγικότητας και σταλίας, 91

N

νευρώνες, 99, 176
νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης, 99

O

ολισθαίνων μεταλλότυπος, 137
ομάδες δεδομένων, 130, 132
οπισθοδιάδοση του λάθους, 176
οπτικό μοντέλο, 103
όριο μάθησης, 154
ουρά αναμονής, 109

Π

παραγοντικά μοντέλα, 33
παραγοντικό μοντέλο, 31
παρατηρηθείσα πιθανότητα σημαντικότητας, 169
πηγαία δεδομένα, 149, 151
πίνακας ανάλυσης διακύμανσης, 169
πίνακας προσαρμογής μοντέλου, 169
πλάκα θεμελίωσης, 136, 138, 139, 142, 186, 187, 189, 191, 199, 260, 262, 264, 266, 268, 270, 272, 274, 276, 278, 280, 282, 284, 286, 288, 290, 292, 294, 296, 298, 300, 302, 304
πλήρως συνδεδεμένο νευρωνικό δίκτυο, 99
πλωτά κιβώτια σκυροδέματος, 136
πλωτή αυτοβυθιζόμενη δεξαμενή, 137, 156, 183
πολλαπλή παλινδρόμηση, 97
προσαρμοσμένος δείκτης R^2 , 129
πρόσθιος υπολογισμός της εξόδου, 101
προσομοίωση, xiv, xv, xvi, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 29, 94, 96, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 114, 119, 120, 121, 122, 134, 135, 136, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 147, 148, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 183, 184, 185, 186, 187, 189, 190, 191, 192, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 310
προσομοίωση διακριτών γεγονότων, 103, 105, 122, 152
πρότυπα μοντέλα, 142, 153, 185, 209, 254

P

ρυθμός μάθησης, 94, 95, 152, 153, 155, 190, 192, 195, 196, 207

ρυθμός ολίσθησης, 113, 137, 184, 186, 188, 206

Σ

σημείο τυπικής παραγωγικότητας, 153, 190
στατιστική συσχέτιση, 97
στοιχείο δεδομένων, 128, 175
στοχαστική προσομοίωση, 103
στρατηγική ροής της εργασίας, 121
συγκεντρωτικές ουρές, 147
συμπαγής όγκος, 41
συνάψεις, 99
σύνδεσμος αποδέσμευσης, 111
σύνδεσμος δέσμευσης, 111
σύνδεσμος διακλάδωσης, 111
συνθήκες βάσης αναφοράς, xv, 124, 125, 131, 133, 160, 161, 174, 202, 204, 205, 208
σύνολο δεδομένων, 101, 128, 130, 175
συνοπτικά στατιστικά στοιχεία, 120
συντελεστές παραγωγικότητας, xv, 27, 31, 33, 36, 90, 92, 112, 113, 123, 124, 125, 126, 128, 130, 133, 158, 161, 164, 165, 168, 203, 204, 206, 208
συντελεστές προσαρμογής, xiv, 32, 126, 127, 130, 133, 170, 172, 174, 180, 182, 203, 204
συντελεστής βαρύτητας, 99
συντελεστής επιπλήσματος, 41
συντελεστής παλινδρόμησης, 97
συντελεστής παραγωγικότητας, 92, 113
συντελεστής παρεμβολής, 97
συντελεστής πλήρωσης πτύου, 46
συντελεστής πολλαπλού προσδιορισμού, 178
σφάλμα πρόβλεψης, 97

T

τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, 21, 29, 98, 99, 209
τεχνική της οπίσθιας σταδιακής επιλογής, 168

Φ

φαινομενική εγκυρότητα, 143, 170
φαινόμενο μάθησης, xvi, 36, 94, 95, 152, 153, 192, 195, 198, 208, 209

X

χαλαρός όγκος, 41