ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΑΡΙΝΑΣ ΚΥΡ. ΜΑΡΙΝΕΛΛΗ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού ΕΜΠ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:

Σ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ

Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Δεκέμβριος 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΑΡΙΝΑΣ ΚΥΡ. ΜΑΡΙΝΕΛΛΗ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού ΕΜΠ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Γ. ΚΑΝΕΛΛΑΪΔΗΣ
   Καθηγητής ΕΜΠ
2. Σ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ
   Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)
3. Ι.-Π. ΠΑΝΤΟΥΒΑΚΗΣ
   Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Γ. ΚΑΝΕΛΛΑΪΔΗΣ
   Καθηγητής ΕΜΠ
2. Σ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ
   Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)
3. Ι.-Π. ΠΑΝΤΟΥΒΑΚΗΣ
   Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ
4. Δ. ΘΕΟΔΩΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ
   Καθηγητής Παν. Πατρών
5. Γ. ΚΑΛΦΑΚΑΚΟΥ
   Καθηγήτρια ΑΠΘ
6. Α. ΛΟΪΖΟΣ
   Καθηγητής ΕΜΠ
7. Μ. ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ
   Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, Δεκέμβριος 2012

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

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΙΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΜΑΡΙΝΑΣ ΚΥΡ. ΜΑΡΙΝΕΛΛΗ

Διπλωματούχου Πολιτικού Μηχανικού ΕΜΠ

Γ. ΚΑΝΕΛΛΑΪΔΗΣ Καθηγητής ΕΜΠ	Σ. ΛΑΜΠΡΟΠΟΥΛΟΣ Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ	Ι.-Π. ΠΑΝΤΟΥΒΑΚΗΣ Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ
Δ. ΘΕΟΔΩΡΑΚΟΠΟΥΛΟΣ Καθηγητής Παν. Πατρών	Γ. ΚΑΛΦΑΚΑΚΟΥ Καθηγήτρια ΑΠΘ	
Α. ΛΟΪΖΟΣ Καθηγητής ΕΜΠ	Μ. ΚΑΡΛΑΥΤΗΣ Αναπλ. Καθηγητής ΕΜΠ	

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διατριβή εκπονήθηκε στον Τομέα Προγραμματισμού και Διαχείρισης Τεχνικών Έργων της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ (07/2007-09/2012).

Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται προς:

τον κ. Λαμπρόπουλο Σ., Αναπλ. Καθηγητή ΕΜΠ, επιβλέποντα της Διατριβής, για την αδιάλειπτη υποστήριξη και καθοδήγηση,

τους κ.κ. Κανελλαΐδη Γ., Καθηγητή ΕΜΠ και Παντουβάκη Ι.-Π., Αναπλ. Καθηγητή ΕΜΠ, μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής, για τις εποικοδομητικές παρατηρήσεις τους,

τους κ.κ. Μαρούλη Ι. και Ολύμπιο Κ. στελέχη της εταιρείας ΑΕΓΕΚ Α.Ε., τους κ.κ. Μπορονκάυ Ε. και Ανέστη Κ., στελέχη της Κατασκευαστικής Κοινοπραξίας Αυτοκινητόδρομος Κεντρικής Ελλάδας –Ε65 και τον κ. Μελά Κ., στέλεχος της εταιρείας ΤΕΡΝΑ Α.Ε. για την παροχή στοιχείων για τις ανάγκες της έρευνας.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ vii
ΤΙΤΛΟΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ xi
ΤΙΤΛΟΙ ΠΙΝΑΚΩΝ xiii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ xv
EXTENDED ABSTRACT xvii

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1
1.1 Το πλαίσιο της Έρευνας 1
1.2 Περιεχόμενο και στόχος της έρευνας 2
1.3 Δομή της Διατριβής 4

2. ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ 7
2.1 Εργασία μετακίνησης εδαφικού υλικού 7
2.2 Βασικός μηχανικός εξοπλισμός 7
2.2.1 Ελαστικοφόρος Φορτωτής 8
2.2.2 Εκσκαφέας 8
2.2.3 Χωματουργικό όχημα 9
2.2.4 Αποξεστικό όχημα 11
2.3 Λειτουργική Ανάλυση εργασιών μετακίνησης εδαφικού υλικού 12
2.3.1 Εκτίμηση χαρακτηριστικών και συνθηκών εργασίας 12
2.3.2 Επιλογή χαρακτηριστικών μηχανικού εξοπλισμού 15
2.3.3 Εκτίμηση ωριαίας παραγωγής εξοπλισμού 16
2.3.4 Ωριαία παραγωγή και συναρμογή συνδυασμού μέσων 22
2.3.5 Διαστασιολόγηση συνδυασμού 22

3. ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ 27
3.1 Εισαγωγή 27
3.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 27
3.3 Διάγνωση λειτουργικής κατάστασης οχημάτων 29
3.3.1 Συλλογή και περιγραφή στοιχείων 29
3.3.2 Εφαρμογή Διαχωριστικής Ανάλυσης 30
3.3.3 Εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων 37
3.4 Σύνοψη - Συμπεράσματα 41

4. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΦΕΔΡΙΚΟΥ ΣΤΟΛΟΥ ΟΧΗΜΑΤΩΝ..... 43
4.1 Εισαγωγή 43
4.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 43
4.3 Προσδιορισμός βέλτιστου πλήθους εφεδρικών οχημάτων 44
4.3.1 Πιθανοτικό μοντέλο πρόβλεψης αριθμού βλαβών..... 44
4.3.2 Ανάλυση κόστους οχημάτων σε λειτουργία, βλάβη, εφεδρεία 48
4.3.3 Βέλτιστη διαστασιολόγηση στόλου εφεδρικών οχημάτων 49
4.3.4 Αριθμητική διερεύνηση – Ανάλυση Ευαισθησίας..... 51
4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενων εμπειρικών κανόνων – προτεινόμενης μεθόδου 59
4.5 Σύνοψη - Συμπεράσματα 62

5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΦΟΡΤΩΤΗ 63
5.1 Εισαγωγή 63
5.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 63
5.3 Αξιολόγηση εναλλακτικών Μεθόδων Φόρτωσης..... 64
5.4 Επιβεβαίωση των παραδοχών της μεθόδου 70
5.5 Αριθμητική διερεύνηση – Ανάλυση Ευαισθησίας 73
5.6 Ταχεία επιλογή μεθόδου φόρτωσης – Ανάλυση Ευαισθησίας..... 77
5.7 Σύνοψη - Συμπεράσματα..... 85

6. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ..... 87
6.1 Εισαγωγή 87
6.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση 87
6.3 Αλγοριθμικός προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αυτοδύναμου αποξεστικού οχήματος 89
6.4 Σύγκριση υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου- Αριθμητική διερεύνηση 93
6.5 Αλγοριθμικός προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αποξεστικού οχήματος σε συνδυασμό με προωθητή – ταύρο 96
6.6 Ταυτόχρονη βελτιστοποίηση χρόνου φόρτωσης και αριθμού αποξεστικών σε συνδυασμό προωθητή - αποξεστικών 99
6.7 Σύνοψη - Συμπεράσματα.....101

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....103

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 107

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
α	κλίση εδάφους διαδρομής μεταφοράς
γ	ειδικό βάρος υλικού
δ	βύθιση τροχών
ε	συντελεστής χαλάρωσης
$\eta_{εκμ}$	συντελεστής εκμετάλλευσης
$\eta_{μηχ}$	συντελεστής μηχανικής απόδοσης
$\eta_{ταχ,μετ}$	συντελεστής ταχύτητας εφαρμοζόμενος στη μέγιστη ταχύτητα μετάβασης
$\eta_{ταχ,\ επ}$	συντελεστής ταχύτητας εφαρμοζόμενος στη μέγιστη ταχύτητα επιστροφής
$\lambda_{φ}$	λόγος φορτίου μερικής φόρτωσης προς συνολικό φορτίο
$\lambda_{κ}$	λόγος κόστους φορτωτή προς κόστος οχήματος
ν	αριθμός οχημάτων για βέλτιστη συναρμογή με τους φορτωτές (δεκαδικός)
ξ	απαιτούμενος αριθμός φορτώσεων (δεκαδικός) για πλήρη φόρτωση του οχήματος
[ξ]	μέγιστος επιτρεπτός αριθμός πλήρων φορτώσεων (ακέραιος)
φ	συντελεστής πλήρωσης
$φ_{φ}$	συντελεστής πλήρωσης φορτωτή
$φ_{οχ}$	συντελεστής πλήρωσης οχήματος
$B_{απ}$	απόβαρο οχήματος
$B_{μετ}$	μεταφερόμενο βάρος
$B_{οχ,max}$	μέγιστο φορτίο οχήματος
Δ	διαθεσιμότητα οχήματος
$\bar{Δ}$	μέση διαθεσιμότητα στόλου οχημάτων
ΔΑΔ	Διαχωριστική Ανάλυση για Διαχωρισμό
ΔΑΚ	Διαχωριστική Ανάλυση για Κατάταξη
ΔΣ	Δείκτης Σκοπιμότητας
ΔQ	αύξηση παραγωγής για τοποθέτηση n+1 αντί n οχημάτων
Π(n)	πιθανότητα λειτουργίας n οχημάτων
ΠΜ	προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης χρόνου φόρτωσης αποξεστικού

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
ΣΣ	Συντελεστής Συναρμογής
ΥΜ	υφιστάμενη μέθοδος βελτιστοποίησης χρόνου φόρτωσης αποξεστικού
b	σταθερά αλγορίθμου χρυσής τομής
$c_{εν}$	κόστος ενεργοποίησης οχήματος
c_{ox}	ωριαίο κόστος οχήματος
$c_{φ}$	ωριαίο κόστος φορτωτή
c_{b}	ωριαίο κόστος μισθώματος και επισκευών οχήματος
c_{f}	ωριαίο κόστος καυσίμου οχήματος
$c_{n,z}$	συνολικό ωριαίο κόστος για n οχήματα σε λειτουργία και z σε εφεδρεία
$c_{n+z-x,z}$	συνολικό ωριαίο κόστος για n+z-x οχήματα σε λειτουργία και z σε εφεδρεία
$c_{u,n,z}$	τιμή μονάδας εργασίας για n οχήματα σε λειτουργία και z σε εφεδρεία
$c_{u,n+z-x,z}$	τιμή μονάδας εργασίας για n+z-x οχήματα σε λειτουργία και z σε εφεδρεία
$c_{u(z)}$	πιθανοτικά σταθμισμένη τιμή μονάδας εργασίας για z εφεδρικά οχήματα
$c_{u,A}$	τιμή μονάδας εργασίας για εφαρμογή της μεθόδου φόρτωσης A
$c_{u,B}$	τιμή μονάδας εργασίας για εφαρμογή της μεθόδου φόρτωσης B
c_{w}	ωριαίο κόστος οδηγού οχήματος
e	ακρίβεια προσδιορισμού βέλτιστου χρόνου φόρτωσης
f	πλήθος εξισώσεων διαχωρισμού
g	αριθμός επιπέδων εξαρτημένης μεταβλητής
	πλήθος εξισώσεων κατάταξης
k	αριθμός φορτωτών συνδυασμού
m	πλήθος μεταβλητών
n	αριθμός οχημάτων συνδυασμού
r	λόγος τιμής μονάδας εργασίας για εφαρμογή της μεθόδου φόρτωσης B προς τιμή μονάδας εργασίας για εφαρμογή της μεθόδου φόρτωσης A
$t_{απ}$	χρόνος κύκλου αποξεστικού
$t_{απ,βελτ}$	χρόνος φόρτωσης για μεγιστοποίηση παραγωγής αποξεστικού οχήματος
$t_{επ}$	χρόνος επιστροφής
$t_{μετ}$	χρόνος μετάβασης
t_{ox}	χρόνος κύκλου οχήματος
$t_{πρ}$	χρόνος κύκλου προωθητή

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
$t_{πρ,βελτ}$	χρόνος φόρτωσης για μεγιστοποίηση παραγωγής προωθητή
$t_{σταθ}$	σταθεροί χρόνοι για εκτέλεση ελιγμών και απόθεση υλικού
$t_{συν,βελτ}$	βέλτιστος χρόνος φόρτωσης συνδυασμού προωθητή – αποξεστικού οχήματος
$t_{φ}$	χρόνος κύκλου φορτωτή
$t_{φορτ}$	χρόνος φόρτωσης
t_i	i-οστή μεταβλητή Διαχωριστικής Ανάλυσης
t_1	κάτω όριο διαστήματος αναζήτησης βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αποξεστικού οχήματος
t_2	πρώτη ενδιάμεση τιμή χρόνου φόρτωσης παραγόμενη με βάση την αναλογία της Χρυσής Τομής
t_3	δεύτερη ενδιάμεση τιμή χρόνου φόρτωσης παραγόμενη με βάση την αναλογία της Χρυσής Τομής
t_4	άνω όριο διαστήματος αναζήτησης βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αποξεστικού οχήματος
t^*	χρόνος φόρτωσης για μηδενική διαφορά παραγωγής προωθητή - αποξεστικού οχήματος
w_{ji}	συντελεστής i-οστης μεταβλητής στη j-οστή εξίσωση κατάταξης
w_r	συντελεστής αντίστασης κύλισης
w_s	συντελεστής αντίστασης κλίσης
x	αριθμός ταυτόχρονων βλαβών
z	αριθμός εφεδρικών οχημάτων
z_{opt}	βέλτιστος αριθμός εφεδρικών οχημάτων
D_j	j-οστή εξίσωση διαχωρισμού
$D_{j\ stand}$	j-οστή εξίσωση διαχωρισμού σε τυποποιημένη μορφή
E_{xj}	ενδεχόμενο εμφάνισης x βλαβών
L	απόσταση μεταφοράς
N_e	ιπποδύναμη οχήματος
$P(E_{xj})$	πιθανότητα ικανοποίησης ενδεχομένου E_{xj}
P(x)	πιθανότητα εκδήλωσης x βλαβών
$Q_{απ}$	ωριαία παραγωγή αποξεστικού
$Q_{απ,max}$	μέγιστη ωριαία παραγωγή αποξεστικού
$Q_{απαιτ}$	απαιτούμενη ωριαία παραγωγή
$Q_{απ}(t_{φορτ})$	συνάρτηση μεταβολής ωριαίας παραγωγής αποξεστικού με το χρόνο φόρτωσης

ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
$Q_{ομ}$	ωριαία παραγωγή ομάδας μέσων
$Q_{οχ}$	ωριαία παραγωγή οχήματος
$Q_{πρ}$	ωριαία παραγωγή προωθητή
$Q_{πρ}(t_{φορτ})$	συνάρτηση μεταβολής ωριαίας παραγωγής προωθητή με το χρόνο φόρτωσης
$Q_{πρ,\ max}$	μέγιστη ωριαία παραγωγή προωθητή
$Q_{συνδ}$	ωριαία παραγωγή συνδυασμού ομάδων διαφορετικών μέσων
$Q_{φ}$	ωριαία παραγωγή φορτωτή
S_j	j-οστή εξίσωση κατάταξης
$T_{εργ}$	διαθέσιμος χρόνος εργασίας
$U_{επ}$	μέση ταχύτητα οχήματος κατά την επιστροφή
$U_{μετ}$	μέση ταχύτητα οχήματος κατά τη μετάβαση
$U_{φορ,max}$	μέγιστη ταχύτητα οχήματος υπό το βάρος του μεταφερόμενου φορτίου μόνο (θεωρητικό μέγεθος)
U_{lim}	όριο ταχύτητας οχήματος
$U_{max,επ}$	μέγιστη ταχύτητα οχήματος κατά την επιστροφή
$U_{max,\ μετ}$	μέγιστη ταχύτητα οχήματος κατά τη μετάβαση
V	όγκος υλικού προς μεταφορά
$V_{μετ}$	μεταφερόμενος όγκος υλικού
V_{ox}	χωρητικότητα σκάφης οχήματος
$V_{φ}$	χωρητικότητα κάδου φορτωτή
V_{ji}	συντελεστής i-οστης μεταβλητής στη j-οστή εξίσωση διαχωρισμού

ΤΙΤΛΟΙ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχ. 2.1: Ελαστικοφόρος φορτωτής 8
Σχ. 2.2: Εκσκαφέας με μετωπικό κάδο φόρτωσης 9
Σχ. 2.3: Εκσκαφέας με ανεστραμμένο κάδο φόρτωσης 9
Σχ. 2.4: Χωματουργικό όχημα οπίσθιας ανατροπής 10
Σχ. 2.5: Αρθρωτό χωματουργικό όχημα 10
Σχ. 2.6: Αποξεστικό όχημα με μηχανισμό αυτοφόρτωσης 11
Σχ. 2.7: Συνδυασμός συμβατικού αποξεστικού οχήματος με προωθητή-ταύρο 11
Σχ. 2.8: Γεωμετρική χωρητικότητα και χωρητικότητα υπερπλήρωσης κάδου 13
Σχ. 2.9: Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστή ταχύτητας 19
Σχ. 2.10: Διάγραμμα ταχείας εκτίμησης ταχύτητας χωματουργικού οχήματος 19
Σχ. 2.11: Αλγόριθμος υπολογισμού ωριαίας παραγωγής οχήματος 20
Σχ. 2.12: Αλγόριθμος προσδιορισμού βέλτιστου πλήθους οχημάτων για δεδομένο αριθμό φορτωτών 26

Σχ. 3.1: Γραφική διερεύνηση συνδιακύμανσης μεταβλητών 31
Σχ. 3.2: Διαχωριστική λειτουργία εξισώσεων διαχωρισμού 32
Σχ. 3.3: Διαχωρισμός παρατηρήσεων με βάση τις διαχωριστικές εξισώσεις 33
Σχ. 3.4: Πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με ένα ενδιάμεσο επίπεδο 39
Σχ. 3.5: Δομή νευρωνικού δικτύου μέγιστης ακρίβειας 40
Σχ. 3.6: Συμβολή μεταβλητών εισόδου στη διαμόρφωση της εξόδου κατά την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου 41

Σχ. 4.1: Πιθανότητα εκδήλωσης ταυτόχρονων βλαβών σε στόλο 4 οχημάτων για διαφορετική μέση διαθεσιμότητα οχημάτων 48
Σχ. 4.2: Αλγόριθμος προσδιορισμού τιμής μονάδας εργασίας για z εφεδρικά οχήματα 50
Σχ. 4.3: Τιμή μονάδας εργασίας για διαφορετικό πλήθος εφεδρικών οχημάτων 55
Σχ. 4.4: Βέλτιστος αριθμός εφεδρικών οχημάτων αναλόγως μεγέθους και διαθεσιμότητας βασικού στόλου 56
Σχ. 4.5: Βέλτιστο πλήθος εφεδρικών οχημάτων για βασικό στόλο n οχημάτων με $\bar{\Delta}$=0,80, αναλόγως τιμής c_b/c_w 57
Σχ. 4.6: Βέλτιστο πλήθος εφεδρικών οχημάτων για βασικό στόλο n οχημάτων με $\bar{\Delta}$=0,85, αναλόγως τιμής c_b/c_w 58
Σχ. 4.7: Βέλτιστο πλήθος εφεδρικών οχημάτων για βασικό στόλο n οχημάτων με $\bar{\Delta}$=0,90, αναλόγως τιμής c_b/c_w 58
Σχ. 4.8: Βέλτιστο πλήθος εφεδρικών οχημάτων για βασικό στόλο n οχημάτων με $\bar{\Delta}$=0,95, αναλόγως τιμής c_b/c_w 58
Σχ. 4.9: Αναλογία βασικών – εφεδρικών οχημάτων βάσει εμπειρικών κανόνων και προτεινόμενης μεθόδου 59

Σχ. 4.10: Αριθμός απαιτούμενων εφεδρικών οχημάτων κατά εμπειρικούς κανόνες και προτεινόμενη μέθοδο 60
Σχ. 4.11: Αριθμός απαιτούμενων εφεδρικών οχημάτων κατά εγχειρίδια Terex, SME και προτεινόμενη μέθοδο 61

Σχ. 5.1: Αλγόριθμος προσδιορισμού Δείκτη Σκοπιμότητας 69
Σχ. 5.2: Μεταβολή Δείκτη Σκοπιμότητας για διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς - ξ=5,50 - θεωρητικοί συνδυασμοί 69
Σχ. 5.3: Μεταβολή Δείκτη Σκοπιμότητας για διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς ξ=5,50 - θεωρητικοί και πραγματικοί συνδυασμοί για k_A=1 72
Σχ. 5.4: Μεταβολή Δείκτη Σκοπιμότητας για διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς ξ=5,50 - θεωρητικοί και πραγματικοί συνδυασμοί για k_A=1,2,3 73
Σχ. 5.5: Διάγραμμα αξιολόγησης σκοπιμότητας μη πλήρους φόρτωσης 74
Σχ. 5.6: Επίδραση χρόνου κύκλου φορτωτή στην τιμή του Δείκτη Σκοπιμότητας – ξ=5,50 75
Σχ. 5.7: Επίδραση σταθερού χρόνου οχήματος στην τιμή του Δείκτη Σκοπιμότητας – ξ=5,50 76
Σχ. 5.8: Επίδραση λόγου κόστους φορτωτή-οχήματος στην τιμή του Δείκτη Σκοπιμότητας – ξ=5,50 76
Σχ. 5.9: Διάγραμμα ταχείας επιλογής μεθόδου φόρτωσης – θεωρητικοί συνδυασμοί 78
Σχ. 5.10: Διάγραμμα ταχείας επιλογής μεθόδου φόρτωσης – θεωρητικοί και πραγματικοί συνδυασμοί για k_A=1,2,3 79
Σχ. 5.11: Επίδραση μεταβολής χρόνου κύκλου φορτωτή στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=4 80
Σχ. 5.12: Επίδραση μεταβολής χρόνου κύκλου φορτωτή στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=5 81
Σχ. 5.13: Επίδραση μεταβολής χρόνου κύκλου φορτωτή στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=6 81
Σχ. 5.14: Επίδραση μεταβολής σταθερού χρόνου οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=4 82
Σχ. 5.15: Επίδραση μεταβολής σταθερού χρόνου οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=5 83
Σχ. 5.16: Επίδραση μεταβολής σταθερού χρόνου οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=6 83
Σχ. 5.17: Επίδραση μεταβολής λόγου κόστους φορτωτή-οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=4 84
Σχ. 5.18: Επίδραση μεταβολής λόγου κόστους φορτωτή-οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=5 84
Σχ. 5.19: Επίδραση μεταβολής λόγου κόστους φορτωτή-οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=6 85

Σχ. 6.1: Τυπική μορφή καμπύλης φόρτωσης αποξεστικού οχήματος..... 87
Σχ.6.2: Γραφικός προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αποξεστικού οχήματος 88
Σχ. 6.3: Συνάρτηση ωριαίας παραγωγής αποξεστικού οχήματος με το χρόνο φόρτωσης..... 90
Σχ. 6.4: Η γεωμετρία της Χρυσής Τομής..... 91
Σχ. 6.5: Χωρισμός διαστήματος με βάση τον αλγόριθμο της Χρυσής Τομής..... 91
Σχ. 6.6: Επαναληπτική πορεία αλγορίθμου Χρυσής Τομής..... 92
Σχ. 6.7: Αλγόριθμος προσδιορισμού βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αποξεστικού..... 92
Σχ. 6.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαδρομή κλίσης κατά τη μεταφορά α=0% 94
Σχ. 6.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαδρομή κλίσης κατά τη μεταφορά α=2% 94
Σχ. 6.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαδρομή κλίσης κατά τη μεταφορά α=4% 94
Σχ. 6.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαδρομή κλίσης κατά τη μεταφορά α=6% 94
Σχ. 6.12: Συνάρτηση ωριαίας παραγωγής προωθητή..... 96
Σχ. 6.13: Προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης συνδυασμού προωθητή – αποξεστικών..... 98
Σχ. 6.14: Προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης συνδυασμού προωθητή – αποξεστικών με τον αλγόριθμο της Διχοτόμησης..... 99
Σχ. 6.15: Συγκριτική απεικόνιση συναρτήσεων παραγωγής με το χρόνο φόρτωσης για L=500m και α=2% 100

ΤΙΤΛΟΙ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πιν. 2.1: Ενδεικτικές τιμές ειδικού βάρους και συντελεστή χαλάρωσης εδαφικών υλικών 13
Πιν. 2.2: Ενδεικτικές τιμές συντελεστή πλήρωσης κάδου (%) για διάφορα υλικά..... 13
Πιν. 2.3: Ενδεικτικές τιμές συντελεστή αντίστασης κύλισης (Kp/Mp)..... 14

Πιν. 3.1: Χαρακτηριστικά χωματουργικών οχημάτων βάσης δεδομένων..... 30
Πιν. 3.2: Αποτελέσματα ελέγχου κανονικότητας μεταβλητών κατά Kolmogorov-Smirnov και ελέγχου ισότητας πινάκων συνδιακύμανσης 31
Πιν. 3.3: Συντεταγμένες κεντροειδών στο επίπεδο των D_1, D_2 34
Πιν. 3.4: Αξιολόγηση διαχωριστικής ικανότητας εξισώσεων..... 34
Πιν. 3.5: Αξιολόγηση στατιστικής σημαντικότητας εξισώσεων..... 35
Πιν. 3.6: Επαλήθευση αποτελεσμάτων εξισώσεων κατάταξης με διασταυρωμένη επικύρωση..... 37
Πιν. 3.7: Μέση τιμή πιθανότητας κατάταξης με βάση την απόσταση Mahalanobis σε ορθά και εσφαλμένα κατατασσόμενες παρατηρήσεις..... 37
Πιν. 3.8: Αποτελέσματα διαδικασίας επικύρωσης ακρίβειας Νευρωνικού Δικτύου..... 41

Πιν. 4.1: Δυνατές περιπτώσεις και ενδεχόμενα εκδήλωσης βλαβών σε 4 οχήματα .. 45
Πιν. 4.2: Δεδομένα παραδείγματος 46
Πιν. 4.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων για ακριβή και προσεγγιστική θεώρηση της τιμής της διαθεσιμότητας σε στόλο 4 οχημάτων..... 48
Πιν. 4.4: Κόστος οχημάτων σε κατάσταση λειτουργίας, βλάβης, εφεδρείας..... 49
Πιν. 4.5: Δεδομένα Αριθμητικής Διερεύνησης 51
Πιν. 4.6: Πιθανότητα εμφάνισης x βλαβών σε στόλο 18 οχημάτων με μέση διαθεσιμότητα $\bar{\Delta}$=0,9 51
Πιν. 4.7: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=0..... 52
Πιν. 4.8: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=1..... 52
Πιν. 4.9: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=2..... 53
Πιν. 4.10: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=3..... 54
Πιν. 4.11: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=4..... 55

Πιν. 5.1: Χαρακτηριστικά μεθόδων φόρτωσης 64
Πιν. 5.2: Ωριαία παραγωγή φορτωτή και οχήματος αναλόγως μεθόδου φόρτωσης... 65
Πιν. 5.3: Δεδομένα αριθμητικής διερεύνησης 67

Πιν. 6.1: Δεδομένα παραδείγματος 89
Πιν. 6.2: Δεδομένα αριθμητικής διερεύνησης 93
Πιν. 6.3: Αποτελέσματα συγκριτικής αριθμητικής διερεύνησης υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαφορετικές περιπτώσεις απόστασης μεταφοράς L και κλίσης κατά τη μεταφορά α (%) 95

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διατριβή αφορά στην εφαρμογή της Λειτουργικής Ανάλυσης στις χωματουργικές εργασίες και επικεντρώνεται στη διαχείριση του μηχανικού εξοπλισμού κατά τη μετακίνηση εδαφικού υλικού. Ειδικότερα, στοχεύει στον εντοπισμό και τη διερεύνηση ανεπαρκώς τεκμηριωμένων θεωρήσεων της βιβλιογραφίας και τη συμπλήρωση των υφιστάμενων μεθοδολογιών με νέους αλγορίθμους, ώστε να επιτυγχάνεται οικονομικά βέλτιστη διαχείριση του επιλεγόμενου εξοπλισμού. Η χρησιμότητα της υπόψη έρευνας προκύπτει άμεσα από το γεγονός ότι οι χωματουργικές εργασίες αποτελούν βασικό προκαταρκτικό στάδιο της υλοποίησης των περισσότερων έργων πολιτικού μηχανικού και απορροφούν σημαντικό μέρος του προϋπολογισμού τους, λόγω του σημαντικού κόστους κτήσης και λειτουργίας του σχετικού εξοπλισμού.

Όσον αφορά στη δομή της Διατριβής, προηγείται εισαγωγή στο υπόβαθρο της έρευνας με σύντομη παρουσίαση του χρησιμοποιούμενου μηχανικού εξοπλισμού και των βασικών χαρακτηριστικών του και αναφορά στους βασικούς συντελεστές / έννοιες της ντετερμινιστικής (προσδιοριστικής) Λειτουργικής Ανάλυσης χωματουργικών εργασιών και στην υπολογιστική διαδικασία διαστασιολόγησης του απαιτούμενου στόλου μηχανημάτων.

Ακολούθως, τίθεται το πρόβλημα της εκδήλωσης βλαβών στα οχήματα και επιχειρείται η ανάπτυξη μοντέλου διάγνωσης της λειτουργικής κατάστασης χωματουργικού οχήματος με βάση ευχερώς προσδιοριζόμενα χαρακτηριστικά ηλικίας και χρήσης. Η σχετική έρευνα βασίζεται στην επεξεργασία στοιχείων από 126 χωματουργικά οχήματα με τη στατιστική μέθοδο της Διαχωριστικής Ανάλυσης και με τη χρήση νευρωνικών δικτύων.

Στη συνέχεια, διερευνάται η πρόληψη των συνεπειών των βλαβών με την τοποθέτηση πρόσθετων οχημάτων ως εφεδρικών. Προς αυτή την κατεύθυνση αναπτύσσεται πιθανοτικό μοντέλο πρόβλεψης του αριθμού των βλαβών με βάση τη διαθεσιμότητα του κάθε οχήματος και αναπτύσσεται αλγόριθμος προσδιορισμού του βέλτιστου πλήθους εφεδρικών οχημάτων. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σχετικής αριθμητικής διερεύνησης και σύγκρισης της προτεινόμενης μεθόδου με τους υφιστάμενους εμπειρικούς κανόνες.

Ακολούθως, η έρευνα επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της φόρτωσης του χωματουργικού οχήματος με αντικείμενο διερεύνησης τη σκοπιμότητα εκτέλεσης της μερικής φόρτωσης που απαιτείται για την πλήρωση του οχήματος όταν η χωρητικότητά του δεν αποτελεί ακριβές πολλαπλάσιο της χωρητικότητας του φορτωτικού μέσου. Αναγνωρίζονται οι δύο εναλλακτικές μέθοδοι φόρτωσης και στη συνέχεια καθορίζονται και επιβεβαιώνονται οι παραδοχές σύγκρισης της επίδρασής τους στην τιμή μονάδας της εργασίας. Αναπτύσσονται σχετικοί αλγόριθμοι προσδιορισμού της μεθόδου φόρτωσης για την οποία επιτυγχάνεται η ελάχιστη τιμή μονάδας και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εκτεταμένης αριθμητικής εφαρμογής τους σε εργασίες μεταφοράς διαφορετικών χαρακτηριστικών.

Τέλος, η έρευνα επικεντρώνεται στο αποξεστικό όχημα με σκοπό την ανάπτυξη αλγοριθμικής μεθόδου για τη βελτιστοποίηση του χρόνου φόρτωσής του. Αρχικά διαπιστώνεται η θεωρητική αστοχία της υφιστάμενης γραφικής μεθόδου βελτιστοποίησης και στη συνέχεια παρουσιάζεται η προτεινόμενη μέθοδος. Η μέθοδος βασίζεται στον αλγόριθμο της Χρυσής Τομής για την περίπτωση αυτοδύναμου αποξεστικού οχήματος και συμπληρωματικά στον αλγόριθμο της Διχοτόμησης για την περίπτωση στόλου αποξεστικών οχημάτων σε συνεργασία με προωθητή-ταύρο. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εκτεταμένης συγκριτικής αριθμητικής διερεύνησης υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου.

EXTENDED ABSTRACT

This research concerns the implementation of Operational Analysis in earthmoving, focusing on the optimal management of equipment in earth hauling activities. It particularly aims to complement the existing computational processes with new algorithms that contribute towards the minimization of earthmoving unit cost. The utility of this research directly stems from the fact that earthmoving activities not only constitute a major preliminary phase of most civil engineering projects but also represent a significant part of their total cost, due to the high acquisition and operational expenses that the relevant equipment entails.

As far as the structure of the Thesis is concerned, Chapter 2 is an introduction to the research background, Chapters 3 and 4 are dedicated to the alleviation of equipment failures' consequences and Chapters 5 and 6 concern the optimization of the loading phase of the earthmoving truck and scraper, respectively. More specifically,

Chapter 2 includes a brief presentation of earthmoving machinery (excavators, loaders, trucks, scrapers) and its characteristics, as well as the basic concepts and computational processes of the deterministic Operational Analysis in earthmoving.

Chapter 3 concerns the diagnosis of the earthmoving trucks' operational condition through predictors related to the age, the size and other usage parameters of the vehicle, in line with relevant research in the field of transportation. A data set containing the characteristics of capacity, age, kilometers traveled to date, maintenance class and condition level of 126 earthmoving trucks was collected in cooperation with two large Greek Construction Companies. Discriminant Analysis and Artificial Neural Networks were used for the development of models enabling the assessment of each characteristic's connection with the condition level as well as the diagnosis of the condition level of other trucks. A very high level of predictive efficiency was ascertained for both models.

Chapter 4 concerns the practice of appointing stand–by trucks for immediate treatment of failures and particularly focuses on the determination of the spare trucks' number. The literature survey reveals certain empirical rules (either associated with the basic truck fleet's size or with both its size and availability) which are not accompanied by an economically sound justification. To correct this, an algorithm for the economical evaluation of different stand-by fleets and the determination of the

optimal one was introduced. This required the development of a probabilistic model yielding the expected number of failures at a specific fleet of trucks and the connection of its output to the cost corresponding to the states of operation, failure and reserve. The comparison between the proposed methods' and the existing rules' results demonstrated that the availability of the basic fleet cannot be ignored as well as that the existing availability-based rules tend to underestimate the required number of stand-by trucks.

Chapter 5 concerns the truck and loader combination. In a random combination, most probably the truck's capacity (either gravimetric or volumetric) is not a whole multiple of the loader's bucket volume. As a result, the truck's maximum exploitation requires a partially filled pass, which inevitably prevents the loader from achieving its maximum performance. The cost implications that the above loading and hauling trade-off involves have not been sufficiently investigated. For this purpose, two alternative loading practices (depending on the execution of the partial pass) were considered and the assumptions required for the evaluation of their impact on earthmoving cost were investigated and verified. Based on the above findings, two distinct algorithmic processes were developed. One yielding the percentage unit cost variation that the partial pass' execution entails at a specific hauling activity and another indicating the minimum required volume of the partial pass, so that the additional pass is worth-executing. An extensive numerical investigation was held to demonstrate that despite the dominant opposite notion, the execution of the partial pass may be a worth considering option, depending on the percentage volume of the partial pass and the hauling distance.

Chapter 6 concerns the development of a new algorithmic method for scraper's loading time optimization given that the existing graphical method is founded on the invalid assumption that the hauling time is independent of the load time. The proposed method uses the Golden Section Search to detect the maximum of the function between the scraper's hourly production and the load time. The computational process was also expanded to address the case that the scraper is assisted by a pusher. This required the combined implementation of the Golden Section Search and the Bisection Algorithm. The comparison of the results deriving from the proposed and the existing method demonstrated that the latter entails the systematic needless prolongation of the loading stage, thus resulting in reduced hourly production and increased cost.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το πλαίσιο της Έρευνας

Οι χωματουργικές εργασίες αποτελούν δραστηριότητα πρωταρχικής σημασίας στα περισσότερα έργα Πολιτικού Μηχανικού, καθώς επιτυγχάνουν την προσαρμογή του εδαφικού αναγλύφου στις ανάγκες των κατασκευών και συχνά αντιστοιχούν σε σημαντικό μέρος του φυσικού αντικειμένου του έργου (π.χ. κατασκευή επιχωμάτων, χωμάτινων φραγμάτων, αρδευτικών δικτύων). Επιπλέον, με δεδομένο τον πολύ αυξημένο βαθμό εκμηχάνισής τους και το υψηλό κόστος κτήσης και λειτουργίας του σχετικού μηχανικού εξοπλισμού, οι χωματουργικές εργασίες αποτελούν βασικό παράγοντα διαμόρφωσης του τεχνικού και οικονομικού προγραμματισμού αλλά και του οικονομικού αποτελέσματος. Συνεπώς, το στάδιο των χωματουργικών εργασιών κρίνει σε μεγάλο βαθμό, συνήθως, την επίτευξη των βασικών στόχων του κόστους και της διάρκειας των έργων.

Παράλληλα, διαμορφώνεται σήμερα στον τεχνικό κλάδο ένα εξαιρετικά απαιτητικό περιβάλλον, αφενός, από το μέγεθος, την πολυπλοκότητα και τις σημαντικές τεχνικές δυσκολίες των σύγχρονων έργων και, αφετέρου, από τον σκληρό ανταγωνισμό και τη στενότητα των διαθέσιμων πόρων. Πλέον, η επιλογή των προσφορότερων μηχανικών μέσων για την επιτυχή, αποδοτική και αποτελεσματική υλοποίηση των κατασκευών καθώς και η βέλτιστη από τεχνικής και οικονομικής πλευράς διαχείριση και εκμετάλλευσή τους αποτελούν όρους επιβίωσης. Ειδικότερα στον ελληνικό χώρο, η κατασκευή μεγάλων έργων υποδομής κατά την τελευταία δεκαπενταετία έχει αναμφισβήτητα αναδείξει την ανανέωση και αναβάθμιση του μηχανικού εξοπλισμού σε κεντρική προτεραιότητα των τεχνικών εταιρειών.

Σε αυτό το πλαίσιο, η επιλογή του τύπου, του μεγέθους, των χαρακτηριστικών και του αριθμού των μηχανημάτων για την εκτέλεση των χωματουργικών εργασιών απαιτεί την αξιολόγηση των διαθέσιμων επιλογών υπό το πρίσμα της Λειτουργικής Ανάλυσης, δηλαδή της επιστημονικής μεθόδου που στοχεύει στον προσδιορισμό των συντελεστών παραγωγής για τους οποίους επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του κόστους μονάδας παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι ποιοτικοί και χρονικοί περιορισμοί του έργου.

Η εφαρμογή της Λειτουργικής Ανάλυσης στις χωματουργικές εργασίες οδηγεί στον καθορισμό της σύνθεσης της ομάδας εργασίας, στον υπολογισμό της ωριαίας

παραγωγής της και τελικά στην εκτίμηση του κόστους μονάδας της εργασίας. Ο βασικός αλγόριθμος υπολογισμού που απαντάται στα κλασικά βιβλία διδασκαλίας και στα εγχειρίδια των κατασκευαστών μηχανημάτων (π.χ. Peurifoy et al. 2006, Nunnally 2007, Caterpillar Performance Handbook 2010) είναι ντετερμινιστικού (προσδιοριστικού) χαρακτήρα, δηλαδή βασίζεται στην παραδοχή ότι όλα τα θεωρούμενα μεγέθη λαμβάνουν συγκεκριμένη και σταθερή τιμή. Στη βιβλιογραφία απαντώνται και μη προσδιοριστικές προσεγγίσεις οι οποίες βασίζονται κυρίως στη διαδικασία της προσομοίωσης, σε εργαλεία τεχνητής νοημοσύνης ή στατιστικές μεθόδους. Ενδεικτική σύγκριση των παραπάνω γίνεται από τους Chanda and Gardiner (2010). Η αποτελεσματική εφαρμογή των μη προσδιοριστικών προσεγγίσεων προϋποθέτει επάρκεια κατάλληλων στοιχείων, απαίτηση η οποία δεν ικανοποιείται εύκολα στις εργασίες μετακίνησης στα συνήθη έργα Πολιτικού Μηχανικού, δεδομένης της μεταβλητότητας των χαρακτηριστικών τους.

Με βάση τα παραπάνω, η παρούσα έρευνα υιοθετεί το ντετερμινιστικό υπολογιστικό πλαίσιο της Λειτουργικής Ανάλυσης στη μετακίνηση εδαφικού υλικού, εντοπίζει ελλείψεις που παρουσιάζει η εφαρμογή της και επιχειρεί τη διατύπωση νέων αλγορίθμων, όπως αναλυτικά παρουσιάζεται στις ενότητες που ακολουθούν, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους μονάδας της εργασίας.

1.2 Περιεχόμενο και στόχος της έρευνας

Το ερευνητικό έργο στο αντικείμενο της Λειτουργικής Ανάλυσης των χωματουργικών εργασιών είναι εκτεταμένο. Η συντριπτική πλειονότητα των ερευνών και δημοσιεύσεων αφορά στη μετακίνηση εδαφικού υλικού, δηλαδή στη διαδικασία φόρτωσης, μεταφοράς και απόθεσης προϊόντων εκσκαφής στις τελικές τους θέσεις ή σε χώρους συσσώρευσης. Η μετακίνηση συνηθέστερα εκτελείται από συνδυασμό μονάδας φόρτωσης (φορτωτή ή εκσκαφέα) και μονάδων μεταφοράς (χωματουργικά οχήματα) ή δευτερευόντως, και εφόσον οι συνθήκες το επιτρέπουν, από αποξεστικό όχημα, υποβοηθούμενο ή μη από προωθητή-ταύρο.

Το ενδιαφέρον της βιβλιογραφίας στρέφεται κατά κύριο λόγο στην επιλογή και τη διαχείριση του μηχανικού εξοπλισμού λόγω της άμεσης και σημαντικής επίδρασής του στο κόστος και στη διάρκεια της εργασίας. Ωστόσο, από τη σχετική ανασκόπηση, ανιχνεύονται πεδία στα οποία είναι αναγκαία η διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας.

Συγκεκριμένα, το φαινόμενο των βλαβών στα χωματουργικά μηχανήματα και οχήματα μεταφοράς εδαφικού υλικού αναγνωρίζεται ως μία από τις κυριότερες αιτίες

διατάραξης της προόδου της εργασίας με σημαντικές συνέπειες σε χρόνο και κόστος. Για την αντιμετώπιση των συνεπειών αυτών και την αποτελεσματική διαχείριση της λειτουργίας και της συντήρησης των μηχανημάτων είναι απαραίτητη η δυνατότητα διάγνωσης της λειτουργικής τους κατάστασης. Προς αυτήν την κατεύθυνση, αρκετοί ερευνητές προτείνουν την παρακολούθηση και αξιολόγηση συγκεκριμένων φυσικοχημικών δεικτών σχετικών με δονήσεις, ήχους, σύσταση λιπαντικών ελαίων ή καυσαερίων και θερμοκρασία εξαρτημάτων (π.χ. Hayashi et al. 2002, Carnero 2005, Makis et al. 2006, Tian 2012). Είναι ωστόσο γεγονός, ότι οι απαιτούμενες συστηματικές μετρήσεις των παραπάνω προϋποθέτουν εξοπλισμό και μεθόδους διαχείρισης που δεν απαντώνται στη συντριπτική πλειονότητα των ελληνικών κατασκευαστικών φορέων. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμη η ανάπτυξη μοντέλου διάγνωσης της λειτουργικής κατάστασης των οχημάτων μεταφοράς εδαφικού υλικού μέσω απλών και ευχερώς προσδιοριζόμενων χαρακτηριστικών ηλικίας και χρήσης, σε αντιστοιχία με έρευνες που έχουν γίνει στον τομέα των Μέσων Μαζικής Μεταφοράς (π.χ. Chang and Collura 1998, Karlaftis 1997).

Επιπλέον, από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση διαπιστώνεται ότι για την πρόληψη των συνεπειών των βλαβών, κυρίως στην περίπτωση των χωματουργικών οχημάτων, συνιστάται η τοποθέτηση εφεδρικών μέσων. Ωστόσο, η διαδιακασία διαστασιολόγησης του εφεδρικού στόλου βασίζεται σε εμπειρικούς κανόνες χωρίς επαρκή οικονομική τεκμηρίωση. Για παράδειγμα, έχει προταθεί ο αριθμός των εφεδρικών να καθορίζεται αποκλειστικά από το μέγεθος του βασικού στόλου και συγκεκριμένα να αποτελεί ποσοστό του (π.χ. Nunnally 2007). Σε άλλες προσεγγίσεις, ο αριθμός των εφεδρικών προκύπτει όχι μόνο βάσει του πλήθους των οχημάτων του βασικού στόλου αλλά και της εκτιμώμενης διαθεσιμότητάς τους (π.χ. SME Mining Engineering Handbook 1992). Οι προτάσεις αυτές είναι σαφώς πιο εύλογες αλλά δε συνοδεύονται από την απαραίτητη οικονομική τεκμηρίωση. Σε αυτό το πλαίσιο, αναγνωρίζεται η ανάγκη διατύπωσης μεθόδου προσδιορισμού του πλήθους των εφεδρικών οχημάτων κατόπιν συνδυαστικής αξιολόγησης των αριθμητικών, τεχνικών και οικονομικών χαρακτηριστικών του βασικού στόλου.

Ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης εντοπίζεται επίσης στη διαδικασία της φόρτωσης χωματουργικού και αποξεστικού οχήματος. Όσον αφορά στο χωματουργικό όχημα, όταν η χωρητικότητά του δεν αποτελεί ακριβές πολλαπλάσιο της χωρητικότητας του φορτωτικού μέσου, δηλαδή στη συντριπτική πλειονότητα των περιπτώσεων, η πλήρωση της σκάφης απαιτεί την εκτέλεση μίας μη πλήρους φόρτωσης. Η εκτέλεση της φόρτωσης αυτής συχνά χαρακτηρίζεται ως αντιοικονομική (π.χ. Gransberg 2006,

Peurifoy et al. 2006), χωρίς η θέση αυτή να συνοδεύεται από την απαιτούμενη τεκμηρίωση. Συνεπώς, κρίνεται σκόπιμη η συστηματική διερεύνηση της επίδρασης της μη πλήρους φόρτωσης στο κόστος της εργασίας και η διατύπωση εμπεριστατωμένης θέσης σχετικά με τη σκοπιμότητα εκτέλεσής της.

Για την περίπτωση του αποξεστικού οχήματος και με δεδομένο ότι η φόρτωσή του εξελίσσεται μη γραμμικά, στη βιβλιογραφία διερευνάται το ενδεχόμενο διακοπής της φόρτωσης προ της πλήρωσης της σκάφης. Ωστόσο, η ευρέως προτεινόμενη γραφική μέθοδος προσδιορισμού του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης βελτιστοποίησης (π.χ. Nunnally 2007) αγνοεί την εξάρτηση του χρόνου μεταφοράς από το χρόνο φόρτωσης. Με βάση τη διαπίστωση αυτή προκύπτει η ανάγκη διατύπωσης θεωρητικά άρτιας μεθόδου με σκοπό τον ακριβή προσδιορισμό του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης του αποξεστικού οχήματος, με ή χωρίς προωθητή-ταύρο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η παρούσα διατριβή ανταποκρίνεται στην ανάγκη ανάπτυξης περαιτέρω έρευνας και διερεύνησης ανεπαρκώς τεκμηριωμένων θεωρήσεων της βιβλιογραφίας στο πεδίο της διαχείρισης του μηχανικού εξοπλισμού στις εργασίες μετακίνησης εδαφικού υλικού και στοχεύει στη συμπλήρωση του υφιστάμενου ντετερμινιστικού αλγορίθμου της Λειτουργικής Ανάλυσης στη μετακίνηση εδαφικού υλικού, με νέους αλγορίθμους, ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του κόστους εκτέλεσης των εργασιών.

1.3 Δομή της Διατριβής

Στο *Κεφάλαιο 1* (Εισαγωγή) προσδιορίζεται το αντικείμενο και ο σκοπός της έρευνας και η δομή της διατριβής.

Στο *Κεφάλαιο 2* παρουσιάζεται συνοπτικά το υφιστάμενο πλαίσιο εφαρμογής της Λειτουργικής Ανάλυσης στη μετακίνηση εδαφικού υλικού. Γίνεται συνοπτική αναφορά στον χρησιμοποιούμενο μηχανικό εξοπλισμό (εκσκαφείς, φορτωτές, χωματουργικά και αποξεστικά οχήματα, προωθητές-ταύροι), στους συντελεστές εκτίμησης των συνθηκών και των χαρακτηριστικών της εργασίας και στις βασικές σχέσεις και έννοιες της προσδιοριστικής Λειτουργικής Ανάλυσης στη μετακίνηση εδαφικού υλικού.

Το *Κεφάλαιο 3* αφορά στη διάγνωση της λειτουργικής κατάστασης των χωματουργικών οχημάτων. Ανασκοπούνται οι συνηθέστερα χρησιμοποιούμενες μέθοδοι διάγνωσης της κατάστασης του μηχανικού εξοπλισμού και διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στις βασιζόμενες σε φυσικοχημικές μετρήσεις (καταγραφή

δονήσεων, ανάλυση λιπαντικών ελαίων, καυσαερίων κλπ) και στις βασιζόμενες σε άλλα χαρακτηριστικά (π.χ. ηλικία, επίπεδο συντήρησης). Με κριτήριο την ευχέρεια εύρεσης των απαραίτητων στοιχείων, επιλέγεται η ανάπτυξη μοντέλου διάγνωσης της λειτουργικής κατάστασης των χωματουργικών οχημάτων με βάση στοιχεία της δεύτερης κατηγορίας. Σε αυτήν την κατεύθυνση, διακρίνονται συγκεκριμένα επίπεδα κατάστασης με βάση τη διαθεσιμότητα και επιχειρείται η σύνδεσή τους με χαρακτηριστικά ηλικίας, χωρητικότητας, διανυθέντων χιλιομέτρων και επιπέδου συντήρησης. Για το σκοπό αυτό δημιουργείται βάση δεδομένων με αντίστοιχα στοιχεία χωματουργικών οχημάτων από μεγάλους κατασκευαστικούς φορείς και εφαρμόζονται οι ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι της Διαχωριστικής Ανάλυσης και των Νευρωνικών Δικτύων. Προηγείται παρουσίαση των στοιχείων της βάσης δεδομένων και των μεθόδων επεξεργασίας τους και ακολουθεί ανάλυση των αποτελεσμάτων και αξιολόγηση της ακρίβειας διάγνωσης που επιτυγχάνεται.

Το *Κεφάλαιο 4* αφορά στην αντιμετώπιση των συνεπειών των βλαβών στα χωματουργικά οχήματα με την τοποθέτηση πρόσθετων οχημάτων ως εφεδρικών. Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι η πρόβλεψη εφεδρικών μονάδων αποτελεί κοινή πρακτική, ωστόσο διαπιστώνεται η απουσία επαρκώς τεκμηριωμένης μεθόδου προσδιορισμού του πλήθους τους. Σε αυτή την κατεύθυνση αναπτύσσεται πιθανοτικό μοντέλο πρόβλεψης της εκδήλωσης βλαβών σε στόλο δεδομένου μεγέθους και διαθεσιμότητας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται αλγοριθμική διαδικασία προσδιορισμού του βέλτιστου αριθμού εφεδρικών με βάση το κόστος των οχημάτων σε κατάσταση εφεδρείας, βλάβης και λειτουργίας. Ακολουθεί αναλυτική αριθμητική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου, ανάλυση ευαισθησίας του βέλτιστου αριθμού εφεδρικών ως προς τις βασικές παραμέτρους του προβλήματος και συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου και των υφιστάμενων προτάσεων της βιβλιογραφίας.

Στο *Κεφάλαιο 5* επιχειρείται η βελτιστοποίηση της φόρτωσης οχήματος από φορτωτή. Συγκεριμένα διερευνάται η σκοπιμότητα εκτέλεσης της μερικής φόρτωσης που απαιτείται για την πλήρωση του οχήματος όταν η μεταφορική του ικανότητα δεν αποτελεί ακριβές πολλαπλάσιο της χωρητικότητας του κάδου του φορτωτή. Προηγείται η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας και εντοπίζεται έλλειψη τεκμηριωμένης τοποθέτησης επί του θέματος. Ακολούθως, ορίζονται δύο εναλλακτικές μέθοδοι φόρτωσης (αναλόγως της εκτέλεσης της μερικής φόρτωσης) και εξετάζονται οι απαιτούμενες παραδοχές για τη συγκριτική εκτίμηση της επίδρασής τους στο κόστος της εργασίας. Με βάση την παραπάνω διερεύνηση διατυπώνεται αλγόριθμος

προσδιορισμού της μεταβολής του κόστους λόγω αλλαγής της μεθόδου φόρτωσης για συγκεκριμένη απόσταση μεταφοράς. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία επιβεβαίωσης των παραδοχών της σύγκρισης και ακολουθεί εκτεταμένη αριθμητική διερεύνηση και ανάλυση ευαισθησίας. Τέλος, αναπτύσσεται παραλλαγή του αλγορίθμου για προσδιορισμό του ελάχιστου όγκου για τον οποίο δικαιολογείται οικονομικά η εκτέλεση της μερικής φόρτωσης σε κάθε απόσταση μεταφοράς.

Στο *Κεφάλαιο 6* επιχειρείται η βελτιστοποίηση του χρόνου φόρτωσης του αποξεστικού οχήματος. Αρχικά αναγνωρίζεται η μη γραμμικότητα της σχέσης όγκου – χρόνου κατά τη φόρτωση και ακολουθεί κριτική ανασκόπηση της γραφικής μεθόδου βελτιστοποίησης της βιβλιογραφίας και διαπίστωση της θεωρητικής της αστοχίας. Στη συνέχεια αναπτύσσεται αλγόριθμος προσδιορισμού του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης τόσο στην περίπτωση αυτοδύναμου αποξεστικού οχήματος όσο και στην περίπτωση στόλου αποξεστικών οχημάτων σε συνεργασία με προωθητή-ταύρο. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος περιλαμβάνει τους γνωστούς αλγορίθμους της Χρυσής Τομής και της Διχοτόμησης. Ακολουθεί εκτεταμένη αριθμητική διερεύνηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης αλγοριθμικής μεθόδου με τα αντίστοιχα της γραφικής μεθόδου. Τέλος, διαπιστώνεται η σκοπιμότητα χρήσης της προτεινόμενης μεθόδου για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του χρόνου φόρτωσης και του αριθμού των αποξεστικών.

Στο *Κεφάλαιο 7* συνοψίζονται τα συμπεράσματα της διατριβής και η συμβολή της υπόψη έρευνας στην κατεύθυνση της βελτιστοποίησης της εφαρμογής της Λειτουργικής Ανάλυσης στις εργασίες μετακίνησης εδαφικού υλικού και διατυπώνονται προτάσεις μελλοντικής έρευνας.

2. ΥΠΟΒΑΘΡΟ ΤΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Στο παρόν κεφάλαιο προσδιορίζεται το ερευνητικό πλαίσιο της παρούσας διατριβής και παρουσιάζεται συνοπτικά το σχετικό υπολογιστικό υπόβαθρο στη Λειτουργική Ανάλυση εργασιών μετακίνησης εδαφικού υλικού.

2.1 Εργασία μετακίνησης εδαφικού υλικού

Ως εργασία μετακίνησης εδαφικού υλικού νοείται η διαδικασία φόρτωσης, μεταφοράς και απόθεσης προϊόντων εκσκαφής στις τελικές τους θέσεις ή σε χώρους συσσώρευσης, η οποία εκτελείται με κατάλληλα μηχανικά μέσα ως συνεχής ή ασυνεχής διαδικασία. Η συνεχής εκτέλεση της μεταφοράς προϋποθέτει την ύπαρξη μεταφορικού ιμάντα για διαρκή απόρριψη του υλικού προς τις μονάδες φόρτωσης και χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις εξόρυξης αδρανών και μεταλλευμάτων (λατομεία, ορυχεία) καθώς δεν ενδείκνυται για τις μεταβαλλόμενες ανάγκες ενός χωματουργικού έργου. Στα χωματουργικά έργα η μεταφορά είναι ασυνεχής και πραγματοποιείται συνηθέστερα με συνδυασμό μονάδας φόρτωσης (φορτωτή ή εκσκαφέα) και χωματουργικών οχημάτων. Δευτερευόντως, και εφόσον οι συνθήκες το επιτρέπουν, είναι δυνατή η εκτέλεση της εργασίας με αποξεστικό όχημα, υποβοηθούμενο ή μη από προωθητή. Βασικά πλεονεκτήματα της ασυνεχούς μεταφοράς είναι η ελευθερία επιλογής των θέσεων φόρτωσης και εκκένωσης, η δυνατότητα μεταφοράς υλικού οποιασδήποτε κοκκομετρίας, η εύκολη προσαρμογή σε μεγάλο εύρος τιμών απαιτούμενης παραγωγής και το συγκριτικά πολύ μικρότερο κόστος αρχικής επένδυσης.

2.2 Βασικός μηχανικός εξοπλισμός

Η επινόηση των μηχανών αδιαμφισβήτητα αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα άλματα που πραγματοποίησε η τεχνική σκέψη στην ιστορική της εξέλιξη. Τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες του σύγχρονου μηχανικού εξοπλισμού βελτιώνονται διαρκώς, ακολουθώντας την αδιάκοπη πρόοδο της τεχνολογίας.

Στη συνέχεια καταγράφονται επιγραμματικά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας και παραγωγής των μηχανικών μέσων ενδιαφέροντος της παρούσας έρευνας. Για αναλυτικά στοιχεία και λεπτομέρειες για όλες τις χρήσεις και την οργάνωση του εξοπλισμού στις χωματουργικές εργασίες προτείνονται τα συγγράματα των Peurifoy et al. (2006), Nunnally (2007) και Gransberg et al. (2006).

2.2.1 Ελαστικοφόρος Φορτωτής

Ο ελαστικοφόρος φορτωτής (Σχ. 2.1) χρησιμοποιείται για τη φόρτωση καλά κερματισμένου / ελευθέρως ρέοντος υλικού σε χωματουργικά οχήματα. Φέρει εμπρόσθιο κάδο συνήθους χωρητικότητας από 0,5 έως 3m^3, με πλάτος ίσο με το πλάτος του μηχανήματος και χαρακτηριστικά (σχήμα, διαμόρφωση άκρου) που ποικίλουν ανάλογα με τις συνθήκες της εργασίας.

Σχ. 2.1: Ελαστικοφόρος φορτωτής

Ο φορτωτής κινείται ευκολότερα σε ξηρά, επίπεδα, καλά συντηρημένα δάπεδα και χρειάζεται χώρο για την εκτέλεση ελιγμών. Δεδομένου ότι μετακινείται με ανυψωμένο έμφορτο κάδο, η διατήρηση της ευστάθειας του μηχανήματος απαιτεί το φορτίο να μην υπερβαίνει το 50% του στατικού φορτίου ανατροπής.

Ο τυπικός κύκλος εργασίας του φορτωτή περιλαμβάνει την πλήρωση και ανύψωση του κάδου, την εκτέλεση ελιγμών για προσέγγιση του οχήματος, την απόθεση του υλικού στη σκάφη του οχήματος, την εκτέλεση ελιγμών για επαναφορά στη θέση φόρτωσης και την καταβίβαση του κάδου. Η διάρκεια του κύκλου κυμαίνεται ενδεικτικά από 0,35 έως 0,65 min αναλόγως της σκληρότητας του υλικού (Nunnally, 2007).

2.2.2 Εκσκαφέας

Ο εκσκαφέας χρησιμοποιείται για την εκσκαφή και εν συνεχεία φόρτωση σκληρών και βραχωδών εδαφών σε χωματουργικά οχήματα. Οι δύο βασικοί τύποι είναι ο εκσκαφέας με μετωπικό κάδο φόρτωσης (shovel, Σχ. 2.2), κατάλληλος για εκσκαφές σε στάθμη υψηλότερη από τη στάθμη έδρασης του μηχανήματος, και ο εκσκαφέας με ανεστραμμένο κάδο φόρτωσης (hoe/ τσάπα, Σχ. 2.3), κατάλληλος για εκσκαφές σε στάθμη χαμηλότερη από τη στάθμη έδρασης του μηχανήματος. Η χωρητικότητα του κάδου και κατ’ επέκταση το μέγεθος του μηχανήματος, κυμαίνεται σε πολύ μεγάλο εύρος (ενδεικτικά από 0,2 έως 28 m^3 , Caterpillar Performance Handbook, 2010).

Σχ. 2.2: Εκσκαφέας με μετωπικό κάδο φόρτωσης

Σχ. 2.3: Εκσκαφέας με ανεστραμμένο κάδο φόρτωσης

Ο χρόνος κύκλου του εκσκαφέα (εκσκαφή, περιστροφή, απόθεση υλικού, επαναφορά) κυμαίνεται ενδεικτικά από 0,2 έως 0,6 min αναλόγως των συνθηκών (πιθανά εμπόδια, σκληρότητα υλικού, ικανότητα χειριστή, γωνία περιστροφής, βάθος εκσκαφής) και του βάρους του μηχανήματος. Έχουν γίνει αρκετές σχετικές έρευνες για την αποτίμηση της επίδρασης των παραγόντων αυτών στο χρόνο κύκλου του εκσκαφέα όπως αυτές των Edwards et al. (2002a) και Edwards and Holt (2007).

2.2.3 Χωματουργικό όχημα

Τα χωματουργικά οχήματα οπίσθιας ανατροπής (Σχ. 2.4) αποτελούν το πλέον σύνηθες μέσο για τη μεταφορά και απόθεση υλικών καθώς μπορούν να κινηθούν με ικανοποιητική ταχύτητα σε ανώμαλες και τραχείες επιφάνειες. Η συνήθης χωρητικότητά τους κυμαίνεται μεταξύ 10 και 16m^3 ενώ το μέγιστο φορτίο που μπορούν να φέρουν είναι συνάρτηση του αριθμού των αξόνων. Εφόσον τα οχήματα κυκλοφορούν σε δημόσιους δρόμους, το μέγιστο επιτρεπόμενο μικτό βάρος τους περιορίζεται από την υφιστάμενη νομοθεσία στους 33tn.

Σχ. 2.4: Χωματουργικό όχημα οπίσθιας ανατροπής

Ειδική κατηγορία οχημάτων αποτελούν τα αρθρωτά χωματουργικά οχήματα με μικτό βάρος που υπερβαίνει κατά πολύ το παραπάνω όριο, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ενδοεργοταξιακές διαδρομές μεγάλων έργων ή σε ορυχεία (off-road dumpers, Σχ. 2.5).

Σχ. 2.5: Αρθρωτό χωματουργικό όχημα

Η επιλογή του μεγέθους του οχήματος υπόκειται σε περιορισμό συμβατότητας με το μέγεθος του φορτωτικού μέσου, με κριτήριο τον απαιτούμενο αριθμό κύκλων φόρτωσης για πλήρη φόρτωση του οχήματος. Συγκεκριμένα, οι κύκλοι φόρτωσης δεν πρέπει να είναι υπερβολικά πολλοί προκειμένου τα οχήματα να είναι σε σύντομο χρόνο διαθέσιμα για την εκτέλεση της κύριας αποστολής τους, δηλαδή της μεταφοράς. Ωστόσο, η απαίτηση πολύ λίγων κύκλων φόρτωσης, π.χ. ενός ή δύο, είναι εξίσου μη επιθυμητή, καθώς υποδηλώνει ότι ο φορτωτής/εκσκαφέας και το όχημα έχουν παραπλήσια χωρητικότητα και άρα απαιτούνται ιδιαίτεροι χειρισμοί για την ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου και την αποφυγή δυναμικών φορτίσεων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι γενικά αποδεκτές τιμές που απαντώνται στη βιβλιογραφία για τον αριθμό των φορτώσεων, κυμαίνονται μεταξύ 4 και 7.

2.2.4 Αποξεστικό όχημα

Τα αποξεστικά οχήματα διακρίνονται από τα υπόλοιπα μηχανήματα λόγω της ικανότητας τους να εκτελούν συνδυαστικά την εκσκαφή, τη φόρτωση και τη μεταφορά του υλικού σε μικρές και μέσες αποστάσεις. Διακρίνονται σε αποξεστικά με μηχανισμό αυτοφόρτωσης (Σχ. 2.6), τα οποία φέρουν ενσωματωμένο μηχανισμό ανύψωσης του υλικού και φορτώνουν χωρίς τη βοήθεια προωθητή, και συμβατικά, τα οποία δε φέρουν μηχανισμό ανύψωσης και λειτουργούν αυτόνομα ή σε συνδυασμό με προωθητή κατά τη φάση της φόρτωσης (Σχ. 2.7).

Σχ. 2.6: Αποξεστικό όχημα με μηχανισμό αυτοφόρτωσης

Στα συμβατικά αποξεστικά οχήματα, η εκσκαφή-φόρτωση επιτυγχάνεται με σταδιακή απόξεση της επιφάνειας κίνησης από τον κοπτήρα που υπάρχει στον πυθμένα της σκάφης (χωρητικότητας 15-30 m^3). Μετά το πέρας της φόρτωσης, η σκάφη κλείνει και ανυψώνεται και το όχημα συνεχίζει την πορεία του προς τη θέση απόθεσης. Η εκκένωση της σκάφης πραγματοποιείται σταδιακά με παράλληλη κίνηση του οχήματος, οπότε επιτυγχάνεται ταυτόχρονα η ομοιόμορφη διάστρωση του υλικού. Ο κύκλος ολοκληρώνεται με την επιστροφή του οχήματος στη θέση φόρτωσης.

Σχ. 2.7: Συνδυασμός συμβατικού αποξεστικού οχήματος με προωθητή-ταύρο

2.3 Λειτουργική Ανάλυση εργασιών μετακίνησης εδαφικού υλικού

Λειτουργική Ανάλυση καλείται η ευρείας πρακτικής εφαρμογής επιστημονική μέθοδος η οποία στοχεύει στον προσδιορισμό της σύνθεσης των συντελεστών παραγωγής ενός έργου ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος μονάδας παραγωγής και παράλληλα να ικανοποιούνται οι ποιοτικοί και χρονικοί περιορισμοί που έχουν τεθεί.

Η εφαρμογή της Λειτουργικής Ανάλυσης στις εργασίες μετακίνησης εδαφικού υλικού προϋποθέτει την εκτίμηση των χαρακτηριστικών και συνθηκών της εργασίας μέσω συγκεκριμένων συντελεστών. Ως εκ τούτου, η αποτελεσματικότητά της είναι άμεσα συνδεδεμένη με την αξιοποίηση εμπειρίας από παλαιότερα έργα και κατ' επέκταση με την ύπαρξη υψηλού επιπέδου οργάνωσης για τήρηση αξιόπιστων ιστορικών στοιχείων. Ενδεχόμενη αδυναμία στον τομέα αυτό μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική διάσταση μεταξύ των υπολογισθέντων μεγεθών και των αντίστοιχων παρατηρούμενων στην πράξη και άρα σε αναπόφευκτη αστοχία της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

2.3.1 Εκτίμηση χαρακτηριστικών και συνθηκών εργασίας

Στο πλαίσιο της Λειτουργικής Ανάλυσης χωματουργικών εργασιών, τα χαρακτηριστικά κάθε εργασίας και οι συνθήκες υπό τις οποίες εκτελείται, περιγράφονται μέσω πληθώρας συντελεστών, οι κυριώτεροι των οποίων παρουσιάζονται ακολούθως.

Συντελεστής χαλάρωσης

Συντελεστής χαλάρωσης ε, ονομάζεται ο λόγος του όγκου του υλικού μετά την εκσκαφή προς τον όγκο που καταλαμβάνει η ίδια ποσότητα υλικού στη φυσική της θέση. Ο συντελεστής χαλάρωσης λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας καθώς κατά την εκσκαφή σημειώνεται χαλάρωση του υλικού και άρα αύξηση του όγκου του. Η χαλάρωση αυτή οδηγεί σε διαφοροποίηση του βάρους της μονάδας του όγκου δηλαδή του ειδικού βάρους του υλικού, γ. Ενδεικτικές τιμές των γ,ε για διάφορα υλικά παρουσιάζονται στον Πιν. 2.1 (Caterpillar Performance Handbook, 2010).

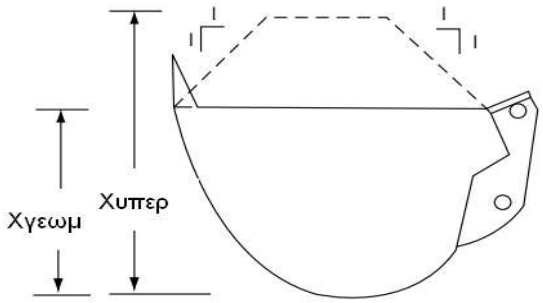
Συντελεστής πλήρωσης

Ο συντελεστής πλήρωσης φ, εκφράζει την αναμενόμενη πλήρωση του κάδου του φορτωτικού μέσου ως ποσοστό (%) της γεωμετρικής χωρητικότητας του. Εξαρτάται από τη γεωμετρία του κάδου και την κοκκομετρία του υλικού και μπορεί να υπερβαίνει το 100%. Ο υπερβάλλων όγκος αντιστοιχεί στο υλικό που συγκρατείται πάνω από το επίπεδο των χειλέων του κάδου (χωρητικότητα υπερπλήρωσης, Σχ.

2.8). Ενδεικτικές τιμές περιλαμβάνονται στον Πιν. 2.2 (Caterpillar Performance Handbook, 2010). Αντίστοιχα στα οχήματα μεταφοράς εφαρμόζεται ο συντελεστής πλήρωσης σκάφης.

Πιν. 2.1: Ενδεικτικές τιμές ειδικού βάρους και συντελεστή χαλάρωσης εδαφικών υλικών

Υλικό	Ειδικό βάρος γ (συμπ) (tn/m^3)	Συντ. χαλάρωσης ε	Ειδικό βάρος γ (χαλαρό) (tn/m^3)
Άργιλος ξηρή	1,80	1,25	1,44
Άργιλος υγρή	2,05		1,64
Σκύρα ξηρά	1,70	1,12	1,42
Σκύρα υγρά	2,10		1,87
Ασβεστόλιθος	2,50	1,6	1,56
Άμμος ξηρή	1,60	1,12	1,43
Άμμος υγρή	2,05		1,83
Αργιλική άμμος ξηρή	1,70	1,25	1,36
Αργιλική άμμος υγρή	2,00		1,60
Αμμοχάλικο ξηρό	1,90	1,12	1,70
Αμμοχάλικο υγρό	2,10		1,88
Ψαμμίτης	2,40	1,65	1,60
Σχιστόλιθος	2,65	1,60	1,66
Χώμα	1,35	1,40	0,96



Σχ. 2.8: Γεωμετρική χωρητικότητα και χωρητικότητα υπερπλήρωσης κάδου

Πιν. 2.2: Ενδεικτικές τιμές συντελεστή πλήρωσης κάδου (%) για διάφορα υλικά

Υλικό	Κάδος Φορτωτή	Κάδος Εκσκαφέα
Άργιλος	70-90	80-100
Αργιλική άμμος	80-100	100-120
Αμμοχάλικο ξηρό	85-95	85-95
Αμμοχάλικο υγρό	90-110	90-110
Μέτρια θρυμματισμένος βράχος	60-90	50-70
Καλά θρυμματισμένος βράχος	90-110	75-90
Βραχώδη εδάφη	100-130	90-120
Μικτά εδάφη, υγρά	100-120	110-130

Συντελεστής αντίστασης κύλισης

Ο συντελεστής αντίστασης κύλισης w_r (kp/Mp) εκφράζει την ανά μονάδα βάρους οχήματος αναπτυσσόμενη δύναμη τριβής κατά την κίνηση του οχήματος. Η τιμή του συντελεστή διαμορφώνεται ανάλογα με την επιφάνεια κύλισης, σύμφωνα με τον Πιν. 2.3. ή εναλλακτικά υπολογίζεται από την εξ. 2.1 συναρτήσει της παρατηρούμενης βύθισης των ελαστικών δ (cm) (Caterpillar Performance Handbook, 2010).

$$w_r = 20 + 6*\delta \quad (2.1)$$

Πιν. 2.3: Ενδεικτικές τιμές συντελεστή αντίστασης κύλισης (Kp/Mp)

Ποιότητα επιφάνειας κύλισης	Ελαστικά	Ερπύστριες
Πολύ σκληρή, ομαλή επιφάνεια, Σκυρόδεμα στεγνό, άσφαλτος	12-15	---
Σκληρή, σταθερή, ομαλή επιφάνεια, βύθιση τροχών 0mm	17-20	---
Σταθερή, ομαλή, τακτικά συντηρούμενη επιφάνεια – βύθιση τροχών < 25mm	25-30	---
Χωματόδρομος με σταθερή, ομαλή, μη τακτικά συντηρούμενη επιφάνεια– βύθιση τροχών 25mm	40	---
Χωματόδρομος με σταθερή, ομαλή, μη τακτικά συντηρούμενη επιφάνεια – βύθιση τροχών 50mm	50	---
Χωματόδρομος με μαλακή, μη συντηρούμενη επιφάνεια – βύθιση τροχών 100mm	80	---
Χαλαρή άμμος ή χαλίκια	100	20
Χωματόδρομος με μαλακή, μη συντηρούμενη επιφάνεια – βύθιση τροχών 200mm	140	50
Χωματόδρομος με πολύ μαλακή, μη συντηρούμενη επιφάνεια – βύθιση τροχών 300mm	200	80

Η βιβλιογραφία αποδίδει ιδιαίτερη σημασία στην αντίσταση κύλισης καθώς επηρεάζει καθοριστικά την ταχύτητα κίνησης των μηχανημάτων και την κατανάλωση καυσίμου (Smith et al. 2000, Dunston et al. 2007). Για τη διατήρησή της σε χαμηλά επίπεδα είναι απαραίτητη η καλή συντήρηση των εργοταξιακών οδών με καθαρισμό, ισοπέδωση και διατήρηση της υγρασίας τους, πρακτικές οι οποίες επιπλέον οδηγούν σε βελτίωση της ορατότητας, μείωση της καταπόνησης των μηχανών εξ αιτίας της σκόνης και περιορισμό των φθορών στα ελαστικά.

Συντελεστής αντίστασης κλίσης

Ο συντελεστής αντίστασης κλίσης w_s (kp/Mp) εκφράζει την ανά μονάδα βάρους οχήματος αναπτυσσόμενη δύναμη αντίστασης στο όχημα λόγω της κλίσης της επιφάνειας κίνησης. Εμπειρικά, για επιφάνεια κλίσης α% ο συντελεστής αντίστασης ισούται με 10α kp/Mp.

Συντελεστής εκμετάλλευσης μηχανήματος

Ο συντελεστής εκμετάλλευσης $\eta_{εκμ}$ εκφράζει το εκτιμώμενο κλάσμα της ώρας στο οποίο εκτελείται εργασία. Η συνηθέστερα θεωρούμενη τιμή του είναι 0,83 σε αντιστοιχία με τη θεώρηση 50 λεπτών εργασίας ανά ώρα. Χαμηλότερες τιμές μεταξύ 0,5 και 0,75 απαντώνται επίσης στη βιβλιογραφία.

Συντελεστής μηχανικής απόδοσης μηχανήματος

Ο συντελεστής μηχανικής απόδοσης $\eta_{μηχ}$, εκφράζει το ποσοστό της μέσης αποδιδόμενης μηχανικής ισχύος και εξαρτάται από το επίπεδο συντήρησής του. Συνήθης τιμή 0,80 -0,85.

2.3.2 Επιλογή χαρακτηριστικών μηχανικού εξοπλισμού

Η εφαρμογή της Λειτουργικής Ανάλυσης με σκοπό την επιλογή των πλέον κατάλληλων και οικονομικών μηχανικών μέσων για εμπρόθεσμη εκτέλεση συγκεκριμένης εργασίας μετακίνησης εδαφικού υλικού έχει διαχρονικά αποτελέσει πεδίο έντονου ερευνητικού και βιβλιογραφικού ενδιαφέροντος.

Ο προσδιορισμός του πλέον κατάλληλου εξοπλισμού μέσα από το πλήθος των διατιθέμενων επιλογών της σύγχρονης κατασκευαστικής βιομηχανίας (τύπος, μέγεθος, χαρακτηριστικά) συνδέεται άμεσα με την εκτίμηση των συντελεστών που παρουσιάστηκαν προηγούμενα. Προς αυτήν την κατεύθυνση, η βιβλιογραφία προτείνει τη χρήση Εμπείρων Συστημάτων (Expert Systems), δηλαδή εφαρμογών Η/Υ οι οποίες, αξιοποιώντας ιστορικά στοιχεία, αξιολογούν τις πληροφορίες που εισάγει ο Χρήστης σχετικά με τις συνθήκες της σχεδιαζόμενης εργασίας και εκτιμούν αναλόγως τα μηχανικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του κατάλληλου εξοπλισμού. Σχετικές εργασίες έχουν γίνει από τους Chan and Harris (1989), Alkass and Harris (1991), Amirkhanian and Baker (1992), Christian and Xing Xie (1996), Lambropoulos et al. (1996), Celebi (1998), Kuprenas and Henkhaus (2000), Alkass et al. (2003), Eldin and Mayfield (2005).

Επίσης, αρκετοί ερευνητές προτείνουν τη στήριξη της διαδικασίας επιλογής των μηχανημάτων στη συνδυασμένη αξιολόγηση τεχνικοοικονομικών χαρακτηριστικών

και ποιοτικών κριτηρίων, άμεσα σχετιζόμενων με την καταλληλότητα χρήσης ενός μηχανήματος σε συγκεκριμένη εργασία. Μεταξύ των προτεινόμενων μεθόδων απαντώνται ενδεικτικά η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Shapira and Goldenberg 2005, Goldenberg and Shapira 2007, Shapira and Goldenberg 2007), η πολυκριτιριακή θεωρίας χρησιμότητας (Marzouk 2006) και η τεχνική ELECTRE III (Ulubeyli and Kazaz, 2009).

Επιπλέον, ο προσδιορισμός της βέλτιστης χωρητικότητας των μηχανημάτων για συγκεκριμένη εργασία έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας (Gates and Scarpa 1975, Karshenas 1989, Lineberry 1985, Gransberg 1996, Edwards et al. 2001).

Τέλος, απαντάται επίσης στη βιβλιογραφία η χρήση εργαλείων τεχνητής νοημοσύνης όπως τα νευρωνικά δίκτυα για την πρόβλεψη της ωριαίας παραγωγής (Flood and Christophilos 1996, Ok and Sinha 2006, Hola and Schabowicz 2010, Tam et al. 2002, Chao 2001) και οι γενετικοί αλγόριθμοι για τη δημιουργία και αξιολόγηση σεναρίων με εναλλακτικούς συνδυασμούς μέσων (Haidar et al. 1999, Marzouk and Moselhi 2004, Moselhi and Alshibani 2007, Moselhi and Alshibani 2009).

2.3.3 Εκτίμηση ωριαίας παραγωγής εξοπλισμού

Ο προσδιορισμός του αριθμού των μέσων που απαιτούνται για την εκτέλεση μίας εργασίας (διαστασιολόγηση συνδυασμού) προϋποθέτει την εκτίμηση της ωριαίας παραγωγής τους στις συνθήκες της συγκεκριμένης εργασίας. Με δεδομένο ότι οι εργοταξιακές συνθήκες χαρακτηρίζονται από μεταβλητότητα η οποία δεν μπορεί να προβλεφθεί καθώς συνδέεται με τυχαία γεγονότα και τον ανθρώπινο παράγοντα (Smith et al. 1995, Smith 1999), η εφαρμογή της ντετερμινιστικής Λειτουργικής Ανάλυσης για την εκτίμηση της ωριαίας παραγωγής των μέσων βασίζεται στη θεώρηση μέσων τιμών.

Φορτωτικό μέσο

Όσον αφορά στο φορτωτή / εκσκαφέα, η ωριαία παραγωγή του Q_{φ}, υπολογίζεται από την εξ. 2.2. Ο χρόνος κύκλου t_{φ} εκτιμάται με βάση τις εκάστοτε συνθήκες και με τη βοήθεια του εγχειριδίου του Κατασκευαστή.

$$Q_{\varphi} = \frac{V_{\varphi} * \varphi_{\varphi} * \eta_{\varepsilon\kappa\mu}}{t_{\varphi}} \qquad (2.2)$$

όπου V_{φ} : χωρητικότητα κάδου φορτωτή /εκσκαφέα,

φ_{φ} : αντίστοιχος συντελεστής πλήρωσης,

$n_{εκμ}$: συντελεστής εκμετάλλευσης φορτωτή /εκσκαφέα,

$t_φ$: χρόνος κύκλου φορτωτή /εκσκαφέα.

Χωματουργικό Όχημα

Όσον αφορά στο χωματουργικό όχημα, η υπολογιστική διαδικασία είναι πιο σύνθετη, δεδομένου ότι ο χρόνος κύκλου του $t_{οχ}$ (εξ. 2.3), εξαρτάται από το φορτωτικό μέσο και τη διαδρομή μεταφοράς.

$$t_{οχ} = t_{φορτ}+t_{μετ}+t_{επ}+t_{σταθ} \quad (2.3)$$

όπου $t_{φορτ}$: χρόνος φόρτωσης οχήματος,

$t_{μετ}$: χρόνος μετάβασης στη θέση απόθεσης,

$t_{επ}$: χρόνος επιστροφής από τη θέση απόθεσης,

$t_{σταθ}$: χρόνος απόθεσης και ελιγμών.

Ο χρόνος φόρτωσης $t_{φορτ}$, υπολογίζεται ως το γινόμενο του χρόνου κύκλου του φορτωτικού μέσου επί τον αριθμό των κύκλων φόρτωσης (εξ. 2.4). Ο αριθμός των κύκλων φόρτωσης αντιστοιχεί στο ακέραιο μέρος της τιμής ξ που εκφράζει τον ακριβή αριθμό φορτώσεων που απαιτούνται για πλήρη φόρτωση του οχήματος (εξ. 2.5). Υπενθυμίζεται ότι οι γενικά αποδεκτές τιμές που απαντώνται στη βιβλιογραφία για τον αριθμό των φορτώσεων [ξ], κυμαίνονται μεταξύ 4 και 7.

$$t_{φορτ} = [ξ]*t_φ \quad (2.4)$$

όπου [ξ] : αριθμός κύκλων φόρτωσης,

$t_φ$: χρόνος κύκλου φορτωτή / εκσκαφέα.

$$ξ = \min \{ \frac{V_{οχ} * φ_{οχ}}{V_φ * φ_φ} , \frac{B_{οχ,max}/γ}{V_φ * φ_φ} \} \quad (2.5)$$

όπου $γ$: ειδικό βάρος χαλαρού υλικού,

$V_φ$: χωρητικότητα κάδου φορτωτή/εκσκαφέα,

$φ_φ$: συντελεστής πλήρωσης κάδου φορτωτή/εκσκαφέα,

$V_{οχ}$: χωρητικότητα σκάφης οχήματος,

$B_{οχ, max}$: μέγιστο ωφέλιμο φορτίο οχήματος,

$φ_{οχ}$: συντελεστής πλήρωσης σκάφης οχήματος.

Για τον υπολογισμό του χρόνου μετάβασης $t_{μετ}$ είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του μεταφερόμενου φορτίου $B_{μετ}$ (εξ. 2.6) και στη συνέχεια ο υπολογισμός της

μέγιστης ταχύτητας κίνησης του οχήματος $U_{max,\mu\varepsilon\tau}$ υπό το φορτίο αυτό (εξ. 2.7). Κατ' αντιστοιχία, για το χρόνο επιστροφής $t_{\varepsilon\pi}$ υπολογίζεται η μέγιστη ταχύτητα κίνησης $U_{max,\varepsilon\pi}$ χωρίς φορτίο (εξ. 2.8). Σε κάθε περίπτωση, η τιμή της μέγιστης ταχύτητας δεν μπορεί να υπερβαίνει το ισχύον όριο ταχύτητας U_{lim}.

$$B_{\mu\varepsilon\tau} = [\xi] * V_{\varphi} * \varphi_{\varphi} * \gamma \tag{2.6}$$

$$U_{max,\,\mu\varepsilon\tau} = \frac{N_e * n_{\mu\eta\chi}}{(B_{\alpha\pi} + B_{\mu\varepsilon\tau}) * (w_r + w_s)} < U_{lim} \tag{2.7}$$

$$U_{max,\,\varepsilon\pi} = \frac{N_e * n_{\mu\eta\chi}}{B_{\alpha\pi} * (w_r + w_s)} < U_{lim} \tag{2.8}$$

όπου N_e : ιπποδύναμη κινητήρα οχήματος,

$n_{\mu\eta\chi}$: συντελεστής μηχανικής απόδοσης,

w_r : συντελεστής αντίστασης κύλισης,

w_s : συντελεστής αντίστασης κλίσης,

$B_{\alpha\pi}$: απόβαρο οχήματος,

$B_{\mu\varepsilon\tau}$: βάρος μεταφερόμενου υλικού,

U_{lim} : όριο ταχύτητας.

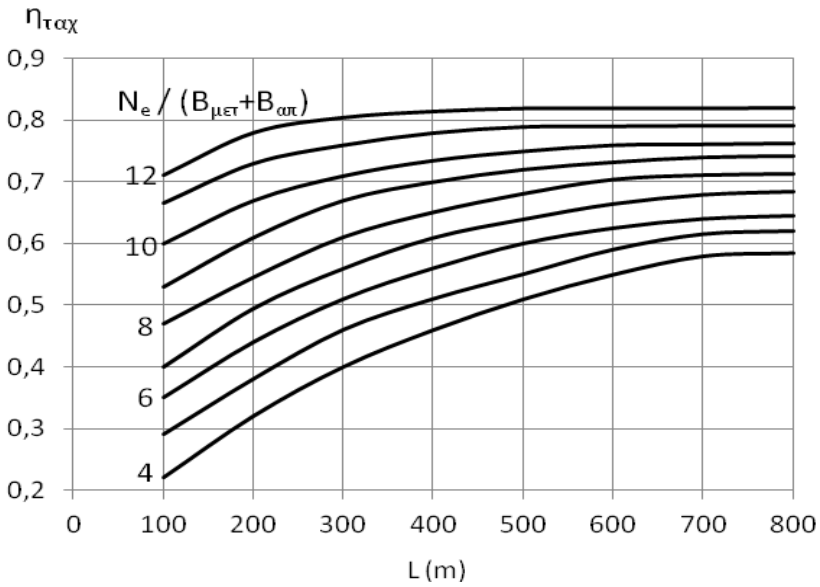
Οι ζητούμενοι χρόνοι $t_{\mu\varepsilon\tau}$, $t_{\varepsilon\pi}$ για δεδομένη απόσταση μεταφοράς L προκύπτουν από τις 2.9, 2.10 μετά από προσδιορισμό της μέσης ταχύτητας για μετάβαση και επιστροφή $U_{\mu\varepsilon\tau}$, $U_{\varepsilon\pi}$ αντίστοιχα. Αυτό επιτυγχάνεται με τον πολλαπλασιασμό της $U_{max,\mu\varepsilon\tau}$ ή $U_{max,\varepsilon\pi}$ με τον αντίστοιχο συντελεστή ταχύτητας $\eta_{\tau\alpha\chi,\,\mu\varepsilon\tau}$ ή $\eta_{\tau\alpha\chi,\,\varepsilon\pi}$ (εξ. 2.11, 2.12), όπως ο τελευταίος προσδιορίζεται από το εμπειρικό Νομογράφημα του Σχ.2.9 (Kuhn 1974), συναρτήσει του κατά περίπτωση λόγου της ιπποδύναμης του κινητήρα προς το μικτό βάρος του μηχανήματος ($N_e / B_{\mu\varepsilon\tau} + B_{\alpha\pi}$) και της απόστασης μεταφοράς.

$$t_{\mu\varepsilon\tau} = \frac{L}{U_{\mu\varepsilon\tau}} \tag{2.9}$$

$$t_{\varepsilon\pi} = \frac{L}{U_{\varepsilon\pi}} \tag{2.10}$$

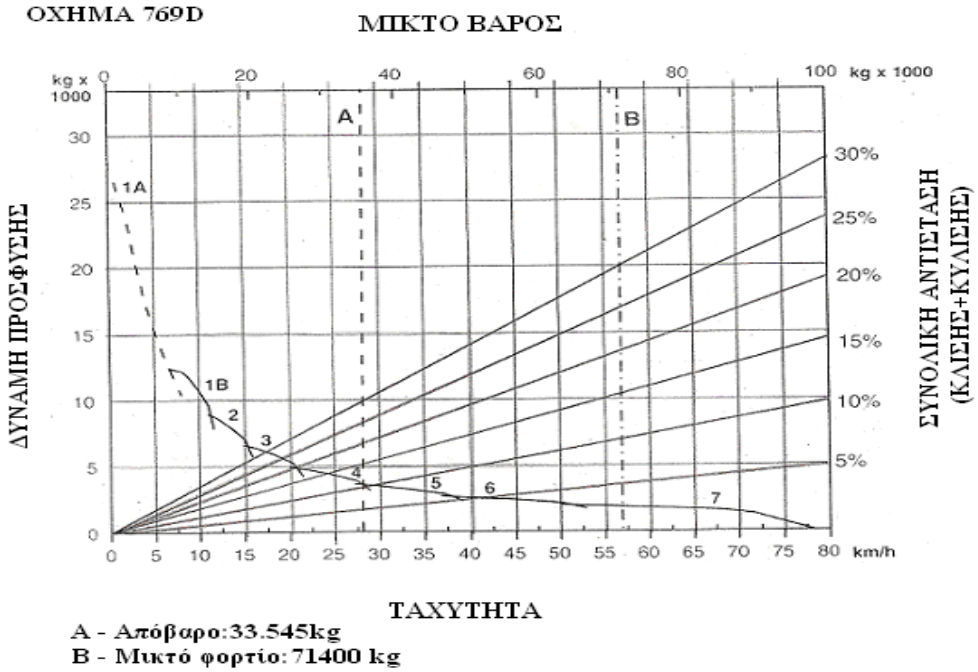
$$U_{\mu\varepsilon\tau} = U_{max,\,\mu\varepsilon\tau} * \eta_{\tau\alpha\chi,\,\mu\varepsilon\tau} \tag{2.11}$$

$$U_{\varepsilon\pi} = U_{max,\,\varepsilon\pi} * \eta_{\tau\alpha\chi,\,\varepsilon\pi} \tag{2.12}$$



Σχ. 2.9: Νομογράφημα υπολογισμού συντελεστή ταχύτητας

Για την αποφυγή των σύνθετων υπολογισμών που προηγήθηκαν, οι Κατασκευαστές παρέχουν διαγράμματα ταχείας εκτίμησης των ταχυτήτων (Σχ. 2.10).



Σχ. 2.10: Διάγραμμα ταχείας εκτίμησης ταχύτητας χωματουργικού οχήματος

Τέλος, οι χρόνοι απόθεσης και ελιγμών $t_{σταθ}$, εκτιμώνται με βάση την εμπειρία και τις προτεινόμενες τιμές από τον Κατασκευαστή του μηχανήματος. Η τυπική τιμή κυμαίνεται μεταξύ 0,7 – 1,5 min αναλόγως συνθηκών (Peurifoy et al. 2006).

Με γνωστό πλέον το χρόνο κύκλου του οχήματος, η ωριαία παραγωγή του Q_{ox} δίδεται από την εξ. 2.13.

$$Q_{ox} = \frac{[\xi] * V_{\varphi} * \varphi_{ox} * n_{\varepsilon\kappa\mu}}{t_{ox}} \qquad (2.13)$$

όπου $[\xi]$: ο αριθμός των κύκλων φόρτωσης,

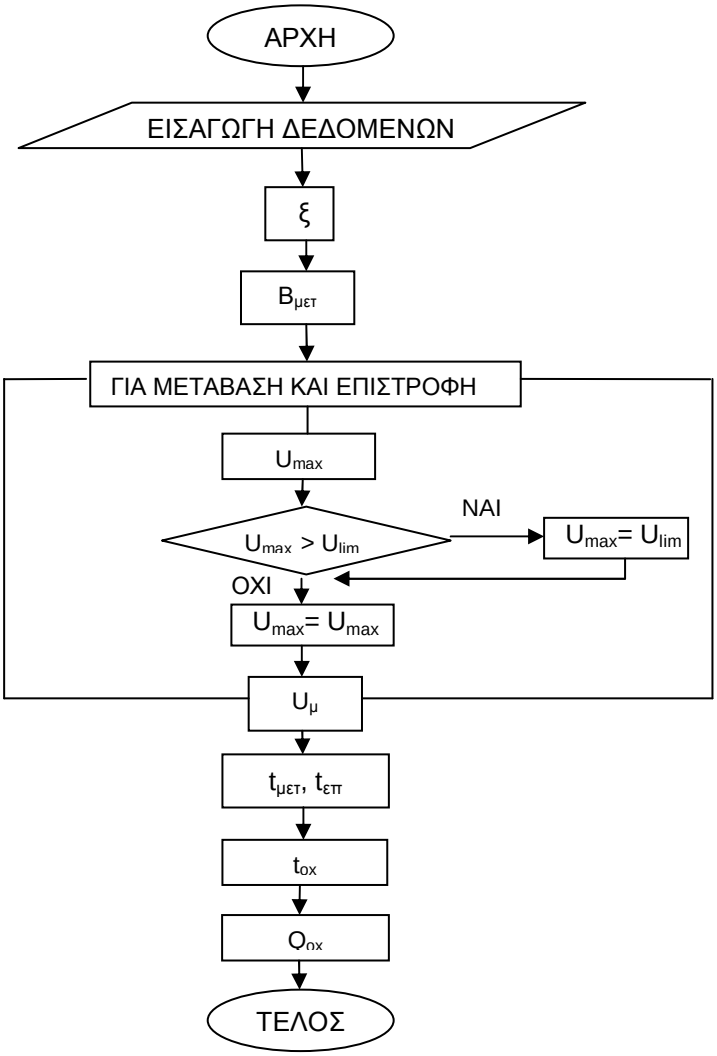
V_{φ} : η χωρητικότητα του κάδου του φορτωτή/εκσκαφέα,

φ_{ox} : ο συντελεστής πλήρωσης της σκάφης του οχήματος,

$n_{\varepsilon\kappa\mu}$: ο συντελεστής εκμετάλλευσης του οχήματος,

t_{ox} : ο χρόνος κύκλου του οχήματος.

Η υπολογιστική διαδικασία προσδιορισμού της ωριαίας παραγωγής του οχήματος απεικονίζεται στο διάγραμμα ροής του Σχ. 2.11.



Σχ. 2.11: Αλγόριθμος υπολογισμού ωριαίας παραγωγής οχήματος

Αποξεστικό όχημα

Όσον αφορά στο αποξεστικό όχημα, ο χρόνος κύκλου του $t_{απ}$ περιλαμβάνει τους ίδιους επιμέρους χρόνους με το χωματουργικό όχημα (εξ. 2.14) και η υπολογιστική διαδικασία διαφοροποιείται μόνο ως προς το χρόνο φόρτωσης $t_{φορτ}$, δεδομένου ότι η φόρτωση πραγματοποιείται ως συνεχής διαδικασία χωρίς την εμπλοκή φορτωτικού μέσου. Επιπλέον, στην περίπτωση αποξεστικού χωρίς μηχανισμό αυτοφόρτωσης, η διαδικασία φόρτωσης εξελίσσεται μη γραμμικά, ως αποτέλεσμα της αυξανόμενης αντίστασης του περιεχόμενου υλικού στη σκάφη. Ως εκ τούτου, ο προσδιορισμός του χρόνου φόρτωσης του συμβατικού αποξεστικού οχήματος και του αντίστοιχου μεταφερόμενου φορτίου αποτελεί αντικείμενο βελτιστοποίησης.

$$t_{απ} = t_{φορτ} + t_{μετ} + t_{επ} + t_{σταθ} \tag{2.14}$$

όπου $t_{φορτ}$: χρόνος φόρτωσης οχήματος,
$t_{μετ}$: χρόνος μετάβασης στη θέση απόθεσης,
$t_{επ}$: χρόνος επιστροφής από τη θέση απόθεσης,
$t_{σταθ}$: χρόνος απόθεσης και ελιγμών.

Η ωριαία παραγωγή του αποξεστικού οχήματος $Q_{απ}$ δίδεται από την εξ. 2.15.

$$Q_{απ} = \frac{V_{μετ} * n_{εκμ}}{t_{απ}} \tag{2.15}$$

όπου $V_{μετ}$: όγκος μεταφερόμενου υλικού,
$n_{εκμ}$: συντελεστής εκμετάλλευσης αποξεστικού,
$t_{απ}$: χρόνος κύκλου αποξεστικού.

Στην περίπτωση που στη διαδικασία φόρτωσης του αποξεστικού εμπλέκεται προωθητής-ταύρος, ο χρόνος κύκλου του διαφοροποιείται ανάλογα με τη διάταξη των μηχανημάτων κατά τη φόρτωση. Στην πλέον συνήθη περίπτωση ώθησης του αποξεστικού στην κατεύθυνση της μεταφοράς (backtrack loading), ο χρόνος κύκλου του προωθητή προκύπτει από την εξ. 2.16 (Peurifoy et al. 2006), οπότε για την ωριαία παραγωγή του $Q_{πρ}$ ισχύει η εξ. 2.17.

$$t_{πρ} = 0{,}25 + 1{,}4 * t_{φορτ} \tag{2.16}$$

$$Q_{πρ} = \frac{V_{μετ} * n_{εκμ}}{0{,}25 + 1{,}4 * t_{φορτ}} \tag{2.17}$$

όπου $V_{μετ}$: όγκος μεταφερόμενου υλικού από το αποξεστικό όχημα,
$n_{εκμ}$: συντελεστής εκμετάλλευσης αποξεστικού / προωθητή,
$t_{φορτ}$: χρόνος φόρτωσης αποξεστικού οχήματος,
$t_{απ}$: χρόνος κύκλου αποξεστικού οχήματος.

2.3.4 Ωριαία παραγωγή και συναρμογή συνδυασμού μέσων

Η ωριαία παραγωγή συνδυασμού που αποτελείται από δύο ομάδες μέσων (π.χ. k φορτωτές και n οχήματα) με ωριαία παραγωγή $Q_{ομ,1}$ και $Q_{ομ,2}$ αντίστοιχα, ισούται με τη μικρότερη μεταξύ των $Q_{ομ,1}$, $Q_{ομ,2}$ (εξ. 2.18) και η αντίστοιχη ομάδα μέσων ονομάζεται κρίσιμη.

$$Q_{συνδ} = \min (Q_{ομ,1}, Q_{ομ,2}) = \min (k*Q_{φ}, n*Q_{οχ}) \quad (2.18)$$

Ο λόγος των ωριαίων παραγωγών των δύο ομάδων ονομάζεται Συντελεστής Συναρμογής (ΣΣ) του συνδυασμού (εξ. 2.19) και αποτελεί μέτρο της οικονομικότητας της συνεργασίας των μέσων καθώς συνδέεται με τα διαστήματα αναμονής που παρατηρούνται στη λειτουργία της μη κρίσιμης ομάδας.

$$ΣΣ= \frac{Q_{ομ,2}}{Q_{ομ,1}} \quad (2.19)$$

Για παράδειγμα, αν σε συνδυασμό ομάδας φορτωτών και ομάδας οχημάτων ισχύει ΣΣ<1, τότε κρίσιμη ομάδα είναι η ομάδα των οχημάτων. Η μη κρίσιμη ομάδα των φορτωτών εξυπηρετεί την κρίσιμη ομάδα των οχημάτων στο [ΣΣ*100]% του χρόνου λειτουργίας της και στο υπόλοιπο [(1-ΣΣ)*100]% αδρανεί λόγω μη ύπαρξης οχήματος στη θέση φόρτωσης. Αν ΣΣ>1, κρίσιμη είναι η ομάδα των φορτωτών και ο χρόνος εργασίας κάθε (μη κρίσιμου) οχήματος ισούται με το [1/ΣΣ*100]% του συνολικού χρόνου λειτουργίας του, ενώ το υπόλοιπο [(1-1/ΣΣ)*100]% αντιστοιχεί σε χρόνο αναμονής στη θέση φόρτωσης.

2.3.5 Διαστασιολόγηση συνδυασμού

Έστω εργασία μετακίνησης υλικού συνολικού χαλαρού όγκου V, η οποία πρόκειται να εκτελεστεί από φορτωτές και οχήματα των οποίων η ωριαία παραγωγή εκτιμάται σε $Q_{φ}$ και $Q_{οχ}$, αντίστοιχα. Ο διαθέσιμος χρόνος για την εκτέλεση της εργασίας, αφού ληφθούν υπόψη οι πιθανές απώλειες λόγω έκτακτων γεγονότων (απεργίες, κακές καιρικές συνθήκες κλπ) αλλά και η πιθανότητα αξιοποίησης ελεύθερου χρονικού περιθωρίου από προηγούμενες δραστηριότητες (εφόσον η εργασία μετακίνησης υλικού συνηθέστερα αποτελεί ενδιάμεσο στάδιο χωματουργικών εργασιών

μεγαλύτερης κλίμακας), εκτιμάται σε $T_{εργ}$ ώρες. Με βάση τα παραπάνω, η ελάχιστη απαιτούμενη ωριαία παραγωγή $Q_{απαιτ}$ για εμπρόθεσμη εκτέλεση της εργασίας δίνεται από την εξ. 2.20.

$$Q_{απαιτ} = \frac{V}{T_{εργ}} \tag{2.20}$$

Η διαδικασία της διαστασιολόγησης αφορά στον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού μέσων, έστω k φορτωτές και n οχήματα, με τα οποία εξασφαλίζεται η ελάχιστη αυτή ωριαία παραγωγή ή ισοδύναμα πληρούνται οι συνθήκες των εξ. 2.21 και 2.22.

$$k*Q_{φ} \geq Q_{απαιτ} \rightarrow k \geq Q_{απαιτ} / Q_{φ} \tag{2.21}$$

$$n*Q_{ox} \geq Q_{απαιτ} \rightarrow n \geq Q_{απαιτ} / Q_{ox} \tag{2.22}$$

Κριτήριο για τον ακριβή προσδιορισμό των k, n αποτελεί η προσέγγιση της τιμής του ΣΣ στη μονάδα, αφού για ΣΣ=1 ή ισοδύναμα ισότητα των ωριαίων παραγωγών των δύο ομάδων (εξ. 2.23) επιτυγχάνεται μηδενισμός του χρόνου αναμονής και άρα εκτέλεση της εργασίας με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Με δεδομένο ωστόσο ότι τα k, n αντιστοιχούν σε ακέραιες τιμές, η εξ. 2.23 ισχύει κατά προσέγγιση μόνο, με εξαίρεση την περίπτωση κατά την οποία τα $Q_{φ}$, $Q_{oχ}$ έχουν κάποιο κοινό πολλαπλάσιο.

$$ΣΣ=1 \rightarrow n*Q_{ox} = k*Q_{φ} \tag{2.23}$$

Αναφορές στο Συντελεστή Συναρμογής και στη λειτουργία του ως μέσου διαστασιολόγησης των ομάδων του συνδυασμού απαντώνται στις εργασίες των Gove and Morgan (1994), Smith et al. (1995), Gransberg (1996), Smith (1999), Schexnayder et al. (1999), Smith et al. (2000), Eldin and Mayfield (2005), Moselhi and Alshibani (2007), Burt and Caccetta (2007).

Πιο συγκεκριμένα, η διαστασιολόγηση του συνδυασμού αρχίζει από τον προσδιορισμό του ελάχιστου απαιτούμενου αριθμού φορτωτών, k, για κάλυψη της ελάχιστης απαιτούμενης ωριαίας παραγωγής, $Q_{απαιτ}$ (εξ. 2.24).

$$k = [Q_{απαιτ} / Q_{φ}] +1 \tag{2.24}$$

Στη συνέχεια, με βάση τον παραπάνω αριθμό φορτωτών και την εξ. 2.23 προσδιορίζεται το πλήθος των οχημάτων, v (εξ. 2.25). Δεδομένου ωστόσο ότι ο

αριθμός αυτός είναι πιθανότατα δεκαδικός, απαιτείται η στρογγυλοποίησή του προς τον μικρότερο ακέραιο, έστω n (εξ. 2.26) ή τον αμέσως μεγαλύτερο, n+1.

$$v = \frac{k * Q_{\varphi}}{Q_{ox}} \tag{2.25}$$

$$n = [\frac{k * Q_{\varphi}}{Q_{ox}}] \tag{2.26}$$

Τυχόν αντίθετη εφαρμογή της διαδικασίας, δηλαδή αρχικός προσδιορισμός των οχημάτων και εν συνεχεία προσδιορισμός των φορτωτών με βάση τα οχήματα, μειώνει την πιθανότητα προσέγγισης της βέλτιστης συναρμογής, καθώς δεδομένου ότι η ωριαία παραγωγή των φορτωτών είναι πολλαπλάσια της ωριαίας παραγωγής των οχημάτων, η μη αξιοποιήσιμη διαφορά παραγωγής που εισάγεται εξ αιτίας της στρογγυλοποίησης είναι σημαντικά μεγαλύτερη.

Όσον αφορά στον αριθμό των οχημάτων, η στρογγυλοποίησή του προς τα κάτω συνεπάγεται κρισιμότητα της ομάδας των n οχημάτων έναντι της ομάδας των k φορτωτών και είναι επιτρεπτή μόνο εφόσον ισχύει $[\frac{k * Q_{\varphi}}{Q_{ox}}] > [\frac{Q_{απαιτ}}{Q_{ox}}]$. Αντίθετα, η στρογγυλοποίηση προς τα πάνω συνεπάγεται κρισιμότητα της ομάδας των k φορτωτών έναντι της ομάδας των n+1 οχημάτων.

Οι απόψεις σχετικά με τη σκοπιμότητα στρογγυλοποίησης του πλήθους των οχημάτων προς τα πάνω ή κάτω διίστανται. Αρκετοί ερευνητές (Alkass and Harris 1991, Εφραιμίδης 1998, Peurifoy 2006, Nunnally 2007) τάσσονται υπέρ της στρογγυλοποίησης προς τα πάνω προκειμένου να επιτυγχάνεται η μεγιστοποίηση της ωριαίας παραγωγής του συνδυασμού. Στον αντίποδα, ο Gransberg (1996) επικαλείται πρακτικό κανόνα, σύμφωνα με τον οποίο η στρογγυλοποίηση προς τα κάτω είναι προτιμότερη καθώς η πρόσθεση ενός οχήματος είναι ευκολότερη από την αφαίρεση. Σε αυτό συνηγορούν και οι Gates and Scarpa (1975). Ωστόσο, οι Schexnayder et al. (1999) αμφισβητούν την εγκυρότητα όσο και την εφαρμογή του κανόνα αυτού, επισημαίνοντας ότι κάθε περίπτωση είναι διαφορετική και η σχετική απόφαση πρέπει να λαμβάνεται με κριτήριο το κόστος. Στη θέση αυτή καταλήγουν και οι Gove and Morgan (1994), Eldin and Mayfield (2005). Με δεδομένα τα παραπάνω και αναγνωρίζοντας ότι η μεγιστοποίηση της παραγωγής δε συνεπάγεται απαραίτητα και ελαχιστοποίηση της τιμής μονάδας, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός κριτηρίων για την αξιολόγηση της χρησιμοποίησης ή μη του επιπλέον οχήματος.

Είναι γεγονός ότι λόγω του επιπλέον οχήματος παρατηρείται αφενός αύξηση στην ωριαία παραγωγή του συνδυασμού κατά $\Delta Q=(k*Q_{\varphi} - n*Q_{o\chi})$ m^3/h και αφετέρου αύξηση του ωριαίου κόστους του συνδυασμού κατά το ωριαίο κόστος ενός οχήματος δηλαδή $c_{o\chi}$ χρ.μ./h. Με κριτήριο την κατά περίπτωση προκύπτουσα τιμή μονάδας της εργασίας (χρ.μ./ m^3), η τοποθέτηση του επιπλέον οχήματος είναι οικονομικά σκόπιμη εφόσον ισχύει η εξ. 2.27, όπου c_{φ} το ωριαίο κόστος του φορτωτή.

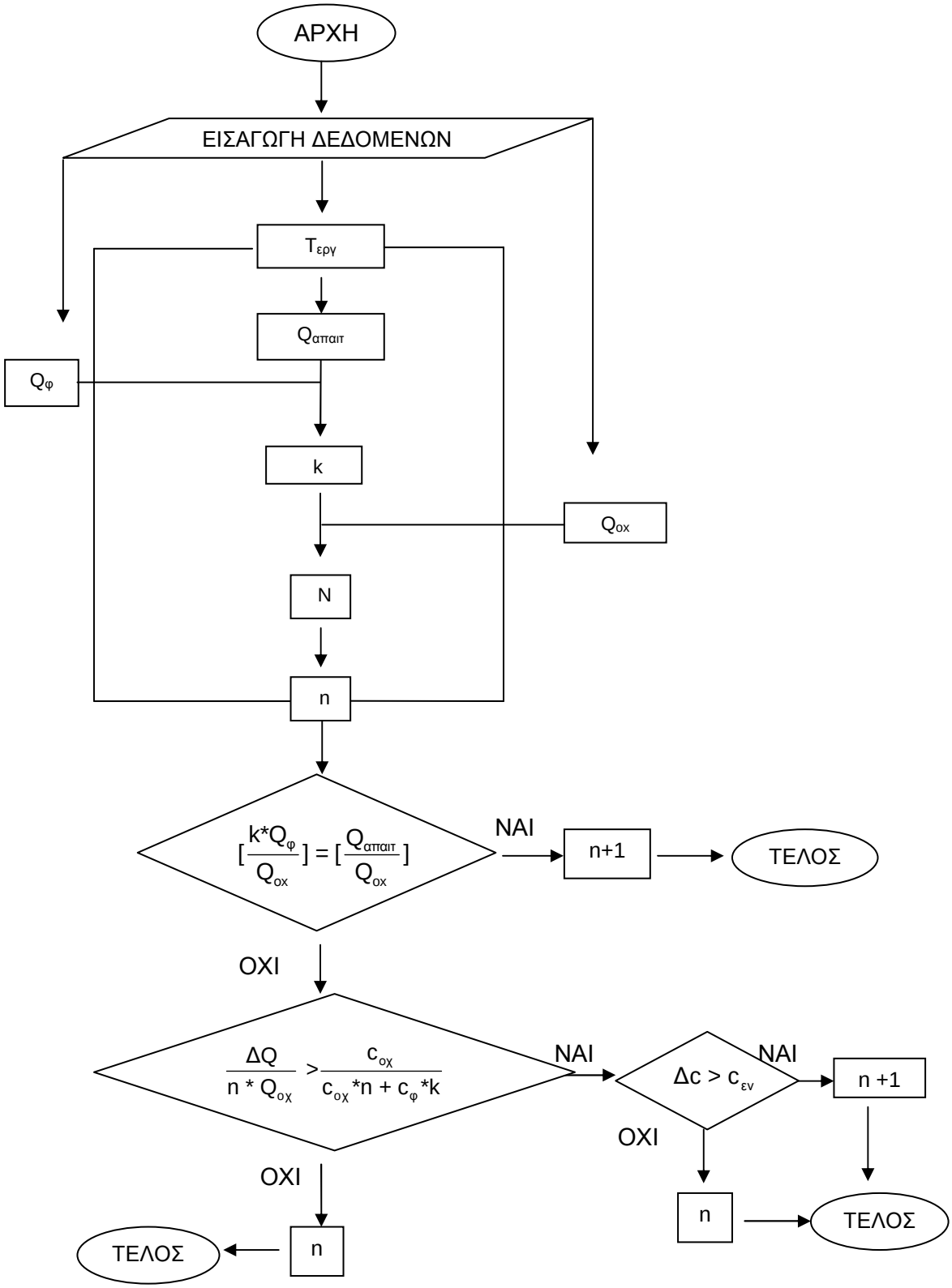
$$\frac{\Delta Q}{n * Q_{o\chi}} > \frac{c_{o\chi}}{c_{o\chi} * n + c_{\varphi} * k} \qquad (2.27)$$

Επιπλέον, εάν υποτεθεί ότι η ενεργοποίηση κάθε οχήματος συνεπάγεται συγκεκριμένο κόστος $c_{\varepsilon\nu}$, η τοποθέτηση n+1 αντί n οχημάτων είναι σκόπιμη εφόσον το συνολικό οικονομικό όφελος Δc που προκύπτει, είναι μεγαλύτερο από το κόστος αυτό (εξ. 2.28).

$$\Delta c > c_{\varepsilon\nu} \qquad (2.28)$$

Με βάση τα παραπάνω, η λογική πορεία προσδιορισμού του ελάχιστου αριθμού μέσων για εμπρόθεσμη ολοκλήρωση της εργασίας και με το μικρότερο κόστος, παρουσιάζεται στο Σχ. 2.12.

Θα μπορούσε να αξιολογηθεί επίσης η χρησιμοποίηση ενός μεγαλύτερου συνδυασμού μέσων με έστω k’ φορτωτές (k’ > k), και αντιστοίχως αυξημένο αριθμό οχημάτων. Αυτή η εναλλακτική επιλογή επιτυγχάνει σημαντικά ενωρίτερη ολοκλήρωση της εργασίας, αλλά ταυτόχρονα προϋποθέτει διαθεσιμότητα περισσότερων μέσων και συνεπάγεται αυξημένες απαιτήσεις ρευστότητας για κάλυψη του μεγαλύτερου κόστους ενεργοποίησης και συνολικού ωριαίου κόστους λειτουργίας. Συνεπώς, είναι εύλογο να προτιμηθεί μόνον εφόσον υφίσταται οικονομική επιβράβευση της συντομότερης ολοκλήρωσης της εργασίας (πριμ). Ασφαλώς σε αυτήν την περίπτωση, το βέλτιστο πλήθος φορτωτών και οχημάτων καθορίζεται από τους όρους του πριμ (ύψος πρόσθετης αμοιβής/ ημέρα, μέγιστη συνολική αμοιβή) με γνώμονα τη μεγιστοποίηση του κέρδους. Σχετική έρευνα βελτιστοποίησης της σχέσης κέρδους και διάρκειας έργου μέσω του μεγέθους του στόλου έχει γίνει από τους Lambropoulos and Manolopoulos (1990), Dodin and Elimam (2008) και Senouci and El-Rayes (2009).



Σχ. 2.12: Αλγόριθμος προσδιορισμού βέλτιστου πλήθους οχημάτων για δεδομένο αριθμό φορτωτών

3. ΔΙΑΓΝΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Οι αντίξοες συνθήκες υπό τις οποίες λειτουργούν συχνά τα χωματουργικά οχήματα δημιουργούν τις προϋποθέσεις για ταχεία επιδείνωση της λειτουργικής τους κατάστασης και την εκδήλωση βλαβών. Ως εκ τούτου, η διάγνωση της κατάστασης των οχημάτων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αποδοτική χρησιμοποίηση τους και τη βέλτιστη εφαρμογή των μέτρων συντήρησης. Στο παρόν κεφάλαιο διερευνάται η δυνατότητα πρόβλεψης της λειτουργικής κατάστασης οχήματος με βάση στοιχεία ηλικίας, μεγέθους, χρήσης και συντήρησης. Για το σκοπό αυτό γίνεται επεξεργασία πραγματικών στοιχείων με τη στατιστική μέθοδο της Διαχωριστικής Ανάλυσης και με εφαρμογή τεχνητών νευρωνικών δικτύων.

3.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Μεγάλος αριθμός ερευνητών αναφέρεται στις συνέπειες της εκδήλωσης βλαβών στο μηχανικό εξοπλισμό και επισημαίνει την ανάγκη άμεσης αντιμετώπισής τους. Ενδεικτικά, οι Zakeri et al. (1996) αναγνωρίζουν την εκδήλωση βλαβών ως έναν από τους τρεις σημαντικότερους παράγοντες διατάραξης της παραγωγής. Οι Edwards et al. (1998) συνδέουν την εκδήλωση βλαβών με άμεση αύξηση του κόστους επισκευών, αλλά και έμμεση οικονομική ζημία οφειλόμενη μεταξύ άλλων στη μείωση της παραγωγής, την αύξηση της διάρκειας του έργου και τυχόν σχετικές ρήτρες. Σε σχετική έρευνά τους με βάση στοιχεία από 9 έργα οδοποιίας, οι Nepal and Park (2004) προσδιορίζουν το πρόσθετο κόστος λόγω βλαβών στο 3,6% του μέσου αρχικού προϋπολογισμού. Επίσης, συνδέουν άμεσα τις συνέπειες του φαινομένου σε κόστος και χρόνο με την πολυπλοκότητα των μηχανικών και υδραυλικών συστημάτων του μηχανήματος, την ηλικία του, τις ικανότητες και την κατάρτιση του χειριστή και τις εφαρμοζόμενες πρακτικές συντήρησης. Η σημασία των δύο τελευταίων παραγόντων επιβεβαιώνεται και από σειρά ερευνών των Prasertrungruang and Hadikusumo (2007, 2008, 2009a, 2009b), οι οποίοι διατυπώνουν ανάλογες προτάσεις ενίσχυσής τους. Οι Edwards et al. (2002b) επισημαίνουν τον βαρύνοντα ρόλο της εμπειρίας του χειριστή και την ανάγκη αξιολόγησής της, ενώ συνδέουν το φαινόμενο των βλαβών με απώλεια παραγωγής κατ' έτος ίση με το πενταπλάσιο της ημερήσιας παραγωγής του εργοταξίου για κάθε μηχάνημα.

Σε αυτό το πλαίσιο, ο προσδιορισμός παραγόντων δια των οποίων καθίσταται δυνατή η διάγνωση της λειτουργικής κατάστασης του μηχανικού εξοπλισμού έχει απασχολήσει ευρέως τη βιβλιογραφία. Μεγάλος αριθμός ερευνητών προτείνει τη διάγνωση της κατάστασης του μηχανικού εξοπλισμού μέσω συστηματικών φυσικοχημικών μετρήσεων και αναλύσεων που βασίζονται σε δονήσεις (Edwards et al. 1998, Saranga 2002**,** Samanta and Al-Balushi 2003, Javadpour and Knapp 2003, Wang et al. 2004, Carnero 2005, Rafiee et al. 2007, Tian 2012)**,** ήχους (Hayashi et al. 2002, Sawicki and Żak 2007), σύσταση λιπαντικών ελαίων (Edwards et al. 1998, Jardine et al. 2001, Carnero 2005, Makis et al. 2006), σύσταση καυσαερίων (Sawicki and Żak 2007) και θερμοκρασία εξαρτημάτων (Edwards et al. 1998, Saranga 2002)**.**

Είναι ωστόσο γεγονός ότι η τακτική μέτρηση των παραπάνω δεικτών απαιτεί αυτοματοποιημένες διαδικασίες και εξειδικευμένο εξοπλισμό που δεν απαντώνται στην πλειονότητα των ελληνικών κατασκευαστικών εταιρειών. Συνεπώς κρίνεται προσφορότερη η προσέγγιση άλλης ομάδας εργασιών, προσανατολισμένης στα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς, βάσει της οποίας η λειτουργική κατάσταση του οχήματος προσδιορίζεται από παράγοντες όπως η ηλικία, τα διανυθέντα χιλιόμετρα, το μέγεθος και το επίπεδο συντήρησης. Συγκεκριμένα, οι Karlaftis and Sinha (1997) και Chang and Collura (1998) χρησιμοποίησαν ως δείκτες για την πρόβλεψη της λειτουργικής κατάστασης λεωφορείων στοιχεία ηλικίας, διανυθέντων χιλιομέτρων, συντήρησης, μεγέθους, ηλικίας της μηχανής και καιρικών συνθηκών στην περιοχή λειτουργίας. Επίσης, ο Karlaftis (1997) κατέταξε τα λεωφορεία της Αθήνας σε κλίμακα διαφορετικών επιπέδων κατάστασης βασιζόμενος σε χαρακτηριστικά ηλικίας, διανυθέντων χιλιομέτρων και μεγέθους.

Αντίστοιχη έρευνα που να στοχεύει στη διάγνωση της κατάστασης χωματουργικών οχημάτων μέσω ανάλογων, ευχερώς προσδιοριζόμενων χαρακτηριστικών θα μπορούσε να συμβάλει στην αποδοτικότερη διαχείριση της λετουργίας και της συντήρησής τους. Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, επιλέγεται για το σκοπό αυτό αφενός η Διαχωριστική Ανάλυση, τεχνική στατιστικής και λογικής ανάλυσης δεδομένων η οποία στοχεύει στον εντοπισμό επαναλαμβανόμενων μοτίβων ή τάσεων, και αφετέρου τα νευρωνικά δίκτυα, τα οποία ανταγωνίζονται σε ακρίβεια τις στατιστικές μεθόδους λειτουργώντας αποτελεσματικά στην αναγνώριση προτύπων ακόμα και σε περιπτώσεις ελλιπών δεδομένων ή πολυσυγγραμμικότητας των μεταβλητών (Raza 2010).

3.3 Διάγνωση λειτουργικής κατάστασης οχημάτων

3.3.1 Συλλογή και περιγραφή στοιχείων

Κατά την αναζήτηση κατάλληλων στοιχείων από χωματουργικά οχήματα προσεγγίστηκαν αρκετοί φορείς (κατασκευαστικές εταιρείες, εργολάβοι χωματουργικών έργων) αλλά στην πλειονότητα των περιπτώσεων διαπιστώθηκε απροθυμία ή αδυναμία διάθεσης των απαραίτητων στοιχείων. Τα δεδομένα που τελικά χρησιμοποιήθηκαν δόθηκαν από δύο εταιρείες μεγάλου ελληνικού κατασκευαστικού ομίλου και αφορούσαν σε στοιχεία χωρητικότητας, ηλικίας, διανυθέντων χιλιομέτρων, επιπέδου συντήρησης και επιπέδου κατάστασης για 126 χωματουργικά οχήματα.

Ως κριτήριο αξιολόγησης του επιπέδου κατάστασης των οχημάτων χρησιμοποιήθηκε το μέγεθος της διαθεσιμότητας Δ, δηλαδή το ποσοστό του χρόνου κατά το οποίο η λειτουργική κατάσταση του οχήματος επιτρέπει τη χρησιμοποίησή του στην παραγωγική διαδικασία (Lingaraj and Kuo 1983, Murty and Naikan 1995). Η αξιολόγηση έγινε από τις τεχνικές διευθύνσεις των δύο εταιρειών με βάση στοιχεία συντήρησης και λειτουργίας των τελευταίων μηνών και σύμφωνα με την εξής κλίμακα:

Επίπεδο κατάστασης 1:	Το όχημα είναι σε κατάσταση βλάβης / επισκευής με συχνότητα τέτοια ώστε Δ< 70%.
Επίπεδο κατάστασης 2:	Το όχημα είναι σε κατάσταση βλάβης / επισκευής με συχνότητα τέτοια ώστε 70%<Δ≤ 80%.
Επίπεδο κατάστασης 3:	Το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση βλάβης / επισκευής με συχνότητα τέτοια ώστε 80%<Δ≤ 90%.
Επίπεδο κατάστασης 4:	Το όχημα βρίσκεται σε κατάσταση βλάβης / επισκευής με συχνότητα τέτοια ώστε 90%<Δ≤ 100%.

Τα όρια της διαθεσιμότητας σε κάθε επίπεδο κατάστασης θεωρήθηκαν σε αντιστοιχία με την περιγραφική κλίμακα συχνότητας και σημαντικότητας βλαβών (FTA 1994) η οποία έχει χρησιμοποιηθεί στη σχετική βιβλιογραφία (Karlaftis and Sinha 1997, Karlaftis 1997).

Όσον αφορά στη συντήρηση, στην ανάλυση υπεισέρχονται δύο επίπεδα, αναλόγως της πολιτικής που ακολουθεί η εταιρεία στην οποία ανήκει το κάθε όχημα:

Επίπεδο συντήρησης 1: Στα οχήματα εφαρμόζεται βασική συντήρηση

Επίπεδο συντήρησης 2: Στα οχήματα εφαρμόζεται βασική συντήρηση και επιπρόσθετα, με το πέρας κάθε έργου, διενεργείται εκτεταμένος έλεγχος και αντικατάσταση μηχανικών μερών εφόσον κριθεί απαραίτητο.

Τα χαρακτηριστικά των οχημάτων της βάσης δεδομένων συνοψίζονται στον Πιν. 3.1.

Πιν. 3.1: Χαρακτηριστικά χωματουργικών οχημάτων βάσης δεδομένων

Μεταβλητές	Επίπεδο κατάστασης								
	2			3			4		
Περιγραφή	min	max	aver	min	max	aver	min	max	aver
Ηλικία (έτη)	9,0	31,0	14,2	10,0	32,0	17,9	11,0	31,0	19,9
Διανυθέντα χλμ ($x10^3$)	15,6	877,9	367,2	15,0	833,5	418,9	3,1	350,1	149,9
Χωρητικότητα (m^3)	11,2	25,9	15,6	9,1	25,0	16,7	11,3	22,0	15,8
Επίπεδο συντήρησης	1 & 2			1 & 2			1 & 2		
Πλήθος οχημάτων	45			50			31		

3.3.2 Εφαρμογή Διαχωριστικής Ανάλυσης

Η Διαχωριστική Ανάλυση εισήχθη το 1936 από τον Άγγλο στατιστικολόγο και βιολόγο Sir Ronald Fischer και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πλήθος γνωστικών αντικειμένων στους κλάδους των κοινωνικών επιστημών, των επιστημών υγείας και της μηχανικής. Ενδείκνυται για παρατηρήσεις που κατατάσσονται σε μία από g εναλλακτικές κατηγορίες και που χαρακτηρίζονται από m ποσοτικές ή/και κατηγορικές (categorical) μεταβλητές. Η εφαρμογή της εξυπηρετεί δύο διαφορετικούς σκοπούς: α) την αποτίμηση της συμβολής των μεταβλητών (κατηγορικών και μη) στο διαχωρισμό των παρατηρήσεων στις διάφορες κατηγορίες και β) την πρόβλεψη της κατάταξης νέων παρατηρήσεων στις υπάρχουσες κατηγορίες. Αναλόγως του στόχου, εφαρμόζεται η Διαχωριστική Ανάλυση για Διαχωρισμό ή η Διαχωριστική ανάλυση για Κατάταξη. Αμφότερες οι παραπάνω διαδικασίες οδηγούν στην παραγωγή εξισώσεων οι οποίες μπορούν να υποτεθούν γραμμικές (Γραμμική Διαχωριστική Ανάλυση) εφόσον οι μεταβλητές ακολουθούν την κανονική κατανομή και έχουν κοινό πίνακα συνδιακύμανσης σε όλες τις κατηγορίες.

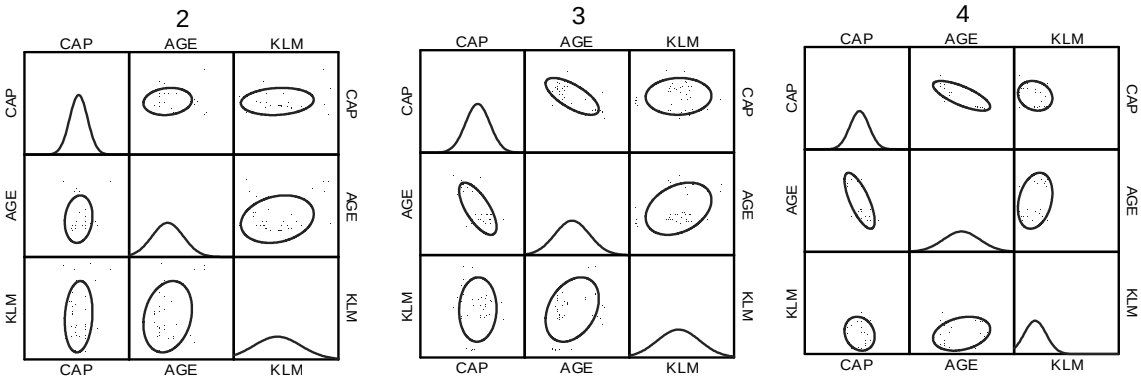
Για τη διαθέσιμη βάση δεδομένων διακρίνονται 3 εναλλακτικές κατηγορίες (g=3: επίπεδο κατάστασης (cond) 2, 3, 4) και 4 μεταβλητές (m=4: χωρητικότητα (cap),

ηλικία (age) διανυθέντα χιλιόμετρα (klm), επίπεδο συντήρησης (maint)). Από τον έλεγχο κατά Kolmogorov-Smirnov της τήρησης των προϋποθέσεων κανονικότητας των ποσοτικών μεταβλητών σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05, προκύπτει ότι η υπόθεση κανονικής κατανομής ισχύει μόνο για τις μεταβλητές χωρητικότητας και διανυθέντων χιλιομέτρων (Πιν. 3.2).

Πιν. 3.2: Αποτελέσματα ελέγχου κανονικότητας μεταβλητών κατά Kolmogorov-Smirnov και ελέγχου ισότητας πινάκων συνδιακύμανσης

	Sig.	Box - M test	
CAP	0,078	F Approx.	3,266
AGE	0,000	df1	20
KLM	0,649	df2	38705
		Sig.	0.000

Όσον αφορά στη συνδιακύμανση των παρατηρήσεων, εφόσον η παρατηρούμενη στάθμη σημαντικότητας του ελέγχου Box-M test είναι μηδενική (Πιν 3.2), η υπόθεση ισότητας των πινάκων συνδιακύμανσης στις τρεις διαφορετικές κατηγορίες δεν επαληθεύεται. Ωστόσο, δεδομένης της ευαισθησίας του συγκεκριμένου ελέγχου στην απόκλιση μεταβλητών από την κανονικότητα, είναι σκόπιμη η γραφική διερεύνηση της συνδιακύμανσης με κριτήριο το σχήμα, το μέγεθος και τον προσανατολισμό του νέφους που δημιουργούν οι παρατηρήσεις κάθε κατηγορίας (Σχ. 3.1) (Worth and Cronin, 2003).



Σχ. 3.1: Γραφική διερεύνηση συνδιακύμανσης μεταβλητών

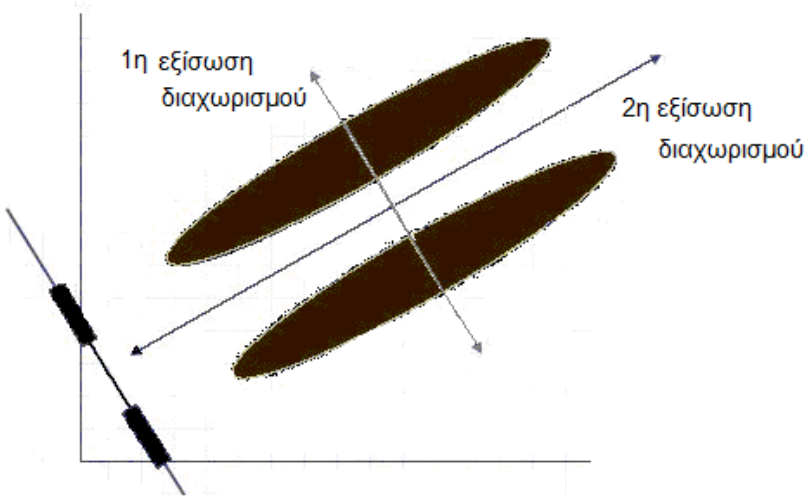
Από τη σχετική απεικόνιση διαπιστώνεται ότι οι υπάρχουσες διαφορές δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές. Εξάλλου, η βιβλιογραφία επιβεβαιώνει ότι η παρέκκλιση από την κανονικότητα και την ισότητα των πινάκων συνδιακύμανσης αποτελεί σύνηθες φαινόμενο και δεν είναι απαγορευτική για την εφαρμογή της Γραμμικής Διαχωριστικής Ανάλυσης (Statsoft 2010, LeBlanc and Rucks 1996, Blackard and Dean 1999). Συνεπώς, θα εφαρμοστεί η γραμμική Διαχωριστική Ανάλυση στα διαθέσιμα δεδομένα με χρήση στατιστικού πακέτου.

Διαχωριστική Ανάλυση για Διαχωρισμό

Η εφαρμογή της Διαχωριστικής Ανάλυσης για Διαχωρισμό (ΔΑΔ) στοχεύει στον προσδιορισμό των εξισώσεων διαχωρισμού, δηλαδή των γραμμικών συνδυασμών των μεταβλητών t_i, όπου $i \leq m$ για τους οποίους επιτυγχάνεται ο μέγιστος δυνατός διαχωρισμός των παρατηρήσεων της κάθε κατηγορίας από τις παρατηρήσεις των υπολοίπων κατηγοριών (εξ. 3.1). Αναλυτική περιγραφή της ΔΑΔ δίνεται από τους Tabachnick and Fidell (2007).

$$D_j=V_{j0} +V_{j1} *t_1+V_{j2} *t_2+...+V_{jm}*t_m \text{ όπου } j=1...f \qquad (3.1)$$

Το πλήθος των εξισώσεων διαχωρισμού είναι f, όπου f = min (g-1, m) και η διαχωριστική τους λειτουργία γίνεται αντιληπτή από τη θεώρηση τους ως αξόνων επί των οποίων προβάλλονται οι παρατηρήσεις (Σχ. 3.2). Ευνόητο είναι ότι ο πλήρης διαχωρισμός των παρατηρήσεων συνήθως δεν είναι εφικτός, οπότε οι εξισώσεις διαχωρισμού οδηγούν στη μικρότερη δυνατή αλληλεπικάλυψη των παρατηρήσεων διαφορετικής κατηγορίας.



Σχ. 3.2: Διαχωριστική λειτουργία εξισώσεων διαχωρισμού

Ο πίνακας V που περιλαμβάνει τις τιμές των ζητούμενων συντελεστών $V_{ji,}$ προκύπτει από την απαίτηση μεγιστοποίησης του λόγου του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των g κατηγοριών προς το μέσο τετραγωνικό σφάλμα εντός των g κατηγοριών. Ο προσδιορισμός του ανάγεται στην επίλυση του προβλήματος ιδιοτιμών $(T-W)*V=\lambda*W*V$ όπου T ο πίνακας συνολικού τετραγωνικού σφάλματος των γινομένων (total sum of squares and cross-product matrix) και W ο πίνακας συνολικού τετραγωνικού σφάλματος των γινομένων εντός των κατηγοριών (within

groups sums of squares and cross-product matrix). Μέτρο της σχετικής συνεισφοράς της κάθε μεταβλητής στο διαχωρισμό των παρατηρήσεων αποτελεί η τιμή των συντελεστών V_{ji} σε τυποποιημένη μορφή.

Οι δύο εξισώσεις διαχωρισμού που προκύπτουν για τα διαθέσιμα δεδομένα σε τυποποιημένη και μη τυποποιημένη μορφή αντιστοιχούν στις εξ. 3.2, 3.3 και 3.4 , 3.5 αντίστοιχα. Συνεπώς με βάση τις τιμές των συντελεστών των εξ. 3.2 και 3.3 προκύπτει ότι ο ρόλος της συντήρησης στη διαμόρφωση του επιπέδου κατάστασης είναι καθοριστικός, ενώ αρκετά σημαντική αποδεικνύεται επίσης η επίδραση των διανυθέντων χιλιομέτρων. Στον αντίποδα, πολύ μικρότερη σημασία αποδίδεται στην ηλικία και τη χωρητικότητα του οχήματος.

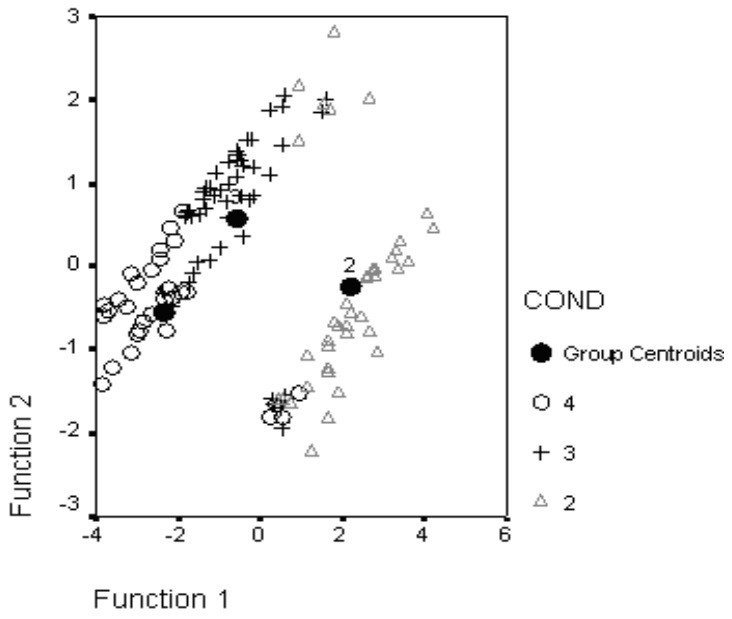
$$D_{1,\,stand} = 0{,}287*cap + 0{,}277*age + 1{,}252*klm - 1{,}588*maint \quad (3.2)$$

$$D_{2,\,stand} = 0{,}071*cap - 0{,}273*age + 0{,}752*klm + 0{,}353*maint \quad (3.3)$$

$$D_1 = 0{,}086*cap + 0{,}039*age - 6{,}5E\text{-}06*klm - 4{,}593*maint + 3{,}145 \quad (3.4)$$

$$D_2 = 0{,}021*cap - 0{,}038*age - 3{,}9E\text{-}06*klm + 1{,}022*maint - 2{,}637 \quad (3.5)$$

Η απεικόνιση των παρατηρήσεων στο σύστημα αξόνων που σχηματίζουν οι δύο εξισώσεις διαχωρισμού αποσαφηνίζει τη διαχωριστική λειτουργία κάθε μίας εξ αυτών (Σχ. 3.3).



Σχ. 3.3: Διαχωρισμός παρατηρήσεων με βάση τις διαχωριστικές εξισώσεις

Συγκεκριμένα, η D_1 επιτυγχάνει πολύ ικανοποιητικό διαχωρισμό των παρατηρήσεων του επιπέδου 2 από τις παρατηρήσεις των επιπέδων 3 και 4, καθώς οι προβολές των παρατηρήσεων του επιπέδου 2 βρίσκονται όλες στο θετικό οριζόντιο ημιάξονα, ενώ των επιπέδων 3, 4 στη συντριπτική τους πλειονότητα στον αρνητικό. Επιπλέον, η D_2 συνδέεται με τη διαφοροποίηση των παρατηρήσεων των επιπέδων 3 και 4, καθώς οι προβολές των παρατηρήσεων του επιπέδου 3 βρίσκονται στην πλειονότητά τους στον θετικό κατακόρυφο ημιάξονα, ενώ οι προβολές των παρατηρήσεων του επιπέδου 4 βρίσκονται στην πλειονότητά τους στον αρνητικό κατακόρυφο ημιάξονα. Τα παραπάνω επαληθεύονται και από τα πρόσημα των συντεταγμένων των σημείων που αντιστοιχούν στα κεντροειδή των τριών επιπέδων (Πιν. 3.3).

Πιν. 3.3: Συντεταγμένες κεντροειδών στο επίπεδο των D_1, D_2

Επίπεδο κατάστασης	D_1	D_2
2	2,222	-0,251
3	-0,545	0,574
4	-2,347	-0,561

Με βάση τις προκύπτουσες ιδιοτιμές (eigenvalue) η D_1 συνδέεται με το 93,3% της συνολικής επεξηγούμενης μεταβλητότητας και η D_2 με το υπολειπόμενο 6,7% (Πιν. 3.4). Όσον αφορά στο ποσοστό της επεξηγούμενης, από κάθε διαχωριστική εξίσωση, μεταβλητότητας, αυτή προκύπτει από το τετράγωνο της κανονικοποιημένης συσχέτισης (canonical correlation) των μεταβλητών με την εξίσωση (Πιν 3.4). Συνεπώς τα ποσοστά αυτά ισούνται με $0,877^2 = 0,77 = 77\%$ για την D_1 και με $0,437^2 = 0,19 = 19\%$ για την D_2. Το συνολικό ποσοστό της επεξηγούμενης μεταβλητότητας από αμφότερες τις εξισώσεις υπολογίζεται ίσο με 1-[(1-0,77)*(1-0,19)]=0,813 ή 81,3%, οπότε η διαχωριστική λειτουργία των δύο εξισώσεων είναι ιδιαιτέρως ικανοποιητική. Τέλος, με βάση τον έλεγχο στατιστικής σημαντικότητας (Πιν. 3.5), η συνεισφορά αμφότερων των εξισώσεων στο διαχωρισμό των παρατηρήσεων κρίνεται σημαντική.

Πιν. 3.4: Αξιολόγηση διαχωριστικής ικανότητας εξισώσεων

	Eigenvalue	% Variance	Canonical Correlation
D_1	3,316	93,3	0,877
D_2	0,236	6,7	0,437

Πιν. 3.5: Αξιολόγηση στατιστικής σημαντικότητας εξισώσεων

Test of	Wilks Lambda	Chi-Square	df	Sig.
$D_{1+}D_2$	0,187	203,430	8	0,000
D_2	0,809	25,768	3	0,000

Διαχωριστική Ανάλυση για Κατάταξη

Η Διαχωριστική Ανάλυση για Κατάταξη (ΔΑΚ) εφαρμόζεται με σκοπό την πρόβλεψη της κατηγορίας στην οποία ανήκει μία νέα παρατήρηση γνωστών χαρακτηριστικών και συνίσταται στον προσδιορισμό μίας εξίσωσης κατάταξης (classification function) για κάθε κατηγορία. Η εξίσωση κατάταξης είναι γραμμικός συνδυασμός των m μεταβλητών t_i, όπου i=1..m (εξ.3.6) και οι συντελεστές w_{ji} προκύπτουν από τους Πίνακες μέσων τιμών και συνδιακύμανσης των μεταβλητών των παρατηρήσεων της κάθε κατηγορίας. Αναλυτική περιγραφή της εξαγωγής τους δίνεται από τους Tabachnick and Fidell (2007).

$$S_j = w_{j0} + w_{j1}*t_1 + w_{j2}*t_2 + ... + w_{jm}*t_m \quad \text{όπου} \quad j=1\ldots g \qquad (3.6)$$

Κριτήριο για την κατάταξη μίας νέας παρατήρησης T (t_1, t_2, …, t_m) σε κάποια από τις υπάρχουσες κατηγορίες αποτελεί η βαθμολογία S_j που συγκεντρώνει με βάση την οικεία εξίσωση κατάταξης. Η κατηγορία με τη μεγαλύτερη βαθμολογία είναι αυτή στην οποία πιθανότερα ανήκει η υπό κατάταξη παρατήρηση.

Η αποτελεσματικότητα των εξισώσεων κατάταξης αξιολογείται εκ των υστέρων με επανακατάταξη των παρατηρήσεων του αρχικού δείγματος, ώστε να διαπιστωθεί κατά πόσον κατετάγησαν στην ομάδα όπου πράγματι ανήκουν. Ωστόσο, δεδομένου ότι η χρησιμοποίηση του ίδιου δείγματος τόσο για την παραγωγή όσο και για την επικύρωση των εξισώσεων κατάταξης ενδέχεται να αυξάνει πλασματικά την αποτελεσματικότητά τους, είναι προτιμότερη η επαναληπτική παραγωγή των εξισώσεων κατάταξης με την εξαίρεση κάθε φορά μίας παρατήρησης από το δείγμα και χρησιμοποίηση στη συνέχεια της παρατήρησης αυτής για την αξιολόγηση της αξιοπιστίας των εξισώσεων (διασταυρωμένη επικύρωση/ cross validation). Εναλλακτικά, είναι δυνατός ο τυχαίος χωρισμός του δείγματος σε δύο μέρη και χρήση του ενός μέρους για την παραγωγή των εξισώσεων και του άλλου για τον έλεγχο τους.

Επιπλέον, μία σαφής ένδειξη της αξιοπιστίας κάθε πρόβλεψης της ΔΑΚ λαμβάνεται με τον υπολογισμό της πιθανότητας να ανήκει η υπό κατάταξη παρατήρηση σε κάθε μία από τις g εναλλακτικές κατηγορίες. Η πιθανότητα αυτή υπολογίζεται ως

συνάρτηση της απόστασης Mahalanobis της υπόψη παρατήρησης από το αντίστοιχο διάνυσμα μέσων τιμών της κάθε κατηγορίας (κεντροειδές). Η απόσταση Mahalanobis αποτελεί μέτρο της εγγύτητας της παρατήρησης προς το κέντρο βάρους της κατηγορίας, το οποίο υπερτερεί σε σχέση με την ευκλείδεια απόσταση καθώς λαμβάνει υπόψη τη διακύμανση της τιμής κάθε μεταβλητής στην εξεταζόμενη κατηγορία και τις μεταξύ τους συσχετίσεις.

Από την εφαρμογή της ΔΑΚ στα διαθέσιμα δεδομένα προκύπτουν οι εξισώσεις κατάταξης κάθε κατηγορίας (εξ. 3.7, 3.8, 3.9) δια των οποίων είναι δυνατή η πρόβλεψη της κατάστασης ενός οχήματος εκτός αρχικού δείγματος εφόσον είναι γνωστά τα χαρακτηριστικά χωρητικότητας, ηλικίας, διανυθέντων χιλιομέτρων και συντήρησής του.

$$S_{(2)} = 2{,}161*cap + 0{,}747*age + 2{,}1E\text{-}06*klm - 0{,}854*maint - 23{,}193 \quad (3.7)$$

$$S_{(3)} = 1{,}940*cap + 0{,}609*age - 1{,}3E\text{-}05*klm + 12{,}700*maint - 31{,}885 \quad (3.8)$$

$$S_{(4)} = 1{,}761*cap + 0{,}583*age - 2{,}9E\text{-}05*klm + 19{,}815*maint - 37{,}155 \quad (3.9)$$

Η αυξημένη επιρροή του παράγοντα της συντήρησης επιβεβαιώνεται και μέσω των εξισώσεων κατάταξης. Π.χ. όχημα με χαρακτηριστικά κοντά στις μέσες τιμές του δείγματος, δηλαδή χωρητικότητα 16 m^3, ηλικία 18 έτη και 350.000 διανυθέντα χιλιόμετρα, θα κατατασσόταν στο επίπεδο κατάστασης 2 αν η συντήρησή του ήταν βασική (επίπεδο συντήρησης 1), ενώ θα κατατασσόταν στο επίπεδο κατάστασης 4 (με οριακή διαφορά από το επίπεδο 3), αν η συντήρησή του αντιστοιχούσε στο επίπεδο συντήρησης 2. Η διαπίστωση αυτή είναι ενδεικτική της σημασίας της συντήρησης για την εξέλιξη της κατάστασης των οχημάτων και επιβεβαιώνει την προσδοκία αύξησης της διαθεσιμότητας ως αποτέλεσμα της καλύτερης συντήρησης (Jardine et al. 2006, Prasertrungruang and Hadikusumo 2009a).

Ακολούθως αξιολογείται η ακρίβεια των προβλέψεων των εξισώσεων κατάταξης με επανακατάταξη των παρατηρήσεων του αρχικού δείγματος (Πιν. 3.6). Από τη διαδικασία επικύρωσης διαπιστώνεται ότι κατετάγησαν ορθά 43 από τις 45 παρατηρήσεις που ανήκουν στο επίπεδο 2 (95,6%), 38 από τις 50 παρατηρήσεις που ανήκουν στο επίπεδο 3 (76,0%) και 27 από τις 31 παρατηρήσεις που ανήκουν στο επίπεδο 4 (87,1%). Επιλέγοντας αντίστοιχο έλεγχο με διασταυρωμένη επικύρωση διαπιστώνεται ότι τα ποσοστά επιτυχίας κάθε επιπέδου δεν διαφοροποιούνται σημαντικά (95,6%, 72% και 83,9% αντίστοιχα). Επιπρόσθετα, ελέγχεται η επίδραση της απορριφθείσας από τον έλεγχο Box-M, υπόθεσης ισότητας

των πινάκων συνδιακύμανσης. Διαπιστώνεται ότι η αναίρεσή της επίσης δεν οδηγεί σε αξιόλογη διαφοροποίηση των ποσοστών επιτυχίας. Συνεπώς, η συνολική επιτυχία της πρόβλεψης προσδιορίζεται περί το 83%, ποσοστό ιδιαιτέρως ικανοποιητικό.

Πιν. 3.6: Επαλήθευση αποτελεσμάτων εξισώσεων κατάταξης με διασταυρωμένη επικύρωση

Επίπεδο Κατάστασης		Πραγματικό	Πρόβλεψη			Σύνολο
			2	3	4	
Αρχικό Δείγμα	Πλήθος	2	43	2	0	45
		3	7	38	5	50
		4	3	1	27	31
	%	*2*	***95,6***	*4,4*	*0,0*	*100,0*
		3	*14,0*	***76,0***	*10,0*	*100,0*
		4	*9,7*	*3,2*	***87,1***	*100,0*
Διασταυρωμένη Επικύρωση	Πλήθος	2	43	2	0	45
		3	9	36	5	50
		4	4	1	26	31
	%	*2*	***95,6***	*4,4*	*0,0*	*100,0*
		3	*18,0*	***72,0***	*10,0*	*100,0*
		4	*12,9*	*3,2*	***83,9***	*100,0*

Τέλος, επιβεβαιώνεται η σκοπιμότητα υπολογισμού των πιθανοτήτων που αντιστοιχούν στην αποστάση Mahalanobis κάθε παρατήρησης από το κεντροειδές κάθε κατηγορίας, καθώς διαπιστώνεται ότι η μέση πιθανότητα που χαρακτηρίζει τις παρατηρήσεις που κατετάγησαν σωστά στο επίπεδο στο οποίο πράγματι ανήκουν, είναι αυξημένη κατά 20-30% σε σχέση με την αντίστοιχη μέση πιθανότητα που αποδίδεται στις παρατηρήσεις που κατετάγησαν εσφαλμένα (Πιν. 3.7).

Πιν. 3.7: Μέση τιμή πιθανότητας κατάταξης με βάση την απόσταση Mahalanobis σε ορθά και εσφαλμένα κατατασσόμενες παρατηρήσεις

Πιθανότητα επιλεγόμενου Επιπέδου Κατάστασης	Επίπεδο Κατάστασης		
	2	3	4
Ορθή Κατάταξη	0,935	0,823	0,891
Εσφαλμένη Κατάταξη	0,741	0,621	0,606

3.3.3 Εφαρμογή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα ανήκουν στο πεδίο της υπολογιστικής νοημοσύνης και μιμούνται τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου με σκοπό την επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων. Τα τελευταία χρόνια εφαρμόζονται με μεγάλη επιτυχία

σε ένα ασυνήθιστα μεγάλο φάσμα τομέων της επιστήμης και της τεχνολογίας με σκοπό την πρόβλεψη, την ταξινόμηση ή τον έλεγχο.

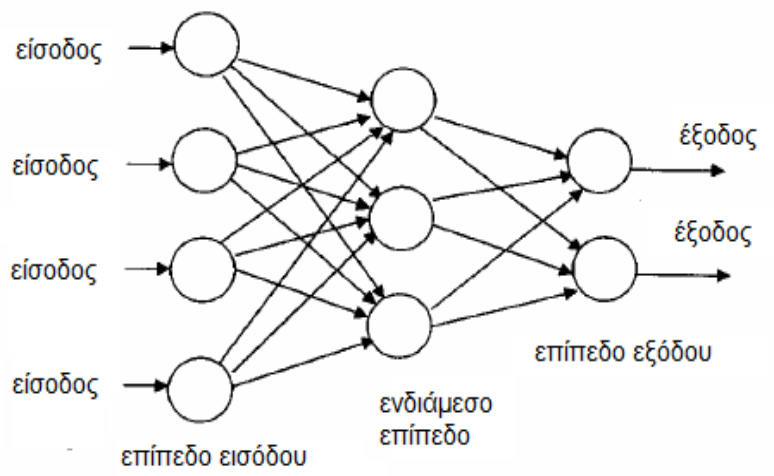
Η θεμελιώδης μονάδα επεξεργασίας πληροφορίας στο νευρωνικό δίκτυο είναι ο νευρώνας. Κάθε νευρώνας δέχεται ένα σύνολο αριθμητικών εισόδων από διαφορετικές πηγές (είτε από άλλους νευρώνες, είτε από το περιβάλλον), επιτελεί έναν υπολογισμό με βάση αυτές τις εισόδους και παράγει μία έξοδο. Η εν λόγω έξοδος είτε κατευθύνεται στο περιβάλλον, είτε λειτουργεί ως είσοδος για άλλους νευρώνες του δικτύου.

Ο νευρώνας αποτελείται από τρία στοιχεία: ένα σύνολο κλάδων διασύνδεσης (συνάψεις), ένα κόμβο άθροισης και μία συνάρτηση ενεργοποίησης. Κάθε κλάδος διασύνδεσης έχει ένα βάρος (συναπτικό βάρος) το οποίο είναι θετικό εάν η σύναψη είναι διεγερτικού τύπου και αρνητικό εάν η σύναψη είναι απαγορευτικού τύπου. Ο κόμβος άθροισης λειτουργεί ως μονάδα γραμμικού συνδυασμού αθροίζοντας τις εισόδους πολλαπλασιασμένες με τα αντίστοιχα συναπτικά βάρη. Το άθροισμα αυτό τροφοδοτείται ως όρισμα στη συνάρτηση ενεργοποίησης, την οποία υλοποιεί εσωτερικά κάθε κόμβος. Η τιμή που λαμβάνει η συνάρτηση για το εν λόγω όρισμα αποτελεί την έξοδο του νευρώνα για τις τρέχουσες εισόδους και βάρη. Η συνάρτηση ενεργοποίησης περιορίζει το επιτρεπόμενο πλάτος του σήματος εξόδου σε κάποια πεπερασμένη τιμή (συνήθως στο κανονικοποιημένο διάστημα [0,1] ή, εναλλακτικά, στο διάστημα [-1,1]) και προσθέτει μη γραμμικότητα στην έξοδο του νευρώνα. Η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ενεργοποίησης είναι η σιγμοειδής συνάρτηση με συνήθεις μορφές την λογαριθμική εφαπτόμενη και την υπερβολική εφαπτομένη.

Ο πλέον διαδεδομένος και εύχρηστος τύπος νευρωνικού δικτύου είναι τα πολυστρωματικά δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης (Multi-layer feed-forward Neural Networks), τα οποία χαρακτηρίζονται από νευρώνες οργανωμένους σε επίπεδα. Τα επίπεδα διακρίνονται στο επίπεδο εισόδου, στα ενδιάμεσα επίπεδα και στο επίπεδο εξόδου. Οι έξοδοι κάθε επιπέδου τροφοδοτούν τους νευρώνες του αμέσως επόμενου επιπέδου (Σχ. 3.4). Το πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης, εφαρμόζεται στο 90% των ερευνών που αφορούν σε πρόβλεψη λειτουργικής κατάστασης (Rafiee et al. 2007).

Εγγενές χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων αποτελεί η ικανότητα εκμάθησης δηλαδή η σταδιακή βελτίωση της ικανότητας του δικτύου να επιλύει κάποιο πρόβλημα. Η εκμάθηση επιτυγχάνεται μέσω της εκπαίδευσης, μίας επαναληπτικής διαδικασίας σταδιακής προσαρμογής των παραμέτρων του δικτύου σε τιμές

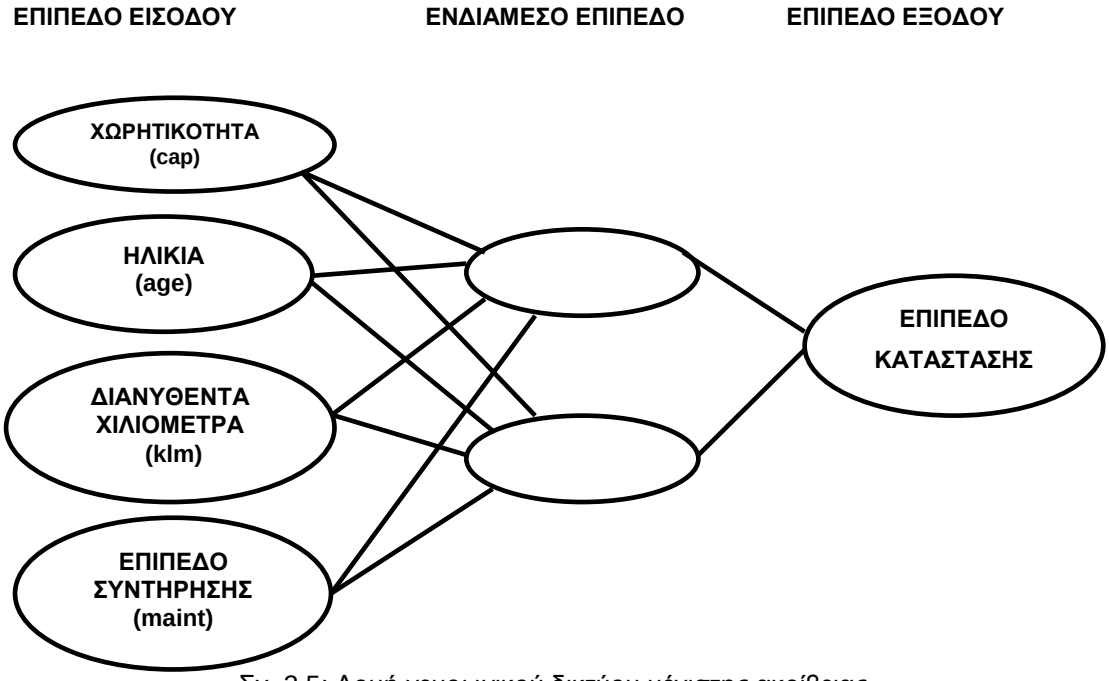
κατάλληλες ώστε το δίκτυο να αποκτήσει ικανότητα γενίκευσης, δηλαδή ικανότητα ορθής εκτίμησης της τιμής της μεταβλητής εξόδου για εισόδους διαφορετικές από αυτές με τις οποίες εκπαιδεύτηκε.



Σχ. 3.4: Πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης με ένα ενδιάμεσο επίπεδο

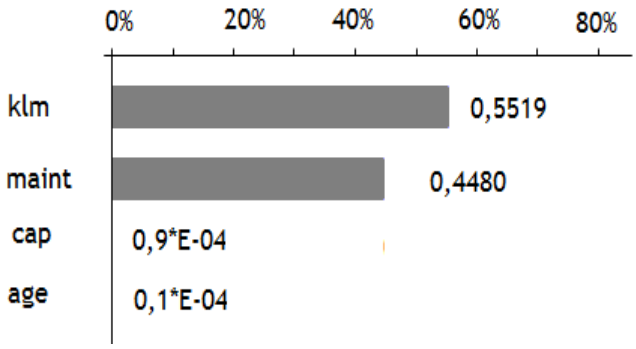
Οι δύο βασικοί τρόποι εκπαίδευσης είναι με επίβλεψη (supervised) και χωρίς επίβλεψη (non-supervised). Συνηθέστερα εφαρμοζόμενη είναι η εκπαίδευση με επίβλεψη, η οποία βασίζεται σε δεδομένα (σύνολο εκπαίδευσης) για τα οποία είναι γνωστές τόσο οι είσοδοι όσο και η επιθυμητή έξοδος. Ο πλέον διαδεδομένος αλγόριθμος για την πραγματοποίηση εκπαίδευσης με επίβλεψη είναι ο αλγόριθμος όπισθεν διάδοσης σφάλματος (error backpropagation algorithm), ο οποίος προσαρμόζει τα βάρη των συνάψεων με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ των επιθυμητών και πραγματικών αποκρίσεων του δικτύου.

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας χρησιμοποιήθηκε ειδική εφαρμογή ανάπτυξης νευρωνικών δικτύων. Τα χαρακτηριστικά ηλικίας, χωρητικότητας, διανυθέντων χιλιομέτρων και επιπέδου συντήρησης αποτέλεσαν τις μεταβλητές εισόδου, ενώ το επίπεδο κατάστασης την έξοδο. Ο αριθμός των κόμβων του ενδιάμεσου επιπέδου προσδιορίστηκε σε δύο, κατόπιν δοκιμών ελέγχου της ακρίβειας των προβλέψεων του δικτύου για διαφορετικό αριθμό κόμβων. Η δομή του δικτύου απεικονίζεται σχηματικά στο Σχ. 3.5.



Σχ. 3.5: Δομή νευρωνικού δικτύου μέγιστης ακρίβειας

Το αρχικό δείγμα των 126 πολυμεταβλητών παρατηρήσεων χωρίστηκε κατά τυχαίο τρόπο σε δύο υποσύνολα, 88 και 38 παρατηρήσεων. Το πρώτο χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση – έλεγχο του δικτύου (training-test set) και το δεύτερο για την επικύρωση της ακρίβειάς του (validation set) κατά τη συνήθη πρακτική της βιβλιογραφίας (Moselhi and Siqueira 1998). Από τη διαδικασία εκπαίδευσης προσδιορίστηκε επίσης η σχετική συμβολή κάθε μεταβλητής εισόδου στη διαμόρφωση της τιμής εξόδου (Σχ. 3.6). Τα διανυθέντα χιλιόμετρα και το επίπεδο συντήρησης διακρίθηκαν ως οι ουσιαστικά βαρύνοντες παράγοντες, καθώς η επίδραση της χωρητικότητας και της ηλικίας στο επίπεδο κατάστασης προέκυψε πρακτικά μηδενική. Η παραπάνω αξιολόγηση είναι σε σχετική συμφωνία με την αντίστοιχη ιεράρχηση της Διαχωριστικής Ανάλυσης καθώς αμφότερες οι μέθοδοι αναγνωρίζουν τη διαφορά επιρροής μεταξύ επιπέδου συντήρησης-διανυθέντων χιλιομέτρων και χωρητικότητας – ηλικίας αλλά διαφοροποιούνται ως προς την ιεράρχηση των παραγόντων ανά ζεύγος. Σε κάθε περίπτωση, η αποτίμηση της σχετικής συμβολής των μεταβλητών στο νευρωνικό δίκτυο αποτελεί σημείο έντονης κριτικής (Olden and Jackson 2002, Kaur et al. 2005) καθώς η μέθοδος υπολογισμού δεν είναι μοναδική και οι διάφορες σχετικές μεθοδολογίες μπορεί να οδηγούν σε σημαντικές διαφοροποιήσεις αποτελεσμάτων (Olden et al. 2004).



Σχ. 3.6: Συμβολή μεταβλητών εισόδου στη διαμόρφωση της εξόδου κατά την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου

Από τη διαδικασία της επικύρωσης, δηλαδή της πρόβλεψης του (ήδη γνωστού) επιπέδου κατάστασης των 38 παρατηρήσεων με βάση το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο, προέκυψε ότι η ακρίβειά του προσεγγίζει το 95% καθώς σημειώθηκαν μόλις δύο λανθασμένες προβλέψεις (Πιν. 3.8). Πιο συγκεκριμένα, για τα οχήματα του επίπεδου 2 προκύπτει ακρίβεια πρόβλεψης 92,3%, για τα οχήματα του επιπέδου 3, ακρίβεια 93,8%, ενώ για τα οχήματα επιπέδου 4 η ακρίβεια πρόβλεψης φτάνει στο 100%.

Πιν. 3.8: Αποτελέσματα διαδικασίας επικύρωσης ακρίβειας Νευρωνικού Δικτύου

Επίπεδο Κατάστασης	Πραγματικό	Πρόβλεψη			Σύνολο
		2	3	4	
Πλήθος	2	13	1	0	14
	3	1	15	0	16
	4	0	0	9	9
%	*2*	***92,3***	*7,7*	*0,0*	*100,0*
	3	*6,2*	***93,8***	*0,0*	*100,0*
	4	*0,0*	*0,0*	***100,0***	*100,0*

3.4 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα διάγνωσης της λειτουργικής κατάστασης των χωματουργικών οχημάτων μέσω ευχερώς προσδιοριζόμενων στοιχείων μεγέθους, χρήσης και συντήρησης. Συγκεκριμένα, η έρευνα βασίστηκε στην εφαρμογή της Διαχωριστικής Ανάλυσης και των Νευρωνικών Δικτύων στοιχείων σε στοιχεία ηλικίας, χωρητικότητας, διανυθέντων χιλιομέτρων και επιπέδου

συντήρησης από 126 χωματουργικά οχήματα. Η ακρίβεια διάγνωσης προέκυψε για αμφότερες τις μεθόδους (σύμφωνα με την κατά περίπτωση διαδικασία επικύρωσης), σε πολύ υψηλό επίπεδο, περί το 83% για τη Διαχωριστική Ανάλυση και περί το 95% για το νευρωνικό δίκτυο. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι το επίπεδο συντήρησης και τα διανυθέντα χιλιόμετρα επηρεάζουν καθοριστικά την εξέλιξη της κατάστασης του οχήματος, ενώ στον αντίποδα, τα χαρακτηριστικά ηλικίας και χωρητικότητας έχουν πολύ περιορισμένη επιρροή στη διαμόρφωση της κατάστασης του οχήματος.

4. ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΣΗ ΕΦΕΔΡΙΚΟΥ ΣΤΟΛΟΥ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

4.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία διαστασιολόγησης που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2 βασίζεται στην παραδοχή ότι τα οχήματα βρίσκονται συνεχώς σε κατάσταση λειτουργίας. Εν τούτοις, η εκδήλωση βλαβών στα οχήματα αποτελεί συχνό φαινόμενο, με την επακόλουθη μείωση της διαθεσιμότητάς τους να αποτελεί βασική αιτία αύξησης της διάρκειας και του κόστους της εργασίας. Για τον περιορισμό των συνεπειών αυτών, η βιβλιογραφία προτείνει τη χρησιμοποίηση πρόσθετων οχημάτων ως εφεδρικών χωρίς ωστόσο να παρέχει οικονομικά εμπεριστατωμένη μέθοδο για τον προσδιορισμό του αριθμού τους. Σε αυτό το πλαίσιο, στο παρόν κεφάλαιο αναπτύσσεται αλγόριθμος βέλτιστης διαστασιολόγησης εφεδρικού στόλου οχημάτων με βάση τα χαρακτηριστικά κόστους και διαθεσιμότητας του βασικού στόλου.

4.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η χρησιμοποίηση εφεδρικών πόρων για την αντιμετώπιση αστοχιών αποτελεί άμεσο και αποτελεσματικό τρόπο κάλυψης των απαιτήσεων του αρχικού σχεδιασμού.

Ειδικά για την περίπτωση των χωματουργικών οχημάτων, η τοποθέτηση επιπλέον μονάδων ως εφεδρικών αποτελεί ευρέως συνιστώμενη πρακτική. Οι Tsimberdonis and Murphree (1994) προτείνουν τη χρήση παλαιών οχημάτων, ενώ οι Hartman (1987) και Nunnally (2007) υποστηρίζουν ότι σε κάθε πέντε ή έξι οχήματα πρέπει να αντιστοιχεί και ένα εφεδρικό. Η αναλογία αυτή αυξάνεται σε ένα προς τέσσερα με βάση τα οριζόμενα στα εγχειρίδια του Αμερικανικού στρατού (Department of the Army, 2000).

Πιο εύστοχοι κανόνες οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο τον αριθμό των οχημάτων αλλά και την εκτιμώμενη διαθεσιμότητά τους, απαντώνται στο κατασκευαστικό εγχειρίδιο Terex (Terex 1981) και στο εγχειρίδιο SME Mining Enginneering (SME Mining Engineering Handbook 1992). Στην πρώτη περίπτωση, προτείνεται ο πολλαπλασιασμός του αριθμού των οχημάτων n με τη μέση διαθεσιμότητά τους $\overline{\Delta}$ ώστε να προκύψει ο πραγματικά διαθέσιμος αριθμός οχημάτων και εξ αυτού να υπολογιστεί ο αριθμός των πρόσθετων απαιτούμενων μονάδων, z (εξ. 4.1). Στη δεύτερη περίπτωση, προτείνεται η διαίρεση του αριθμού

των οχημάτων n με τη μέση διαθεσιμότητά τους $\overline{\Delta}$ ώστε να προκύψει ο συνολικά απαιτούμενος αριθμός οχημάτων και εξ αυτού να προσδιοριστεί ο αριθμός z (εξ. 4.2).

$$z = n - n^* \overline{\Delta} \tag{4.1}$$

$$z = \frac{n}{\overline{\Delta}} - n \tag{4.2}$$

Ωστόσο, οι παραπάνω κανόνες δε συνοδεύονται από την απαραίτητη οικονομική τεκμηρίωση, όπως επισημαίνει και ο Czaplicki (1992), ο οποίος επιχειρεί τη διαστασιολόγηση εφεδρικού στόλου οχημάτων με βάση στοιχεία κόστους από λατομικές εργασίες και υιοθετώντας το πιθανοτικό μοντέλο κατά Marjanowitch (1961).

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας θα αναπτυχθεί αλγόριθμος προσδιορισμού του οικονομικά βέλτιστου πλήθους εφεδρικών οχημάτων για βασικό στόλο n οχημάτων γνωστής διαθεσιμότητας, με βάση στοιχεία κόστους από ελληνικές εταιρείες έργων οδοποιίας.

4.3 Προσδιορισμός βέλτιστου πλήθους εφεδρικών οχημάτων

4.3.1 Πιθανοτικό μοντέλο πρόβλεψης αριθμού βλαβών

Σε ένα στόλο οχημάτων, ο ανά πάσα στιγμή διαθέσιμος αριθμός οχημάτων εξαρτάται από την πιθανότητα ταυτόχρονης απόσυρσης οχημάτων λόγω βλάβης. Συνεπώς, σε πρώτη φάση είναι απαραίτητη η εκτίμηση της διαθεσιμότητας κάθε οχήματος, δηλαδή του ποσοστού του χρόνου κατά τον οποίο δεν θα βρίσκεται σε κατάσταση βλάβης ή ισοδύναμα της πιθανότητας μη εκδήλωσης βλάβης στο όχημα. Η σχετική εκτίμηση είναι δυνατή με επεξεργασία των ιστορικών δεδομένων λειτουργίας και συντήρησης όπως προκύπτει και από τις εργασίες των Bedewy et al. (1989), Kumar et al. (1989), Elazouni and Basha (1996), Edwards and Yisa (2001), Edwards and Holt (2001), Hall and Daneshmend (2003), Oloke et al. (2003), Marquez and Herguedas (2004), Nepal and Park (2004), Kumar et al. (2007).

Σε στόλο n οχημάτων, η ταυτόχρονη εκδήλωση x βλαβών, x=0…n, αποτελεί ενδεχόμενο που μπορεί να πραγματοποιηθεί με $\binom{n}{x}$ εναλλακτικούς συνδυασμούς (εξ. 4.3) οι οποίοι αποτελούνται από n-x λειτουργούντα και x μη λειτουργούντα οχήματα. Συνεπώς, η πιθανότητα επέλευσης x ταυτόχρονων βλαβών P(x) ισούται με το άθροισμα των πιθανοτήτων των αντίστοιχων $\binom{n}{x}$ ενδεχομένων E_{Xj}, $P(E_{Xj})$, όπου

$j=1...\binom{n}{x}$ (εξ. 4.4). Η πιθανότητα πραγματοποίησης κάθε ενδεχομένου E_{xj} είναι συνάρτηση της διαθεσιμότητας των οχημάτων σύμφωνα με την εξ. 4.5.

$$\binom{n}{x} = \frac{n!}{x!*(n-x)!} \qquad x = 0\ldots n \tag{4.3}$$

$$P(x) = \sum_{j=1}^{\binom{n}{x}} P(E_{xj}) \tag{4.4}$$

$$P(E_{xj}) = \underbrace{(1-\Delta_1)*(1-\Delta_2)*\ldots*(1-\Delta_k)}_{x} * \underbrace{\Delta_{x+1}*\Delta_{x+2}*\ldots*\Delta_n}_{n-x} \tag{4.5}$$

Αν για παράδειγμα ο στόλος περιλαμβάνει 4 οχήματα οπότε n=4 και x=0…4, τα δημιουργούμενα ενδεχόμενα για την εκδήλωση μίας βλάβης είναι $\binom{4}{1}$= 4, για την εκδήλωση δύο βλαβών είναι $\binom{4}{2}$= 6, για την εκδήλωση τριών βλαβών είναι $\binom{4}{3}$= 4 και για την εκδήλωση τεσσάρων βλαβών είναι $\binom{4}{4}$= 1. Συνεπώς, συνυπολογίζοντας και το μοναδικό ενδεχόμενο καμίας βλάβης, συνολικά προκύπτουν 4+6+4+1+1=16 διαφορετικά ενδεχόμενα, όπως παρουσιάζονται στον Πιν. 4.1.

Πιν. 4.1: Δυνατές περιπτώσεις και ενδεχόμενα εκδήλωσης βλαβών σε 4 οχήματα

Περίπτωση	Ενδεχόμενα περίπτωσης	Οχήματα σε βλάβη	Οχήματα σε λειτουργία
Βλάβη σε 0 οχήματα	E_0	---	a b c d
Βλάβη σε 1 Όχημα	E_{11}	a	b c d
	E_{12}	b	a c d
	E_{13}	c	a b d
	E_{14}	d	a b c
Βλάβη σε 2 Οχήματα	E_{21}	a b	c d
	E_{22}	a c	b d
	E_{23}	a d	b c
	E_{24}	b c	a d
	E_{25}	b d	a c
	E_{26}	c d	a b
Βλάβη σε 3 οχήματα	E_{31}	a b c	d
	E_{32}	a b d	c
	E_{33}	b c d	a
	E_{34}	a c d	b
Βλάβη σε 4 Οχήματα	E_4	a b c d	---

Η πιθανότητα επέλευσης κάθε ενδεχομένου είναι διαφορετική και εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των οχημάτων που το απαρτίζουν σύμφωνα με την εξ. 4.5.

Υποθέτοντας τα οχήματα του Πιν. 4.2, η πιθανότητα εκδήλωσης βλάβης στο όχημα a και κανονικής λειτουργίας των υπόλοιπων τριών οχημάτων (b, c, d) προκύπτει ίση με $P(E_{11})$=(1-0,85)*0,90*0,70*0,75=0,0709.

Καθ' όμοιο τρόπο προκύπτουν $P(E_{12})$=0,0446, $P(E_{13})$=0,1721, $P(E_{14})$=0,1339.

Η συνολική πιθανότητα της περίπτωσης εκδήλωσης μίας βλάβης P(1) προκύπτει από το άθροισμα $\sum_{i=1}^{4} P(E_{1i})$ που εν προκειμένω είναι: P(1)=0,0709 + 0,0446+ 0,1721 + 0,1339 = 0,4215

Πιν. 4.2: Δεδομένα παραδείγματος

Όχημα	a	b	c	d
Δ	0,85	0,90	0,70	0,75

Αυτό σημαίνει ότι στη διάρκεια 100 ωρών εργασίας για τις οποίες ήταν προγραμματισμένη λειτουργία των τεσσάρων οχημάτων του Πιν. 4.2, στις 42 εξ αυτών λειτουργούν μόνο τα τρία.

Ομοίως προκύπτουν οι πιθανότητες εκδήλωσης καμίας, δύο, τριών και τεσσάρων ταυτόχρονων βλαβών αντίστοιχα: P(0)=0,4016, P(2)=0,1533, P(3)=0,0225 P(4)=0,0011.

Όπως κατέστη σαφές από τα παραπάνω, ο υπολογισμός της πιθανότητας εκδήλωσης ενός συγκεκριμένου αριθμού βλαβών προϋποθέτει τον προσδιορισμό των $\binom{n}{x}$ σχετικών συνδυασμών οχημάτων. Ωστόσο, για μεγαλύτερες τιμές του n (π.χ. n>6), το πλήθος αυτό καθίσταται μη διαχειρίσιμο. Προκειμένου να υπερπηδηθεί η ανάγκη προσδιορισμού των $\binom{n}{x}$ διαφορετικών ενδεχομένων, είναι απαραίτητη η απλοποιητική θεώρηση μίας μέσης κοινής τιμής διαθεσιμότητας $\overline{\Delta}$ για όλα τα οχήματα. Με τη θεώρηση αυτή προκύπτουν $\binom{n}{x}$ ταυτόσημα και άρα ισοπίθανα ενδεχόμενα, με πιθανότητα εμφάνισης η οποία υπολογίζεται από την εξ. 4.6.

$$P(E_x) = \overline{\Delta}^{n-x} * (1-\overline{\Delta})^x \qquad (4.6)$$

Συνεπώς, η τελική πιθανότητα εμφάνισης x βλαβών P(x) προκύπτει ως άθροισμα των ίσων πιθανοτήτων πραγματοποίησης των $\binom{n}{x}$ ενδεχομένων και άρα η εξ. 4.6 μετασχηματίζεται στην εξ. 4.7.

$$P(x) = \sum_{j=1}^{\binom{n}{x}} P(E_{xj}) = \binom{n}{x} * P(E_x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} * \overline{\Delta}^{n-x} * (1-\overline{\Delta})^x \qquad (4.7)$$

Επιπλέον, με δεδομένο ότι η θεώρηση μέσων τιμών χαρακτηρίζει γενικά την εφαρμογή της λειτουργικής ανάλυσης στις χωματουργικές εργασίες, δεν κρίνεται σκόπιμη η αναζήτηση υπολογιστικού εργαλείου για τον ακριβή προσδιορισμό των ενδεχομένων που προκύπτουν.

Επιστρέφοντας στο παράδειγμα των 4 οχημάτων, έστω ότι θεωρείται τιμή διαθεσιμότητας κοινή για τα τέσσερα οχήματα και ίση με τη μέση προκύπτουσα $\overline{\Delta} = \frac{0,85+0,90+0,70+0,75}{4} = 0,80$

Από την εξ. 4.7 προκύπτει $P(0) = 1 * 0,8^4 = 0,4096$

$P(1) = 4 * 0,8^3 * (1-0,8) = 0,4096$

$P(2) = 6 * 0,8^2 * (1-0,8)^2 = 0,1536$

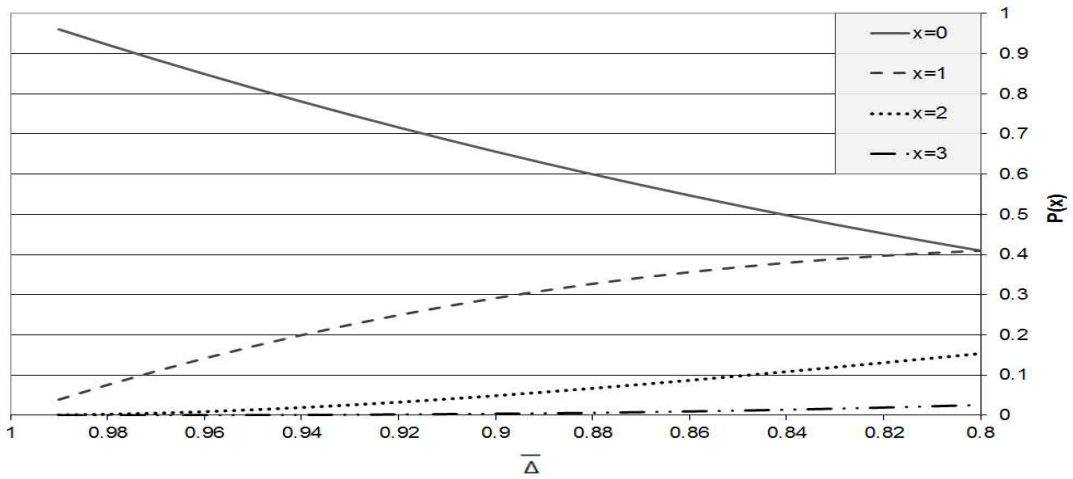
$P(3) = 4 * 0,8 * (1-0,8)^3 = 0,0256$

$P(4) = (1-0,8)^4 * 1 = 0,0016$

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ακριβή και την προσεγγιστική θεώρηση για την τιμή της διαθεσιμότητας των οχημάτων, διαπιστώνεται ότι για τις περιπτώσεις καμίας, μίας και δύο βλαβών που αντιπροσωπεύουν το 97,6% των περιπτώσεων βλάβης (0,4016+0,4215+0,1533 =0,9764), η μέγιστη απόκλιση που παρατηρείται στις τιμές των πιθανοτήτων είναι μικρότερη του 3% (Πιν. 4.3). Συνεπώς, η απλοποιητική θεώρηση της μέσης τιμής της διαθεσιμότητας για τα οχήματα του στόλου είναι αποδεκτή. Εφαρμόζοντας τη σχέση 4.7 για διάφορες τιμές της μέσης διαθεσιμότητας $\overline{\Delta}$ του στόλου 4 οχημάτων, καθίσταται εμφανής η διαφοροποίηση της αντίστοιχης πιθανότητας εκδήλωσης συγκεκριμένου αριθμού βλαβών (Σχ. 4.1).

Πιν. 4.3: Σύγκριση αποτελεσμάτων για ακριβή και προσεγγιστική θεώρηση της τιμής της διαθεσιμότητας σε στόλο 4 οχημάτων

	P(0)	P(1)	P(2)
Δ	0,4016	0,4215	0,1533
$\overline{\Delta}$	0,4096	0,4096	0,1536
σφάλμα	<2,0 **%**	<3,0 **%**	<0,2 **%**



Σχ. 4.1: Πιθανότητα εκδήλωσης ταυτόχρονων βλαβών σε στόλο 4 οχημάτων για διαφορετική μέση διαθεσιμότητα οχημάτων

4.3.2 Ανάλυση κόστους οχημάτων σε λειτουργία, βλάβη, εφεδρεία

Ο προσδιορισμός του οικονομικά βέλτιστου αριθμού εφεδρικών οχημάτων καθιστά απαραίτητη τη διευκρίνιση των κατηγοριών κόστους που βαρύνουν τις πιθανές καταστάσεις του οχήματος, δηλαδή τη λειτουργία, τη βλάβη και την εφεδρεία.

Το συνολικό κόστος λειτουργίας του οχήματος μπορεί να διακριθεί σε κόστος μίσθωσης και συντήρησης, c_b, κόστος καυσίμων και λιπαντικών, c_f, και κόστος χειριστή, c_w. Τα οχήματα σε κατάσταση βλάβης απαλλάσσονται από το κόστος καυσίμων και λιπαντικών, ενώ τα εφεδρικά, εφόσον παραμένουν ανενεργά, απαλλάσσονται επιπλέον και από το κόστος χειριστή. Με βάση στοιχεία από ελληνικές εταιρείες κατασκευής μεγάλων έργων οδοποιίας που επαληθεύονται από τις τιμές του ΑΤΕΟ – 3^{ο} Τρίμηνο 2011, για τις παραπάνω κατηγορίες κόστους μπορεί να υποτεθεί η κατανομή του Πιν. 4.4.

Είναι σαφές ότι η τοποθέτηση ενός εφεδρικού οχήματος επιβαρύνει το συνολικό κόστος μόνο με το 15% του κόστους ενός οχήματος σε λειτουργία, ενόσω

διασφαλίζει αφενός την απασχόληση του ούτως ή άλλως αμειβόμενου χειριστή και αφετέρου τη διατήρηση της ωριαίας παραγωγής του εργοταξίου στο προβλεπόμενο επίπεδο. Συνεπώς προκύπτει ότι η τοποθέτηση εφεδρικών οχημάτων αποτελεί επιλογή που με μικρή συνολική επιβάρυνση αποσοβεί σημαντική αστοχία του συνολικού χρονικού και οικονομικού σχεδιασμού.

Πιν. 4.4: Κόστος οχημάτων σε κατάσταση λειτουργίας, βλάβης, εφεδρείας

Κατηγορία Κόστους		Ποσοστό επί του συνόλου	Κατάσταση Οχήματος		
			Λειτουργία	Βλάβη	Εφεδρεία
Μίσθωμα	c_b	8%	✓	✓	✓
Συντήρηση		7%	✓	✓	✓
Χειριστής	c_w	25%	✓	✓	
Καύσιμα - Λιπαντικά	c_f	60%	✓		
			100%	40%	15%

4.3.3 Βέλτιστη διαστασιολόγηση στόλου εφεδρικών οχημάτων

Έστω στόλος n οχημάτων, δεδομένης διαθεσιμότητας $\overline{\Delta}$, για την υποστήριξη του οποίου τοποθετούνται z εφεδρικά οχήματα. Αν x το τυχαίο πλήθος των ταυτόχρονων βλαβών, διακρίνονται οι ακόλουθες περιπτώσεις:

- **x ≤ z** οπότε ανεξαρτήτως πλήθους βλαβών επιτυγχάνεται η λειτουργία n οχημάτων και το συνολικό ωριαίο κόστος του στόλου $c_{n,z}$ προκύπτει από n οχήματα σε λειτουργία, z οχήματα σε εφεδρεία και k φορτωτές σε λειτουργία: $c_{n,z} = (n+z)*c_b+n*c_w+n*c_f+ k*c_\varphi$, όπου c_φ το συνολικό ωριαίο κόστος φορτωτή.

Η ωριαία παραγωγή ισούται με $Q_{συνδ} = \min \{n*Q_{ox} , k*Q_\varphi\}$ αναλόγως της ομάδας που λειτουργεί ως κρίσιμη. Επομένως η τιμή μονάδας ισούται με

$$c_{u,n,z}=\frac{(n+z)*c_b+n*c_w+n*c_f+k*c_\varphi}{\min\left\{n*Q_{ox} , k*Q_\varphi\right\}} \tag{4.8}$$

Εφόσον τα εφεδρικά οχήματα είναι z, η πιθανότητα Π(n) να βρίσκονται n οχήματα σε κατάσταση λειτουργίας προκύπτει ίση με $\Pi(n)=\sum_{x=0}^{z}P(x)$. (4.9)

- **x>z** οπότε το πλήθος οχημάτων σε λειτουργία είναι n+z-x<n και το συνολικό ωριαίο κόστος του στόλου $c_{n+z-x,z}$ προκύπτει από n+z-x οχήματα σε λειτουργία, z οχήματα σε εφεδρεία και k φορτωτές σε λειτουργία:

$c_{n-x+z,z}=(n+z)*c_b + n*c_w + (n-x+z)*c_f + k*c_{\varphi}$.

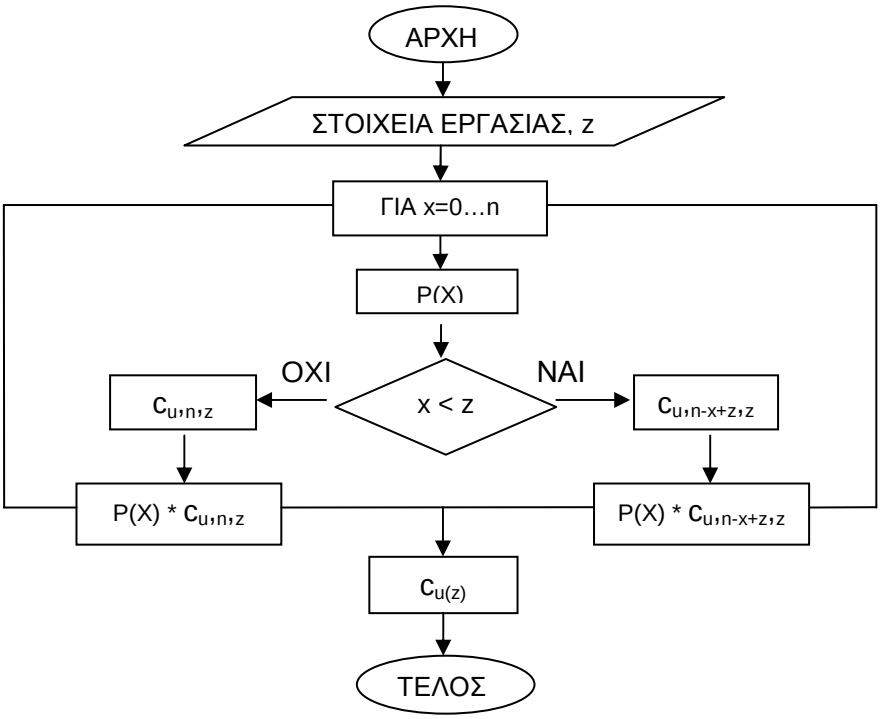
Η ωριαία παραγωγή ισούται με $Q_{συνδ}= (n-x+z)*Q_{ox}$, εφόσον η ομάδα των οχημάτων εύλογα αναμένεται να έχει καταστεί κρίσιμη. Επομένως, η τιμή μονάδας ισούται με $c_{u,n+z-x,z}=\frac{(n+z)*c_b+n*c_w+(n-x+z)*c_f+k*c_{\varphi}}{(n-x+z)*Q_{ox}}$ (4.10)

Με δεδομένη τη χρησιμοποίηση και των z εφεδρικών οχημάτων αφού x>z, ο στόλος αναμένεται να λειτουργεί με n-x +z <n οχήματα, με μεταβαλλόμενη κατά περίπτωση πιθανότητα Π(n-x+z) = P(x), x= z+1…n.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι για βασικό στόλο n οχημάτων ο οποίος υποστηρίζεται από z εφεδρικά οχήματα, η πιθανοτικά σταθμισμένη τιμή μονάδας της εργασίας $c_{u(z)}$ διαμορφώνεται σύμφωνα με την εξ. 4.11.

$$c_{u(z)} = \sum_{x=0}^{z} P(x)*c_{u,n,z} + \sum_{x=z+1}^{n} [P(x)*c_{u,n-x+z,z}] \quad (4.11)$$

Ο σχετικός αλγόριθμος υπολογισμού της απεικονίζεται στο Σχ. 4.2. Με επαναληπτική εφαρμογή του αλγορίθμου για διαφορετική τιμή του z είναι δυνατός ο προσδιορισμός του βέλτιστου πλήθους εφεδρικών οχημάτων, δηλαδή εκείνου το οποίο αντιστοιχεί στην ελάχιστη τιμή μονάδας της εργασίας.



Σχ. 4.2: Αλγόριθμος προσδιορισμού τιμής μονάδας εργασίας για z εφεδρικά οχήματα

4.3.4 Αριθμητική διερεύνηση – Ανάλυση Ευαισθησίας

Έστω ότι σε εργασία μετακίνησης υλικού έχει τοποθετηθεί στόλος μηχανημάτων αποτελούμενος από 4 φορτωτές και 18 οχήματα μέσης διαθεσιμότητας $\overline{\Delta}$=0,9 και λοιπά χαρακτηριστικά που εμφανίζονται στον Πιν. 4.5.

Πιν. 4.5: Δεδομένα Αριθμητικής Διερεύνησης

Όχημα				Φορτωτής	
$Q_{o\chi}$ (m^3/h)	c_b(€/h)	c_f (€/h)	c_w(€/h)	Q_φ (m^3/h)	c_φ(€/h)
60	7,5	30	12,5	270	60

Από την εφαρμογή της εξ. 4.7 για n=18 και $\overline{\Delta} = 0,9$ προκύπτει ότι οι πλέον πιθανές περιπτώσεις σχετίζονται με την εμφάνιση καμίας έως και τριών ταυτόχρονων βλαβών (x=0…3), εφόσον συγκεντρώνουν συνολική πιθανότητα περί το 90% (Πιν. 4.6). Επίσης διαπιστώνεται ότι η εκδήλωση περισσότερων από έξι βλαβών (x>6) αντιστοιχεί σε αμελητέα πιθανότητα και ως εκ τούτου κρίνεται εύλογος ο περιορισμός της διερεύνησης για x ϵ [0,6].

Πιν. 4.6: Πιθανότητα εμφάνισης x βλαβών σε στόλο 18 οχημάτων με μέση διαθεσιμότητα $\overline{\Delta}$=0,9

x	P(x)
0	0,1501
1	0,3002
2	0,2835
3	0,1680
4	0,0700
5	0,0218
6	0,0052

<u>Διερεύνηση 1η , z=0</u>

Για x=0 ισχύει Π(18)=P(0)=0,1501 (εξ. 4.8) και από την εξ. 4.9 προκύπτει:

$$c_{u,18,0}=\frac{(18+0)*\ 7,5+18*\ 12,5+18*\ 30+4*60}{1080}=1,056\ €\ /\ m^3$$

Για x≠0, εφόσον δεν υπάρχουν εφεδρικά οχήματα (z=0), ο στόλος θα λειτουργεί με n-x οχήματα και ως εκ τούτου θα παρουσιάζει μειωμένη παραγωγή και αυξημένη τιμή μονάδας που προσδιορίζεται με βάση την εξ. 4.10. Τα σχετικά αποτελέσματα κατά περίπτωση πλήθους βλαβών εμφανίζονται στον Πιν. 4.7.

Πιν. 4.7: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=0

x	n+z-x	$c_{u,18-x,0}$
1	17	1,088
2	16	1,125
3	15	1,167
4	14	1,214
5	13	1,269
6	12	1,333

Η πιθανοτικά σταθμισμένη τελική τιμή μονάδας που χαρακτηρίζει την περίπτωση για z=0 προκύπτει από την εφαρμογή της σχέσης 4.11:

$$c_{u(0)} = P(0)*c_{u,18,0} + \sum_{x=1}^{18}[P(x)*c_{u,18-x,0}]$$

$$= 0,1501*1,056 + 0,3002*1,088 + 0,2835*1,125 + 0,1680*1,167 + 0,0700*1,214 + 0,0218*1,269 + 0,0052*1,333 = \mathbf{1,121\ €\ /\ m^3}$$

<u>Διερεύνηση 2η , z=1</u>

Στην περίπτωση τοποθέτησης ενός εφεδρικού οχήματος (z=1), η πιθανότητα λειτουργίας 18 οχημάτων ισούται με την πιθανότητα εκδήλωσης 0 ή 1 βλάβης: Π(18)= P(0)+P(1)= 0,1501+0,3002 =0,4503.

Όσον αφορά στην τιμή μονάδας, από την εξ. 4.8 προκύπτει: $c_{u,18,1} = \frac{(18+1)*\ 7,5+18*\ 12,5+18*\ 30+4*60}{1080} = 1,063\ €\ /\ m^3$.

Για x≥2, οπότε ο στόλος λειτουργεί με λιγότερα από 18 οχήματα, προκύπτουν οι τιμές μονάδας του Πιν. 4.8.

Πιν. 4.8: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=1

x	n+z-x	$c_{u,19-x,1}$
2	17	1,096
3	16	1,133
4	15	1,175
5	14	1,223
6	13	1,279

Η τελική πιθανοτικά σταθμισμένη τιμή μονάδας που χαρακτηρίζει την περίπτωση για z=1 προκύπτει από την εξ. 4.11:

$$c_{u(1)} = \sum_{x=0}^{1} P(x)*c_{u,18,1} + \sum_{x=2}^{18}[P(x)*c_{u,19-x,1}]$$

=0,4503*1,063 + 0,2835*1,096 + 0,1680*1,133 + 0,0700*1,175 +0,0218*1,223 +0,0052*1,279 = **1,096 € / m^3**

Από τη σύγκριση $c_{u(0)}$ και $c_{u(1)}$ διαπιστώνεται ότι $c_{u(1)} < c_{u(0)}$ οπότε η τοποθέτηση ενός τουλάχιστον εφεδρικού οχήματος είναι σκόπιμη.

Διερεύνηση 3^{η} , z=2

Στην περίπτωση τοποθέτησης δύο εφεδρικών οχημάτων (z=2), η πιθανότητα λειτουργίας 18 οχημάτων ισούται με την πιθανότητα εκδήλωσης 0, 1 ή 2 βλαβών, οπότε από τη σχέση 4.9 προκύπτει:

Π(18)=P(0)+P(1)+P(2)= 0,1501+0,3002+0,2835= 0,7338.

Όσον αφορά στην τιμή μονάδας, από τη σχέση 4.8 προκύπτει:

$$c_{u,18,2}=\frac{(18+2)*\ 7,5+18*\ 12,5+18*\ 30+4*60}{1080}=1,069\ €\ /\ m^3$$

Για x≥3, οπότε ο στόλος λειτουργεί με λιγότερα από 18 οχήματα, προκύπτουν κατά περίπτωση οι τιμές του Πιν. 4.9.

Πιν. 4.9: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=2

x	n+z-x	$c_{u,20-x,2}$
3	17	1,103
4	16	1,141
5	15	1,183
6	14	1,232

Η τελική πιθανοτικά σταθμισμένη τιμή μονάδας που χαρακτηρίζει την περίπτωση για z=2 προκύπτει από την εφαρμογή της σχέσης 4.11:

$$c_{u(2)}=\sum_{x=0}^{2}P(x)*c_{u,18,2}+\sum_{x=3}^{18}[P(x)*c_{u,20-x,2}]$$

=0,7338*1,069 + 0,1680*1,103 + 0,0700*1,141 + 0,0218*1,183 +0,0052*1,232 = **1,084 € / m^3**

Από τη σύγκριση $c_{u(1)}$ και $c_{u(2)}$ διαπιστώνεται ότι $c_{u(2)} < c_{u(1)}$ και συνεπώς προκύπτει ότι η τοποθέτηση δύο τουλάχιστον εφεδρικών οχημάτων είναι σκόπιμη.

Διερεύνηση $4^{η}$, z=3

Στην περίπτωση τοποθέτησης τριών εφεδρικών οχημάτων (z=3), η πιθανότητα λειτουργίας 18 οχημάτων ισούται με την πιθανότητα εκδήλωσης 0, 1, 2 ή 3 βλαβών: Π(18)= P(0)+P(1)+P(2)+P(3) = 0,1501+0,3002+0,2835 +0,1680 = 0,9018.

Η αντίστοιχη τιμή μονάδας είναι:

$$c_{u,18,3}=\frac{(18+3)*\ 7,5+18*\ 12,5+18*\ 30+4*60}{1080}=1,076\ €\ /\ m^3$$

Για x≥4, οπότε ο στόλος λειτουργεί με λιγότερα από 18 οχήματα, ισχύουν κατά περίπτωση οι τιμές μονάδας του Πιν. 4.10

Πιν. 4.10: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=3

x	x+z-n	$c_{u,21-x,3}$
4	17	1,110
5	16	1,148
6	15	1,192

Η τελική πιθανοτικά σταθμισμένη τιμή μονάδας που χαρακτηρίζει την περίπτωση για z=3 προκύπτει από την εφαρμογή της εξ. 4.11:

$$c_{u(3)}=\sum_{x=0}^{3}P(x)*c_{u,18,3}+\sum_{x=4}^{18}P(x)*c_{u,21-x,3}$$

$$=0,9018*1,076+0,0700*1,110+0,0218*1,148+0,0052*1,192=\mathbf{1,081\ €\ /\ m^3}$$

Από τη σύγκριση $c_{u(2)}$ και $c_{u(3)}$ διαπιστώνεται περαιτέρω μείωση της τιμής μονάδας και συνεπώς η τοποθέτηση τρίτου εφεδρικού οχήματος είναι σκόπιμη.

Διερεύνηση $5^{η}$, z=4

Στην περίπτωση τοποθέτησης τεσσάρων εφεδρικών οχημάτων (z=4), η πιθανότητα λειτουργίας 18 οχημάτων ισούται με την πιθανότητα εκδήλωσης 0, 1, 2, 3 ή 4 βλαβών:
Π(18)=P(0)+P(1)+P(2)+P(3)+P(4) = 0,1501+0,3002 +0,2835 +0,1680 +0,07=0,9718.

Η αντίστοιχη τιμή μονάδας είναι:

$$c_{u,18,4}=\frac{(18+4)*\ 7,5+18*\ 12,5+18*\ 30+4*60}{1080}=1,083\ €\ /\ m^3.$$

Για x≥5, οπότε ο στόλος λειτουργεί με λιγότερα από 18 οχήματα, υπολογίζονται οι τιμές του Πιν. 4.11.

Πιν. 4.11: Τιμή μονάδας εργασίας για δεδομένο πλήθος βλαβών x και αριθμό εφεδρικών z=4

x	x+z-n	$c_{u,22-x,4}$
5	17	1,118
6	16	1,156

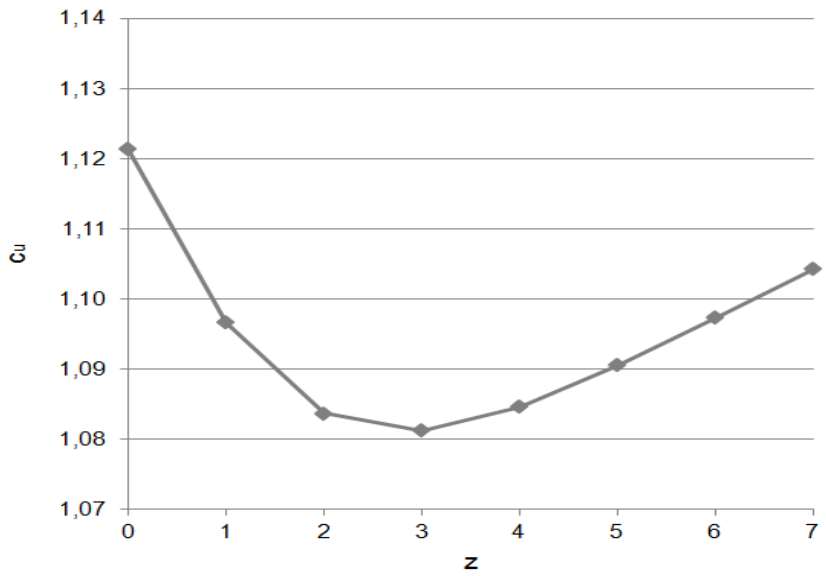
Η τελική πιθανοτικά σταθμισμένη τιμή μονάδας που χαρακτηρίζει την περίπτωση για z=4 προκύπτει από την εφαρμογή της εξ. 4.11.

$$c_{u(4)} = \sum_{x=0}^{4} P(x)*c_{u,18,4} + \sum_{x=5}^{18} P(x)*c_{u,22-x,4}$$

$$=0,9718*1,083 + 0,0218*1,118 + 0,0052*1,156 = \mathbf{1,085\ €\ /\ m^3}$$

Από τη σύγκριση $c_{u(3)}$ και $c_{u(4)}$ διαπιστώνεται ότι $c_{u(3)} < c_{u(4)}$ οπότε η τοποθέτηση τέταρτου εφεδρικού οχήματος δεν είναι σκόπιμη καθώς οδηγεί σε αύξηση του κόστους.

Επαναλαμβάνοντας την ίδια διαδικασία για z>4, διαπιστώνεται ότι η τιμή μονάδας παρουσιάζει περαιτέρω αύξηση, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο. Συνεπώς, το βέλτιστο μέγεθος του εφεδρικού στόλου οχημάτων είναι z=3. Στο Σχ. 4.3 παρουσιάζεται η μεταβολή της τιμής μονάδας για τις διάφορες περιπτώσεις εφεδρικών οχημάτων.



Σχ. 4.3: Τιμή μονάδας εργασίας για διαφορετικό πλήθος εφεδρικών οχημάτων

Η εφαρμογή της προηγούμενης υπολογιστικής διαδικασίας για διάφορες τιμές διαθεσιμότητας και μεγέθους του βασικού στόλου συνθέτει την εικόνα του Σχ. 4.4.

n	$\bar{\Delta}$			
	0,8	0,85	0,9	0,95
3	1	1		
4				
5	2		1	
6				
7		2		
8	3			
9				1
10		3	2	
11				
12	4			
13				
14				
15		4	3	
16	5			
17				
18				
19				
20	6			
21		5		
22				
23			4	2
24	7			
25				
26				
27		6		
28				
29	8			
30				
31				
32		7	5	
33	9			
34				
35				3
36				
37				
38	10	8		
39				
40			6	

Σχ. 4.4: Βέλτιστος αριθμός εφεδρικών οχημάτων αναλόγως μεγέθους και διαθεσιμότητας βασικού στόλου

Είναι σαφές ότι με την αύξηση της διαθεσιμότητας των οχημάτων η ανάγκη εφεδρικών μειώνεται. Ενδεικτικά, για στόλο μέχρι επτά οχήματα είναι απαραίτητο ένα εφεδρικό εφόσον η διαθεσιμότητα ξεπερνάει το 0,90, διαφορετικά είναι σκόπιμη η τοποθέτηση και δεύτερου. Για στόλο μεταξύ οκτώ και έντεκα οχημάτων είναι πιθανότερη η ανάγκη τοποθέτησης δύο ή τριών εφεδρικών, εκτός αν η διαθεσιμότητά τους ξεπερνά το 0,95 οπότε ένα είναι αρκετό. Για στόλους οχημάτων με περισσότερα

από δώδεκα οχήματα υπάρχει σημαντική μεταβλητότητα στο βέλτιστο πλήθος εφεδρικών οχημάτων αναλόγως της τιμής της διαθεσιμότητας όσο και του μεγέθους του στόλου. Σε κάθε περίπτωση, η αναλογία μεγέθους εφεδρικού και βασικού στόλου καθορίζεται κατά κύριο λόγο από τη διαθεσιμότητα των οχημάτων και ποικίλει χονδρικά από 1 προς 10 για πολύ υψηλή διαθεσιμότητα ($\overline{\Delta}$=0,95) έως 3 προς 10 για μέση διαθεσιμότητα οχημάτων ($\overline{\Delta}$=0,80).

Είναι γεγονός ωστόσο ότι τα παραπάνω αποτελέσματα είναι άμεσα συναρτημένα με τις οικονομικές παραδοχές της ανάλυσης (Πιν. 4.4) και ιδιαίτερα με το λόγο του ωριαίου κόστους μίσθωσης και συντήρησης του οχήματος προς το ωριαίο κόστος του χειριστή, c_b/c_w, ο οποίος έχει υποτεθεί ίσος με 7,5/12,5=0,6. Ως εκ τούτου, είναι σκόπιμη η διερεύνηση της μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων για διακύμανση της τιμής του λόγου αυτού εντός διαστήματος μεγάλου εύρους όπως το [1/3, 3].

Με επαναληπτική εφαρμογή του αλγορίθμου διαπιστώνεται ότι η μέγιστη διαφοροποίηση του βέλτιστου πλήθους εφεδρικών οχημάτων συνίσταται σε δύο οχήματα, οπότε διαπιστώνεται ότι τα αποτελέσματα δεν εμφανίζουν ιδιαίτερη ευαισθησία στις αριθμητικές παραδοχές. Επίσης καθίσταται σαφές ότι η επίδραση του λόγου c_b/c_w είναι μεγαλύτερη για μικρότερες τιμές της διαθεσιμότητας των οχημάτων του βασικού στόλου (Σχ. 4.5, 4.6, 4.7 και 4.8).

Cb/Cw	$\overline{\Delta}$=0,8														
	n=45	n=40	n=35	n=30	n=28	n=25	n=20	n=18	n=15	n=12	n=10	n=8	n=6	n=5	n=4
1/3	12	11	10		8				5		4		3		
1/2				8		7	6	5		4		3			
2/3	11	10	9						4						2
1,0					7									2	
1,5											3		2		
2,0	10	9	8	7		6	5	4		3		2			
2,5					6				3						1
3,0															

Σχ. 4.5: Βέλτιστο πλήθος εφεδρικών οχημάτων για βασικό στόλο n οχημάτων με $\overline{\Delta}$=0,80, αναλόγως τιμής c_b/c_w

Cb/Cw	$\bar{\Delta}$=0,85														
	n=45	n=40	n=35	n=30	n=28	n=25	n=20	n=18	n=15	n=12	n=10	n=8	n=6	n=5	n=4
1/3			8	7		6	5	5	4						
1/2	9	8			6					3	3				2
2/3			7	6		5		4					2	2	
1,0							4					2			
1,5	8								3						
2,0		7	6	5	5			3		2	2			1	1
2,5	7					4							1		
3,0							3								

Σχ. 4.6: Βέλτιστο πλήθος εφεδρικών οχημάτων για βασικό στόλο n οχημάτων με $\bar{\Delta}$=0,85, αναλόγως τιμής c_b/c_w

Cb/Cw	$\bar{\Delta}$=0,9														
	n=45	n=40	n=35	n=30	n=28	n=25	n=20	n=18	n=15	n=12	n=10	n=8	n=6	n=5	n=4
1/3	7			5	5		4						2		
1/2		6				4			3						
2/3	6		5					3				2			
1,0				4	4		3				2				
1,5		5								2					
2,0	5					3			2				1	1	1
2,5			4		3			2				1			
3,0		4		3			2				1				

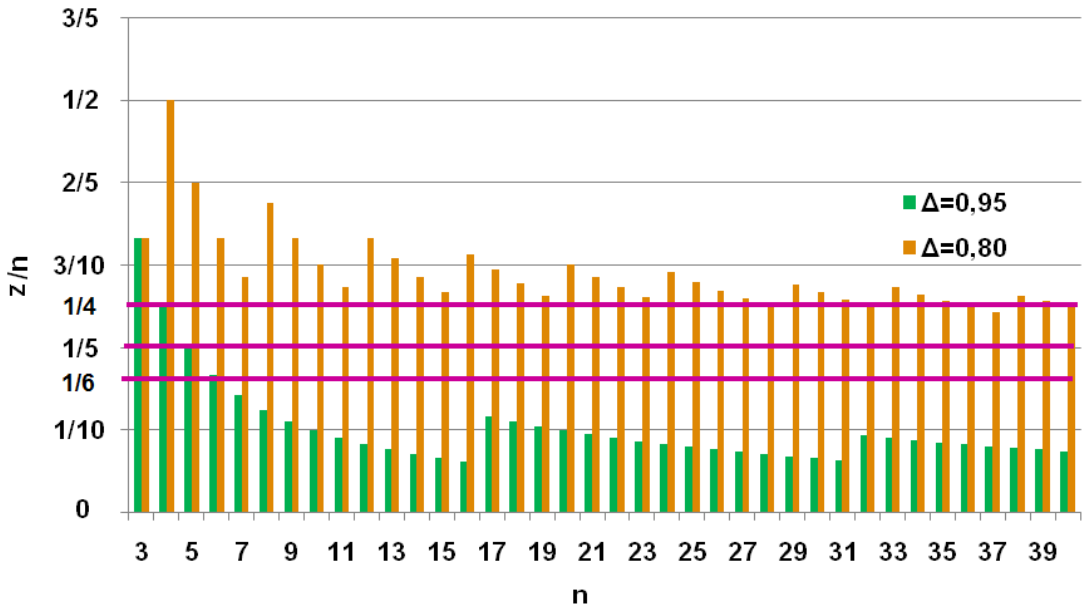
Σχ. 4.7: Βέλτιστο πλήθος εφεδρικών οχημάτων για βασικό στόλο n οχημάτων με $\bar{\Delta}$=0,90, αναλόγως τιμής c_b/c_w

Cb/Cw	$\bar{\Delta}$=0,95														
	n=45	n=40	n=35	n=30	n=28	n=25	n=18	n=20	n=15	n=12	n=10	n=8	n=6	n=5	n=4
1/3	4			3	3				2						
1/2		3	3				2	2							
2/3						2									
1,0	3									1	1	1	1	1	1
1,5				2	2				1						
2,0		2	2				1	1							
2,5						1									
3,0	2														

Σχ. 4.8: Βέλτιστο πλήθος εφεδρικών οχημάτων για βασικό στόλο n οχημάτων με $\bar{\Delta}$=0,95, αναλόγως τιμής c_b/c_w

4.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενων εμπειρικών κανόνων – προτεινόμενης μεθόδου

Ο ρόλος της διαθεσιμότητας στη βέλτιστη αναλογία εφεδρικού και βασικού στόλου έχει ήδη διαπιστωθεί καθώς για $\overline{\Delta}$=0,95 η αναλογία προσδιορίζεται χονδρικά στο 1:10 ενώ για $\overline{\Delta}$=0,80 αυξάνεται στο 3:10. Η σύγκριση των βέλτιστων αναλογιών με τις προτεινόμενες αναλογίες των εμπειρικών κανόνων που δεν λαμβάνουν υπόψη τη διαθεσιμότητα του οχήματος (1:4, 1:5, 1:6) παρουσιάζεται στο Σχ. 4.9. Είναι σαφές ότι οι αποκλίσεις είναι σημαντικές και ποικίλουν αναλόγως του αριθμού των οχημάτων του βασικού στόλου n, και της διαθεσιμότητας όπως προκύπτει και από το Σχ. 4.10.



Σχ. 4.9: Αναλογία βασικών – εφεδρικών οχημάτων βάσει εμπειρικών κανόνων και προτεινόμενης μεθόδου

Όσον αφορά στις προτάσεις των εγχειριδίων Terex και SME, από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων τους με την προτεινόμενη μέθοδο (ΠΜ), διαπιστώνεται ότι οδηγούν σε υποδιαστασιολόγηση του εφεδρικού στόλου. Ωστόσο οι παρατηρούμενες αποκλίσεις είναι μικρότερου εύρους σε σχέση με αυτές που παρατηρήθηκαν στην περίπτωση των εμπειρικών κανόνων που δε λαμβάνουν υπόψη τη διαθεσιμότητα. Από το Σχ. 4.11 καθίσταται σαφές ότι μεταξύ των δύο, η πρόταση του SME προσεγγίζει πιο ικανοποιητικά τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης.

n	Δ=0.8			
	ΠΜ	1/4	1/5	1/6
3	1			
4		1		
5	2		1	
6				1
7		2		
8				
9	3			
10			2	
11		3		
12				2
13	4			
14			3	
15		4		
16				
17	5			3
18				
19		5	4	
20				
21	6			
22				
23		6		4
24			5	
25				
26	7			
27		7		
28				5
29			6	
30	8			
31		8		
32				
33				
34	9			
35		9	7	6
36				
37				
38				
39	10	10	8	7
40				

n	Δ=0.85			
	ΠΜ	1/4	1/5	1/6
3	1			
4		1		
5			1	
6	2			1
7		2		
8				
9				
10			2	
11	3			
12		3		
13				2
14				
15			3	
16		4		
17	4			
18				3
19		5		
20			4	
21				
22				
23	5	6		
24				4
25			5	
26				
27		7		
28	6			
29				5
30			6	
31		8		
32				
33				
34	7			
35		9	7	6
36				
37				
38				
39	8	10	8	7
40				

n	Δ=0.9			
	ΠΜ	1/4	1/5	1/6
3				
4		1		
5	1		1	
6				1
7		2		
8				
9				
10			2	
11	2			
12		3		
13				2
14				
15			3	
16		4		
17				
18				3
19	3			
20		5		
21			4	
22				
23		6		
24				4
25			5	
26				
27	4			
28		7		
29				
30			6	
31		8		
32				
33				
34	5			
35		9	7	6
36				
37				
38				
39		10	8	7
40	6			

n	Δ=0.95			
	ΠΜ	1/4	1/5	1/6
3				
4		1		
5			1	
6				1
7		2		
8				
9	1			
10			2	
11		3		
12				2
13				
14			3	
15		4		
16				
17				
18				3
19		5		
20			4	
21				
22				
23		6		
24	2			4
25			5	
26				
27		7		
28				
29				5
30			6	
31		8		
32				
33				
34				
35		9	7	6
36	3			
37				
38				
39		10	8	7
40				

Σχ. 4.10: Αριθμός απαιτούμενων εφεδρικών οχημάτων κατά εμπειρικούς κανόνες και προτεινόμενη μέθοδο

n	Δ= 0.8			Δ= 0.85			Δ= 0.9			Δ= 0.95		
	Terex	SME	ΠΜ	Terex	SME	ΠΜ	Terex	SME	ΠΜ	Terex	SME	ΠΜ
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4			2									
5		2				2						
6	2				2							
7			3	2					2			
8		3				3		2				
9			4		3							
10	3	4		3		4	2		3			
11			5		4			3				
12	4	5		4		5						
13			6		5		3		4			
14	5	6		5		6		4		2	2	2
15			7		6		4					
16	6	7		6		7		5	5			
17			8	7	7							
18	7	8				8	5					
19			9	8	8							
20	8	9										3
21			10									
22		10										
23												
24												
25												
26												
27												
28												
29												
30												
31												
32												
33												
34												
35												
36												
37												
38												
39												
40												

Σχ. 4.11: Αριθμός απαιτούμενων εφεδρικών οχημάτων κατά εγχειρίδια Terex, SME και προτεινόμενη μέθοδο

4.5 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύχθηκε αλγόριθμος υπολογισμού του οικονομικά βέλτιστου αριθμού εφεδρικών οχημάτων για υποστήριξη στόλου συγκεκριμένης διαθεσιμότητας και μεγέθους. Από την αριθμητική διερεύνηση της εφαρμογής του αλγορίθμου για τυπικά στοιχεία κόστους, διαπιστώθηκε ότι η βέλτιστη αναλογία μεγέθους εφεδρικού και βασικού στόλου ποικίλει χονδρικά από 1 προς 10 για πολύ υψηλή διαθεσιμότητα ($\overline{\Delta}$=0,95) έως 3 προς 10 για μέση διαθεσιμότητα οχημάτων ($\overline{\Delta}$=0,80). Από την ανάλυση ευαισθησίας στις μεταβολές των στοιχείων κόστους διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα δεν εμφανίζουν ιδιαίτερη ευαισθησία. Η σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με τους εμπειρικούς κανόνες που βασίζονται μόνο στο μέγεθος του βασικού στόλου, κατέδειξε ότι τα αποτελέσματα των τελευταίων αποκλίνουν σημαντικά από τα βέλτιστα. Οι προσεγγίσεις που λαμβάνουν υπόψη και τη διαθεσιμότητα των οχημάτων έχουν αισθητά βελτιωμένα αποτελέσματα, ωστόσο συχνά οδηγούν σε υποδιαστασιολόγηση του εφεδρικού στόλου.

5. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΧΩΜΑΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΦΟΡΤΩΤΗ

5.1 Εισαγωγή

Ο αριθμός των φορτώσεων που απαιτούνται για την πλήρη φόρτωση χωματουργικού οχήματος από φορτωτή, έστω ξ, ισούται με το μικρότερο μεταξύ του λόγου της μέγιστης χωρητικότητας του οχήματος προς τη χωρητικότητα του κάδου του φορτωτή και του λόγου της μέγιστης κατά βάρος μεταφορικής ικανότητας του οχήματος προς το βάρος που αντιστοιχεί στον όγκο πλήρωσης του κάδου (εξ. 2.5). Ωστόσο, σε τυχαίο συνδυασμό φορτωτή – οχήματος, η μεταφορική ικανότητα του οχήματος σπανίως αντιστοιχεί σε ακέραιο πολλαπλάσιο της χωρητικότητας του φορτωτή, η τιμή του ξ προκύπτει δεκαδική και τελικά, η πλήρωση του οχήματος απαιτεί την εκτέλεση μίας μη πλήρους φόρτωσης.

Η εκτέλεση της μερικής αυτής φόρτωσης εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή αξιοποίηση του οχήματος, αλλά ταυτόχρονα οδηγεί σε μερική μόνο αξιοποίηση της φορτωτικής ικανότητας του φορτωτή. Αντίστροφα, η μη εκτέλεσή της επιτρέπει τη μέγιστη αξιοποίηση του φορτωτή, αφήνοντας ωστόσο ανεκμετάλλευτο μέρος της μεταφορικής ικανότητας του οχήματος. Σε αυτό το πλαίσιο, ο καθορισμός του μέσου που αξιοποιείται πλήρως (αντί του άλλου), ή ισοδύναμα η εκτέλεση (ή μη) της μερικής φόρτωσης απαιτεί διερεύνηση καθώς έχει άμεση επίδραση στην ωριαία παραγωγή του συνδυασμού και κατ’ επέκταση στο κόστος εκτέλεσης της εργασίας.

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται μέθοδος εκτίμησης της επίδρασης της μερικής φόρτωσης στο κόστος συγκεκριμένης εργασίας μετακίνησης υλικού και διερευνάται η σκοπιμότητα της εκτέλεσής της.

5.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Από τη βιβλιογραφική έρευνα προκύπτει ότι η ισορροπία μεταξύ φόρτωσης και μεταφοράς δεν έχει αποτελέσει αντικείμενο συστηματικής διερεύνησης. Μεγάλος αριθμός εργασιών που απαντώνται στη βιβλιογραφία των χωματουργικών εργασιών (ενδεικτικά Karshenas 1989, Gove and Morgan 1994, Smith et al. 1995, Smith 1999, Kannan et al. 1999, Marzouk and Moselhi 2003), βιβλία διδασκαλίας (Peurifoy 1970) και σχετικά εγχειρίδια κατασκευαστών μηχανημάτων (Caterpillar Performance Handbook 2010) δεν κάνουν καμία αναφορά στο ενδεχόμενο μη πλήρους φόρτωσης του κάδου του φορτωτή.

Άλλοι ερευνητές συστήνουν την αποφυγή των μη πλήρων φορτώσεων, χωρίς ωστόσο αυτή τους η άποψη να τεκμηριώνεται επαρκώς. Συγκεκριμένα, οι Gransberg (1996), Gransberg et al. (2006) υποστηρίζουν ότι αποτελεί πρακτική προς αποφυγήν, ενώ οι Schexnayder et al. (1999) διατυπώνουν τη μη ρεαλιστική πρόταση χρησιμοποίησης φορτωτών και οχημάτων για τους οποίους επιτυγχάνεται πλήρης φόρτωση του οχήματος με ακέραιο αριθμό φορτώσεων. Οι Peurifoy et al. (2006) αναγνωρίζουν ότι κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό αλλά παράλληλα επισημαίνουν ότι η εκτέλεση μη πλήρων φορτώσεων είναι αντιοικονομική καθώς το φορτίο δεν είναι ανάλογο του χρόνου φόρτωσης.

Μοναδική ρητή αναφορά στην ενδεχόμενη σκοπιμότητα εκτέλεσης μη πλήρων φορτώσεων γίνεται από τους Burt and Caccetta (2007), οι οποίοι επικαλούνται εμπειρικό κανόνα σύμφωνα με τον οποίο η μη πλήρης φόρτωση είναι σκόπιμο να εκτελείται εφόσον ο κάδος του φορτωτή είναι πληρωμένος κατ’ ελάχιστον κατά το 1/3 του όγκου του.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η βιβλιογραφία είναι αρνητική σε σχέση με την εκτέλεση μη πλήρων φορτώσεων, παρά το ότι η επίδρασή τους στην τιμή μονάδας της εργασίας δεν έχει αποτελέσει αντικείμενο συστηματικής διερεύνησης. Προς αυτήν την κατεύθυνση θα αναπτυχθεί μέθοδος για την αποτίμηση της επίδρασης της εκτέλεσης μερικών φορτώσεων στο κόστος της μετακίνησης.

5.3 Αξιολόγηση εναλλακτικών Μεθόδων Φόρτωσης

Η παρούσα ενότητα στοχεύει στη σύνθεση υπολογιστικής διαδικασίας που για συγκεκριμένο συνδυασμό φορτωτών και οχημάτων θα αξιολογεί την οικονομική σκοπιμότητα της τελευταίας μερικής φόρτωσης, υποδεικνύοντας την επιλογή του συνολικού αριθμού των εκτελούμενων φορτώσεων, ως ίσου με [ξ] ή [ξ]+1. Οι δύο αυτές εναλλακτικές επιλογές θα προσδιορίζονται εφεξής ως μέθοδοι φόρτωσης Α και Β αντίστοιχα, με τα χαρακτηριστικά του Πιν. 5.1.

Πιν. 5.1: Χαρακτηριστικά μεθόδων φόρτωσης

Μέθοδος Φόρτωσης	A	B
Αριθμός φορτώσεων	[ξ]	[ξ]+1
Πληρότητα φορτώσεων	[ξ] πλήρεις	[ξ] πλήρεις + 1 μερική
Πλήρως αξιοποιούμενο μέσο	Φορτωτής	Όχημα

Κάθε μέθοδος φόρτωσης αντιστοιχεί σε διαφορετική ωριαία παραγωγή τόσο για το φορτωτή όσο και για το όχημα (Πιν. 5.2). Όσον αφορά στο φορτωτή, η ωριαία παραγωγή του Q_{φ} είναι πάντα μεγαλύτερη και ίση με τη μέγιστη δυνατή όταν εφαρμόζεται η μέθοδος φόρτωσης Α, δεδομένου ότι εκτελούνται μόνο πλήρεις φορτώσεις. Όσον αφορά στην ωριαία παραγωγή του οχήματος $Q_{o\chi}$, δεδομένου ότι είναι ανάλογη του μεταφερόμενου όγκου του υλικού και αντιστρόφως ανάλογη του χρόνου κύκλου, δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό με ποια μέθοδο φόρτωσης μεγιστοποιείται, εφόσον αμφότερα είναι αυξημένα στη Β σε σχέση με την Α.

Πιν. 5.2: Ωριαία παραγωγή φορτωτή και οχήματος αναλόγως μεθόδου φόρτωσης

	A	**B**
Q_{φ}	$\frac{V_{\varphi}}{t_{\varphi}}$	$\frac{V_{\varphi}}{t_{\varphi}} * \frac{\xi}{[\xi]+1}$
Q_{ox}	$\frac{[\xi] * V_{\varphi}}{t_{o\chi,A}}$	$\frac{\xi * V_{\varphi}}{t_{o\chi,B}}$

Με βάση τα παραπάνω είναι εύλογη η θεώρηση δύο εναλλακτικών συνδυασμών μέσων, Α και Β, για την εκτέλεση συγκεκριμένης εργασίας. Ο συνδυασμός Α αποτελείται από k_A φορτωτές και n_A οχήματα με τα χαρακτηριστικά παραγωγής της μεθόδου φόρτωσης Α ενώ ο συνδυασμός Β αποτελείται από k_B φορτωτές και n_B οχήματα με τα χαρακτηριστικά παραγωγής της μεθόδου φόρτωσης Β.

Για τον προσδιορισμό του οικονομικότερου μεταξύ των δύο, ορίζεται ο Δείκτης Σκοπιμότητας ο οποίος εκφράζει τη μέση ποσοστιαία μεταβολή της τιμής μονάδας της εργασίας c_u εάν επιλεγεί ο συνδυασμός Β αντί του Α (εξ. 5.1). Συνεπώς, τιμή ΔΣ>0 υποδεικνύει ότι ο συνδυασμός Α και άρα η μέθοδος φόρτωσης Α είναι οικονομικότερη, ενώ τιμή ΔΣ<0 προκρίνει ως οικονομικότερο το συνδυασμό Β.

$$\Delta\Sigma = \frac{c_{u,B} - c_{u,A}}{\frac{c_{u,B} + c_{u,A}}{2}} \qquad (5.1)$$

Ωστόσο, η σύγκριση στην οποία βασίζεται ο υπολογισμός του ΔΣ είναι δυνατή μόνο υπό συγκεκριμένες παραδοχές, για τον προσδιορισμό των οποίων απαιτείται διερεύνηση.

Αρχικά, είναι σαφές ότι αν υποτεθεί ότι οι συνδυασμοί Α και Β έχουν κοινή σύνθεση, δηλαδή $k_A=k_B=k$ και $n_A=n_B=n$, η διαφοροποίηση της μεθόδου φόρτωσης αναμφίβολα οδηγεί σε συνδυασμούς διαφορετικής συναρμογής εφόσον τα Q_φ, Q_{ox} διαφοροποιούνται. Ωστόσο, η μεταβολή της συναρμογής δεν επιτρέπει την αποτίμηση της επίδρασης της μεθόδου φόρτωσης στο κόστος, εφόσον η σχέση κόστους – παραγωγής που εκφράζεται από την κατά περίπτωση συναρμογή είναι διαφορετική. Ως εκ τούτου, η σκοπούμενη σύγκριση είναι δυνατή μόνο εφόσον η επίδραση της συναρμογής στο κόστος είναι ίδια και στους δύο συνδυασμούς.

Η ανωτέρω απαίτηση ικανοποιείται όταν αμφότεροι οι συνδυασμοί Α, Β εργάζονται με βέλτιστη συναρμογή, δηλαδή ο συντελεστής συναρμογής (ΣΣ) του συνδυασμού ισούται με τη μονάδα ή ισοδύναμα όταν ο χρόνος που απαιτείται για τη φόρτωση των n οχημάτων από τους k φορτωτές είναι ίσος με το χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός κύκλου μεταφοράς (εξ. 5.2). Η απόσταση μεταφοράς για την οποία ικανοποιείται η συνθήκη ΣΣ=1 δίνεται κατά περίπτωση συνδυασμού από την εξ. 5.3 για τον Α και από την εξ. 5.4 για τον Β. Προκύπτει άμεσα η παρατήρηση ότι $L_B > L_A$, δεδομένου ότι η διάρκεια της φόρτωσης αυξάνεται και η ταχύτητα μετάβασης μειώνεται υπό το αυξημένο φορτίο της περίπτωσης του συνδυασμού Β. Δεδομένου οι αποστάσεις L_A, L_B δεν ταυτίζονται, ο ΔΣ υπολογίζεται με βάση την τιμή μονάδας, ανηγμένη κατά περίπτωση στην απόσταση μεταφοράς (€/m^3km).

$$ΣΣ=1 \rightarrow n*Q_{ox}=k*Q_\varphi \rightarrow \frac{n}{k}*t_{φορτ}=t_{φορτ}+t_{μετ}+t_{σταθ}+t_{επ} \quad (5.2)$$

$$L_A=\left(\frac{n}{k}*[ξ]*t_\varphi-[ξ]*t_\varphi-t_{σταθ}\right)/\left(\frac{1}{U_{μετ,A}}+\frac{1}{U_{επ}}\right) \quad (5.3)$$

$$L_B=\left(\frac{n}{k}*([ξ]+1)*t_\varphi-([ξ]+1)*t_\varphi-t_{σταθ}\right)/\left(\frac{1}{U_{μετ,B}}+\frac{1}{U_{επ}}\right) \quad (5.4)$$

Η ορθότητα του παραπάνω συνδυασμού παραδοχών (διαφορετική μέθοδος φόρτωσης, ίδια σύνθεση συνδυασμού, βέλτιστη συναρμογή με μεταβολή της απόστασης μεταφοράς) μπορεί να αξιολογηθεί άμεσα με αριθμητική διερεύνηση για διάφορους συνδυασμούς k, n, ξ. Με την υπόθεση των στοιχείων του Πιν. 5.3, διαπιστώνεται ότι η μέθοδος φόρτωσης Β προκύπτει πάντα οικονομικότερη (ΔΣ<0), ακόμα και για τιμές του ξ με ελάχιστο δεκαδικό μέρος ή ισοδύναμα αμελητέο φορτίο κατά τη μερική φόρτωση, γεγονός που καταδεικνύει ότι η διαδικασία σύγκρισης αστοχεί.

Πιν. 5.3: Δεδομένα αριθμητικής διερεύνησης

Χωματουργικό όχημα					Φορτωτής	
N_e (PS)	$B_{απ}$ (tn)	$B_{ox,max}$ (tn)	V_{ox} (m^3)	c_{ox} (€/h)	$t_φ$ (min)	$c_φ$ (€/h)
400	11	22	12	50	0,5	60

Συνθήκες						
γ (tn/m^3)	w_r (Kp/Mp)	w_s (Kp/Mp)	U_{lim} (km/h)	$η_{ταχ,μετ}$	$η_{ταχ,επ}$	$t_{σταθ}$ (min)
1,7	40	30	60	0,75	0,85	2

Επανεξετάζοντας τις παραδοχές, γίνεται αντιληπτό ότι ο συνδυασμός Β (αντιστοιχώντας πάντα σε μεγαλύτερη απόσταση μεταφοράς σε σχέση με το συνδυασμό Α) χαρακτηρίζεται εξ ορισμού από καλύτερη σχέση κόστους - παραγωγής, λόγω του ότι ο μη παραγωγικός χρόνος φόρτωσης, αν και αυξημένος, αποτελεί τελικά μικρότερο ποσοστό του συνολικού χρόνου κύκλου του οχήματος. Επομένως, η συστηματική πρόκριση της μεθόδου φόρτωσης Β οφείλεται κυρίως στην αυξημένη απόσταση μεταφοράς, ενώ η επίδραση της μεθόδου φόρτωσης στο κόστος δεν μπορεί να αποτιμηθεί. Κατά συνέπεια προκύπτει ότι η συγκριτική αξιολόγηση του κόστους των δύο εναλλακτικών μεθόδων φόρτωσης Α, Β είναι δυνατή μόνο εφόσον η απόσταση μεταφοράς είναι κοινή (εξ. 5.5).

$$L_A = L_B \tag{5.5}$$

Ωστόσο, η ταυτόχρονη ικανοποίηση των απαιτήσεων κοινής απόστασης μεταφοράς και βέλτιστης συναρμογής υπό διαφορετική μέθοδο φόρτωσης αναπόφευκτα οδηγεί στη διαφοροποίηση του πλήθους των φορτωτών και των οχημάτων στους δύο συνδυασμούς. Συνεπώς, παύει να ισχύει η αρχική υπόθεση $k_A = k_B = k$ και $n_A = n_B = n$, οπότε οι εξ. 5.3 και 5.4, συνδυαζόμενες με την εξ.5.5, μετασχηματίζονται στις εξ. 5.6 και 5.7.

$$L_A = \left(\frac{n_A}{k_A} * [ξ] * t_φ - [ξ] * t_φ - t_{σταθ}\right) / \left(\frac{1}{U_{μετ,A}} + \frac{1}{U_{επ}}\right) = L \tag{5.6}$$

$$L_B = \left(\frac{n_B}{k_B} * ([ξ]+1) * t_φ - ([ξ]+1) * t_φ - t_{σταθ}\right) / \left(\frac{1}{U_{μετ,B}} + \frac{1}{U_{επ}}\right) = L \tag{5.7}$$

Υποθέτοντας τη σύνθεση του συνδυασμού Α (k_A, n_A), οι εξ. 5.6, 5.7 επιτρέπουν τον προσδιορισμό του λόγου k_B / n_B. Συνεπώς, για την εύρεση των k_B και n_B απαιτείται

μία ακόμα συνθήκη. Αυτή επελέγη να είναι η ισότητα της ωριαίας παραγωγής των δύο συνδυασμών Α, Β (εξ. 5.8). Με δεδομένη τη συνθήκη αυτή, είναι εκ των προτέρων γνωστό ότι $k_B > k_A$ εφόσον $Q_{\varphi,B} < Q_{\varphi,A}$.

$$n_A * Q_{ox,A} = k_A * Q_{\varphi,A} = n_B * Q_{ox,B} = k_B * Q_{\varphi,B} \tag{5.8}$$

Τελικά, οι τιμές των k_B, n_B δίνονται από τις εξ. 5.9 και 5.10, οπότε καθίσταται δυνατός ο προσδιορισμός των $c_{u,A}$, $c_{u,B}$ και εξ αυτών ο υπολογισμός του Δείκτη Σκοπιμότητας.

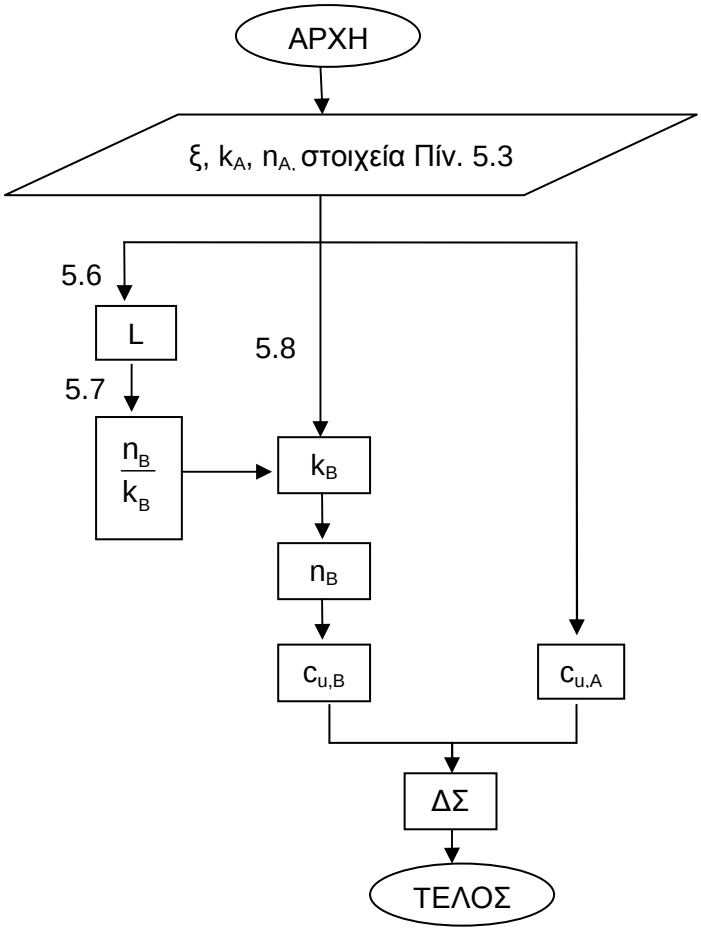
$$k_B = \frac{[\xi]+1}{\xi} * k_A \tag{5.9}$$

$$n_B = \frac{t_{ox,B} * [\xi]}{t_{ox,A} * \xi} * n_A \tag{5.10}$$

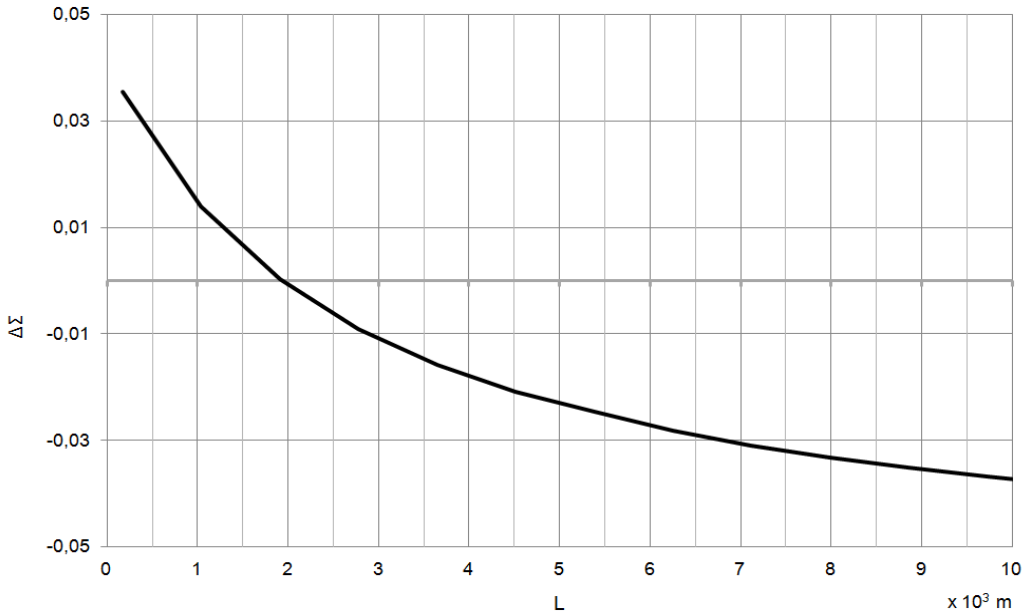
Είναι σαφές ότι στο πλαίσιο της ανωτέρω ανάλυσης τα k_A, k_B, n_A, n_B δεν μπορεί παρά να θεωρηθούν συνεχείς μεταβλητές. Η θεώρηση αυτή δεν αποδυναμώνει την πρακτική αξία της διερεύνησης, δεδομένου ότι η διαδικασία στοχεύει στον προσδιορισμό των θεωρητικών συνθηκών υπό τις οποίες καθίσταται εμφανής η τάση που διαμορφώνεται για την οικονομικότητα της εργασίας, αναλόγως της επιλεγόμενης μεθόδου φόρτωσης. Το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου δίνεται στο Σχ. 5.1.

Από την επαναληπτική εφαρμογή του αλγορίθμου για διαφορετικές τιμές των k, n και το ίδιο ξ και κατόπιν από τη γραφική απεικόνιση των ζευγών L-ΔΣ που προκύπτουν, λαμβάνεται για κάθε απόσταση μεταφοράς μία σαφής ένδειξη της μεταβολής (αύξησης ή μείωσης) που παρατηρείται στην τιμή μονάδας της ίδιας εργασίας για εκτέλεσή της από τον θεωρητικό συνδυασμό της μεθόδου φόρτωσης Β (k_B, n_B), αντί του ισοδύναμου ως προς την ωριαία παραγωγή θεωρητικού συνδυασμού της μεθόδου φόρτωσης Α, (k_A, n_A).

Ενδεικτικά, στο Σχ. 5.2 παρουσιάζεται η γραφική παράσταση των σημείων L-ΔΣ για ξ=5,50. Διαπιστώνεται ότι η πρόσθετη φόρτωση δημιουργεί αύξηση του κόστους (ΔΣ > 0) για αποστάσεις μεταφοράς μικρότερες των 2.000m. Για αποστάσεις μεταφοράς μεγαλύτερες των 2.000m η εκτέλεση της πρόσθετης φόρτωσης οδηγεί σε μείωση του κόστους (ΔΣ < 0), η οποία είναι της τάξης του 3,0% για αποστάσεις περί τα 7.000m.



Σχ. 5.1: Αλγόριθμος προσδιορισμού Δείκτη Σκοπιμότητας



Σχ. 5.2: Μεταβολή Δείκτη Σκοπιμότητας για διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς - ξ=5,50 - θεωρητικοί συνδυασμοί

Η υπολογιστική συνθετότητα της παραπάνω διαδικασίας μπορεί να μειωθεί με τον προσδιορισμό έκφρασης του ΔΣ χωρίς τον ενδιάμεσο υπολογισμό των k_A, k_B, n_A, n_B. Προς αυτή την κατεύθυνση, οι θεμελιώδεις συνθήκες βέλτιστης συναρμογής των συνδυασμών Α και Β και ισότητας της ωριαίας παραγωγής τους, μετασχηματίζονται με βάση τις σχέσεις του Πιν. 5.2, στις εξ. 5.11, 5.12 και 5.13 αντίστοιχα. Ταυτόχρονα, ισχύουν εξ ορισμού οι εξ. 5.14 και 5.15.

$$\Sigma\Sigma_A=1 \rightarrow k_A * Q_{\varphi,A} = n_A * Q_{o\chi,A} \rightarrow \frac{n_A}{k_A} = \frac{t_{o\chi,A}}{t_\varphi * [\xi]} \tag{5.11}$$

$$\Sigma\Sigma_B=1 \rightarrow k_B * Q_{\varphi,B} = n_B * Q_{o\chi,B} \rightarrow \frac{n_B}{k_B} = \frac{t_{o\chi,B}}{t_\varphi * ([\xi]+1)} \tag{5.12}$$

$$Q_A=Q_B \rightarrow k_B * Q_{\varphi,B} = k_A * Q_{\varphi,A} \rightarrow \frac{k_B}{k_A} = \frac{[\xi]+1}{\xi} \tag{5.13}$$

$$t_{o\chi,A} = [\xi]*t_\varphi + t_{\sigma\tau\alpha\theta} + \frac{L}{U_{\mu\varepsilon\tau,max,A} * \eta_{\tau\alpha\chi,\mu\varepsilon\tau}} + \frac{L}{U_{\varepsilon\pi,\,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\varepsilon\pi}} \tag{5.14}$$

$$t_{o\chi,B} = ([\xi]+1)*t_\varphi + t_{\sigma\tau\alpha\theta} + \frac{L}{U_{\mu\varepsilon\tau,max,B} * \eta_{\tau\alpha\chi,\mu\varepsilon\tau}} + \frac{L}{U_{\varepsilon\pi,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\varepsilon\pi}} \tag{5.15}$$

Επίσης, με βάση τον ορισμό της μέγιστης ταχύτητας του οχήματος κατά τη μετάβαση και την επιστροφή (εξ. 2.7 και 2.8), είναι δυνατή η διατύπωση των εξ. 5.16 και 5.17, όπου $U_{\varphi o\rho,max}$ η μέγιστη ταχύτητα που θεωρητικά θα ανέπτυσσε το όχημα υπό το βάρος του μεταφερόμενου φορτίου μόνο.

$$\frac{1}{U_{\mu\varepsilon\tau,max,B}} = \frac{(B_{\alpha\pi} + \gamma*V_{o\chi}) * (w_r + w_s)}{N_e * n_{\mu\eta\chi}} = \frac{1}{U_{\varepsilon\pi,max}} + \frac{1}{U_{\varphi o\rho,B,max}} \tag{5.16}$$

$$\frac{1}{U_{\mu\varepsilon\tau,max,A}} = \frac{(B_{\alpha\pi} + \gamma*V_{o\chi} * \frac{[\xi]}{\xi}) * (w_r + w_s)}{N_e * n_{\mu\eta\chi}} = \frac{1}{U_{\varepsilon\pi,max}} + \frac{1}{U_{\varphi o\rho,A,max}} = \frac{1}{U_{\varepsilon\pi,max}} + \frac{1}{U_{\varphi o\rho,B,max}} * \frac{[\xi]}{\xi} \tag{5.17}$$

Κατόπιν σειράς αντικαταστάσεων με βάση τις εξισώσεις 5.11-5.17, η έκφραση του λόγου $r = \frac{c_{u,B}}{c_{u,A}}$ (εξ. 5.18) και κατ' επέκταση ο ΔΣ (εξ. 5.19), προκύπτουν ανεξάρτητα των τιμών k_A, n_A, k_B, n_B.

$$r = \frac{[\xi]+1}{\xi} * \frac{1+\frac{c_{\varphi}}{c_{ox}} + \left(t_{\sigma\tau\alpha\theta} + \frac{L}{U_{\varepsilon\pi,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\mu\varepsilon\tau}} + \frac{L}{U_{\varepsilon\pi,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\varepsilon\pi}} + \frac{L}{U_{\varphi o\rho,B,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\mu\varepsilon\tau}}\right) * \frac{1}{t_{\varphi} * ([\xi]+1)}}{1+\frac{c_{\varphi}}{c_{ox}} + \left(t_{\sigma\tau\alpha\theta} + \frac{L}{U_{\varepsilon\pi,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\mu\varepsilon\tau}} + \frac{L}{U_{\varepsilon\pi,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\varepsilon\pi}} + \frac{L}{U_{\varphi o\rho,B,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\mu\varepsilon\tau}} * \frac{[\xi]}{\xi}\right) * \frac{1}{t_{\varphi} * [\xi]}}$$

(5.18)

$$\Delta\Sigma = \frac{r-1}{\frac{r+1}{2}} \qquad (5.19)$$

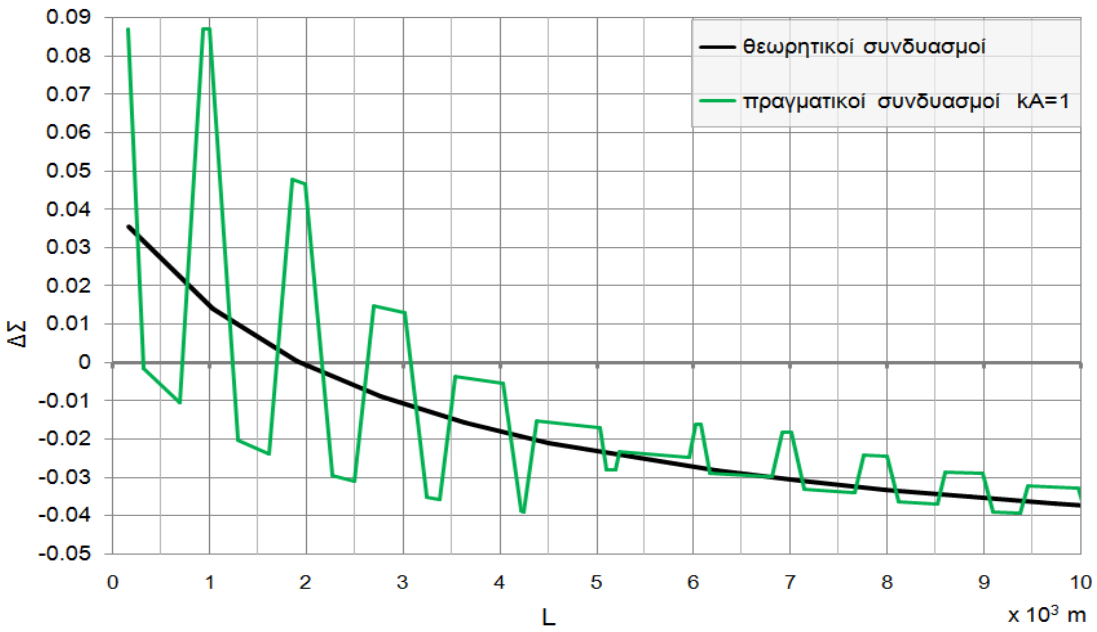
5.4 Επιβεβαίωση των παραδοχών της μεθόδου

Η προταθείσα υπολογιστική διαδικασία αξιολόγησης της επίδρασης του αριθμού των φορτώσεων στο κόστος εκτέλεσης της εργασίας μετακίνησης υλικού βασίζεται στη σύγκριση συνδυασμών βέλτιστης συναρμογής (ΣΣ=1). Η τήρηση της συνθήκης αυτής εξασφαλίζεται με τη θεώρηση των n, k ως συνεχών μεταβλητών, δηλαδή την παραδοχή ότι ο αριθμός φορτωτών και οχημάτων μπορεί να μην είναι ακέραιος. Ωστόσο οι πραγματικοί συνδυασμοί δεν μπορεί παρά να περιλαμβάνουν ακέραιο αριθμό μηχανημάτων, οπότε οι τιμές των n, k στρογγυλοποιούνται στην πλησιέστερη ακέραια τιμή για την οποία εξασφαλίζεται η εμπρόθεσμη ολοκλήρωση της εργασίας με το ελάχιστο κόστος. Σε αυτό το πλαίσιο, πρέπει να διαπιστωθεί κατά πόσον η αναπόφευκτη στρογγυλοποίηση του αριθμού των μέσων και η επακόλουθη απομάκρυνση του ΣΣ από τη μονάδα, οδηγεί σε αποτελέσματα που αποκλίνουν σημαντικά από τα αντίστοιχα θεωρητικά, ώστε να προσδιοριστεί ο βαθμός εμπιστοσύνης που μπορεί να αποδοθεί υπό αυτές τις παραδοχές στο ΔΣ, ως μεγέθους ενδεικτικού της οικονομικότητας της κάθε μεθόδου φόρτωσης.

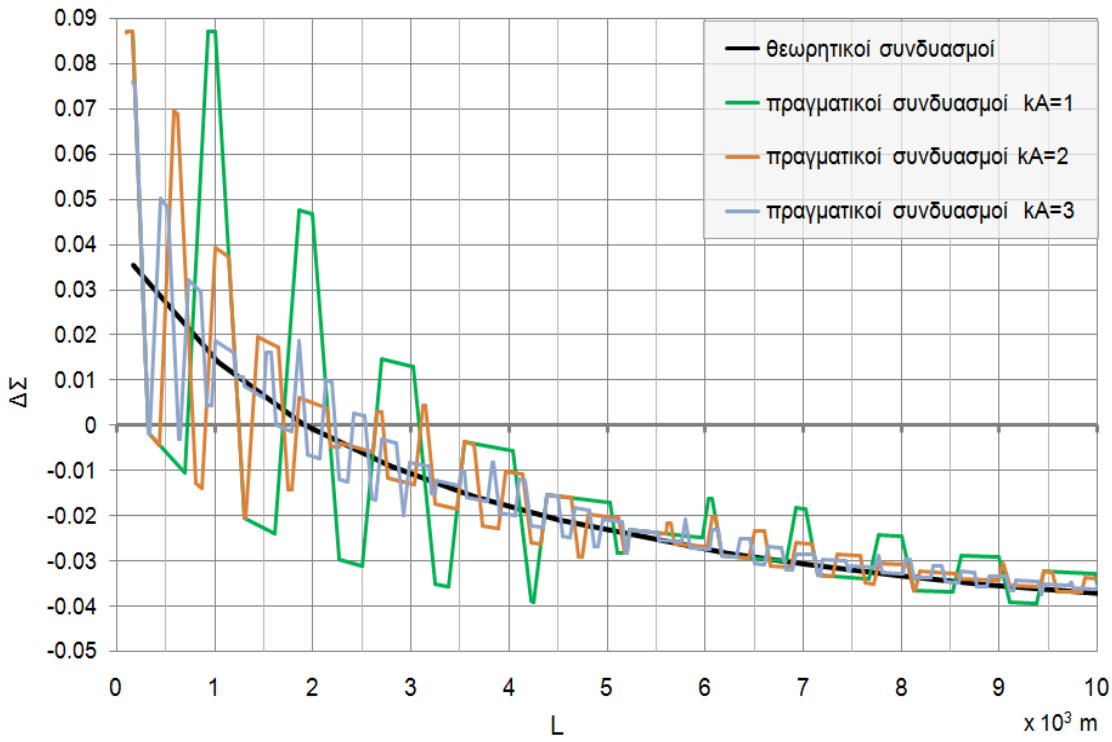
Για το σκοπό αυτό, ο βασικός αλγόριθμος της Λειτουργικής Ανάλυσης στις εργασίες μετακίνησης εδαφικού υλικού διατυπώθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού fortran. Με την εκτέλεση διαδοχικών επαναλήψεων με αύξηση κατά ένα μέτρο της απόστασης μεταφοράς στο διάστημα [100, 10.000] m, κατέστη δυνατός ο προσδιορισμός των πραγματικών συνδυασμών ελαχίστου κόστους και για τις δύο μεθόδους φόρτωσης για κάθε αποστάση μεταφοράς. Από τη γραφική παράσταση των ζευγών (L, ΔΣ) που προκύπτουν για k_A= k_B= 1 (ύπαρξη ενός φορτωτικού μέσου) -περίπτωση στην οποία και αναμένονται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από τον θεωρητικό σχεδιασμό- προκύπτει ότι η τιμή του ΔΣ ακολουθεί έντονα τεθλασμένη γραμμή. Ανοδικοί και καθοδικοί ευθείς κλάδοι κυμαίνονται διαδοχικά στην περιοχή άνω και κάτω της αντίστοιχης θεωρητικής καμπύλης, κατά τρόπο τέτοιο ώστε αυτή να αντιστοιχεί

προσεγγιστικά στη μέση τιμή (Σχ. 5.3). Μεταξύ των κλάδων αυτών παρεμβάλλονται και τμήματα μικρότερης κλίσης. Από τον έλεγχο των τιμών προκύπτει ότι τα χαρακτηριστικά σημεία (ακρότατα και σημεία καμπής) της γραφικής παράστασης αντιστοιχούν στις θέσεις όπου στον έναν από τους δύο συνδυασμούς σημειώνεται αλλαγή της ομάδας των μέσων που λειτουργεί ως κρίσιμη.

Όσον αφορά στη διακύμανση, παρατηρείται ότι είναι εντονότερη στις μικρές αποστάσεις, αλλά αμβλύνεται σημαντικά όσο η απόσταση μεταφοράς αυξάνεται. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να αποδοθεί στην κατά περίπτωση επίδραση της απαραίτητης στρογγυλοποίησης του πλήθους των απαιτούμενων οχημάτων σε ακέραιη τιμή. Για εργασίες μικρών αποστάσεων και άρα μικρού πλήθους οχημάτων, η στρογγυλοποίηση αυτή δημιουργεί σημαντικά διαφοροποιημένο βαθμό συναρμογής και συσχετισμό κόστους – παραγωγής από τον υπολογιζόμενο ως βέλτιστο, για αυτό και η διακύμανση είναι έντονη. Αντίθετα, όσο η απόσταση μεταφοράς (και κατ' επέκταση ο αριθμός των οχημάτων) αυξάνεται, η στρογγυλοποίηση διαφοροποιεί λιγότερο τη σχέση κόστους – παραγωγής του συνδυασμού και ως εκ τούτου το εύρος της διακύμανσης παρουσιάζει σημαντική μείωση. Σε αυτό το πλαίσιο, σε περίπτωση που ο στόλος αριθμεί περισσότερους από έναν φορτωτές (k_A, k_B ≥2), οπότε είναι πολλαπλάσιου μεγέθους, η παρατηρούμενη διακύμανση εμφανίζεται κατά πολύ μειωμένη, ακόμα και στις μικρές αποστάσεις μεταφοράς (Σχ. 5.4).



Σχ. 5.3: Μεταβολή Δείκτη Σκοπιμότητας για διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς ξ=5,50 - θεωρητικοί και πραγματικοί συνδυασμοί για k_A=1

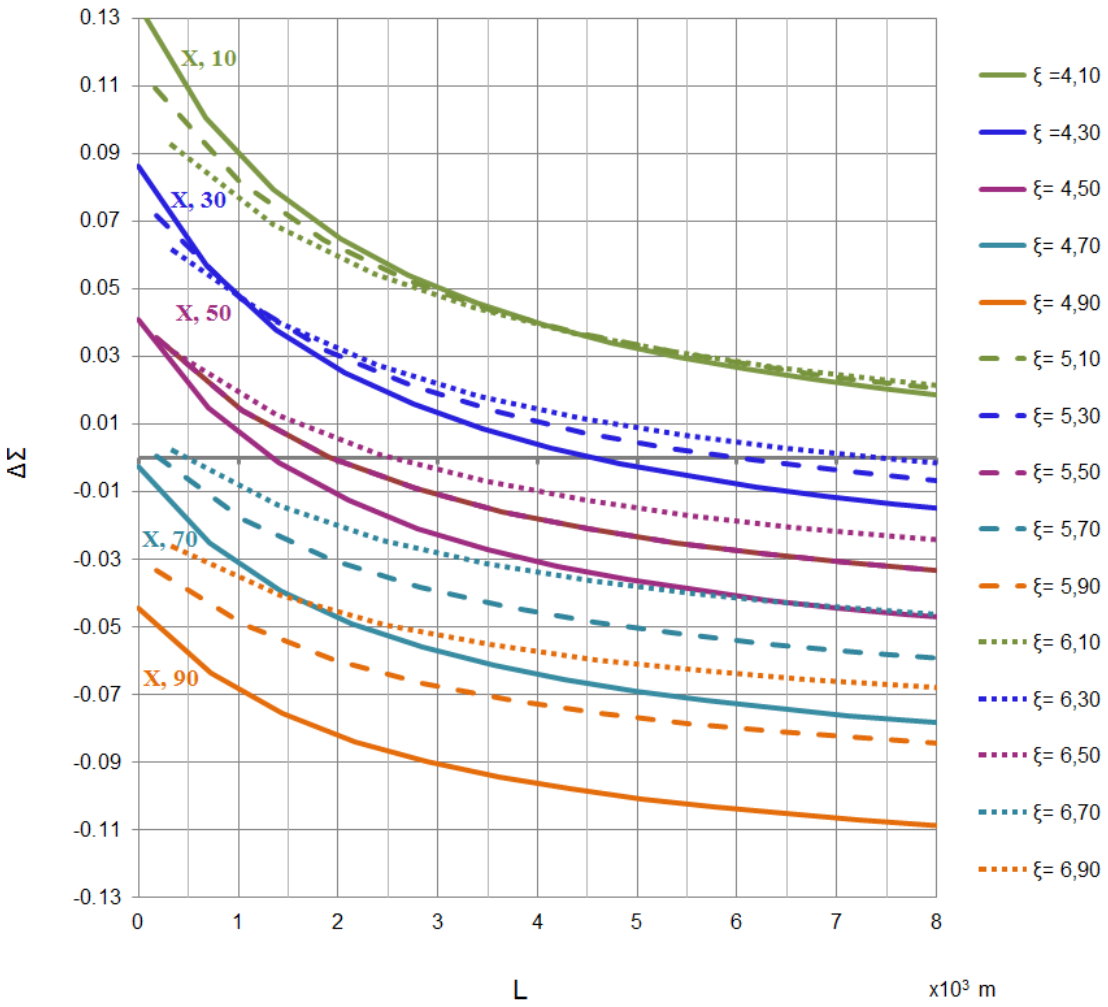


Σχ. 5.4: Μεταβολή Δείκτη Σκοπιμότητας για διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς ξ=5,50 - θεωρητικοί και πραγματικοί συνδυασμοί για k_A=1,2,3

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι με την εξαίρεση των εργασιών μικρής απόστασης και μικρής απαιτούμενης παραγωγής, οι θεωρητικοί συνδυασμοί είναι αντιπροσωπευτικοί των πραγματικών και άρα η υπόδειξη της θεωρητικής καμπύλης είναι αξιόπιστη. Στις προαναφερθείσες περιπτώσεις καθώς και σε αυτές που προκύπτει ΔΣ ≈ 0, κρίνεται σκόπιμη η εξέταση και των δύο μεθόδων φόρτωσης, ανεξαρτήτως της υπόδειξης της θεωρητικής καμπύλης.

5.5 Αριθμητική διερεύνηση – Ανάλυση Ευαισθησίας

Η εφαρμογή της μεθόδου σε πολλές περιπτώσεις συνδυασμών ξ,n,k οδηγεί στην εξαγωγή πιο συγκεκριμένων ποιοτικών και ποσοτικών συμπερασμάτων. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου για διάφορες τιμές του ξ, εντός του εμπειρικά αποδεκτού για την οικονομικότητα του σχεδιασμού εύρους τιμών [4, 7]. Οι συνεχείς καμπύλες αντιστοιχούν σε ακέραιο μέρος του ξ ίσο με το 4, οι διακεκομμένες σε ακέραιο μέρος του ξ ίσο με το 5 και οι στικτές σε ακέραιο μέρος του ξ ίσο με το 6. Η μεταβολή του δεκαδικού μέρους εκφράζεται με τη διαφοροποίηση των χρωμάτων.



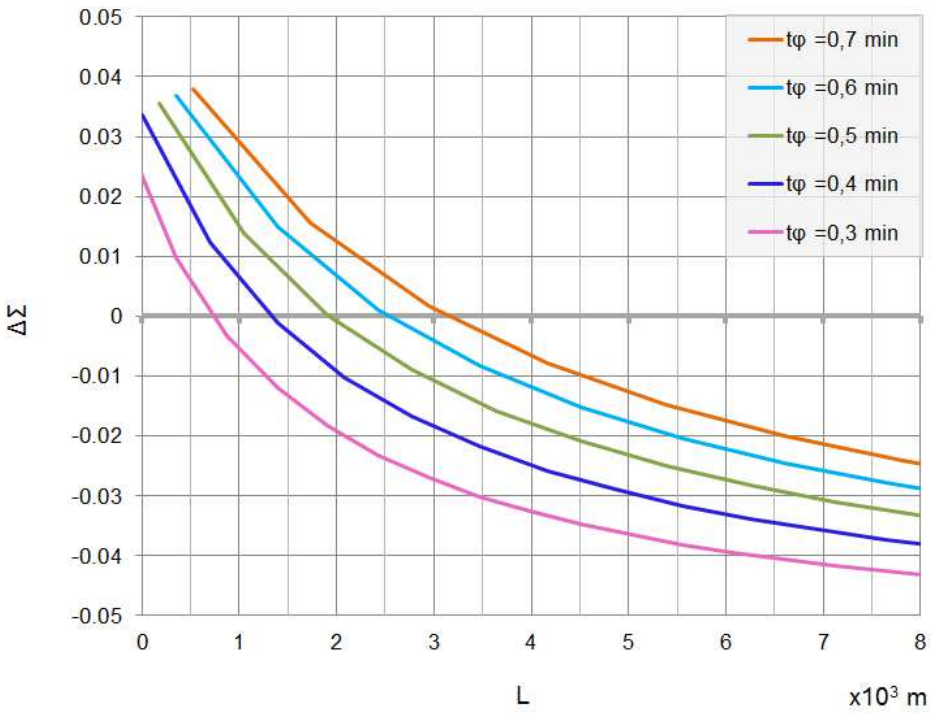
Σχ. 5.5: Διάγραμμα αξιολόγησης σκοπιμότητας μη πλήρους φόρτωσης

Η θέση των καμπυλών σε σχέση με τον οριζόντιο άξονα επιβεβαιώνει τη διαίσθηση ότι όσο περισσότερο φορτίο αντιστοιχεί στην πρόσθετη μη πλήρη φόρτωση, τόσο περισσότερο μειώνεται η οριακή τιμή της απόστασης για την οποία η εκτέλεσή της είναι οικονομικά σκόπιμη. Έτσι, η επιπλέον φόρτωση προκύπτει συμφέρουσα (ΔΣ<0) ακόμα και για πολύ μικρές αποστάσεις μεταφοράς εφόσον το ποσοστό πλήρωσης του κάδου είναι μεγαλύτερο του 70%, ενώ αντίθετα, για ποσοστό πλήρωσης της τάξεως του 20% και κάτω, η πρόσθετη φόρτωση δεν δικαιολογείται οικονομικά, για καμία απόσταση μεταφοράς εντός του εξεταζόμενου διαστήματος. Επιπλέον διαπιστώνεται ότι όσο μεγαλώνει ο λόγος του φορτίου της πρόσθετης φόρτωσης προς το συνολικό φορτίο, έστω λ_φ, τόσο μικραίνει η οριακή τιμή της απόστασης για την οποία η εκτέλεση της μη πλήρους φόρτωσης είναι οικονομικά σκόπιμη. Για παράδειγμα, στην περίπτωση ξ=4,5 (λ_φ=0,5/4,5=0,11) η μη πλήρης φόρτωση δικαιολογείται για απόσταση μεταφοράς μεγαλύτερη από 1.000 m. Αντίστοιχα, στην

περίπτωση ξ=5,5 (λ_φ=0,5/5,5=0,09) η επιπλέον φόρτωση είναι σκόπιμη για αποστάσεις μεγαλύτερες των 1.750m και στην περίπτωση ξ=6,5 (λ_φ=0,5/6,5=0,07) για αποστάσεις μεγαλύτερες των 2.000m. Σε κάθε περίπτωση, από το Σχ. 5.5 καθίσταται σαφές ότι η εκτέλεση της μη πλήρους φόρτωσης είναι σε πολλές περιπτώσεις συμφέρουσα και επομένως αποδεικνύεται ότι η απορριπτική θέση της βιβλιογραφίας στερείται πραγματικής βάσης.

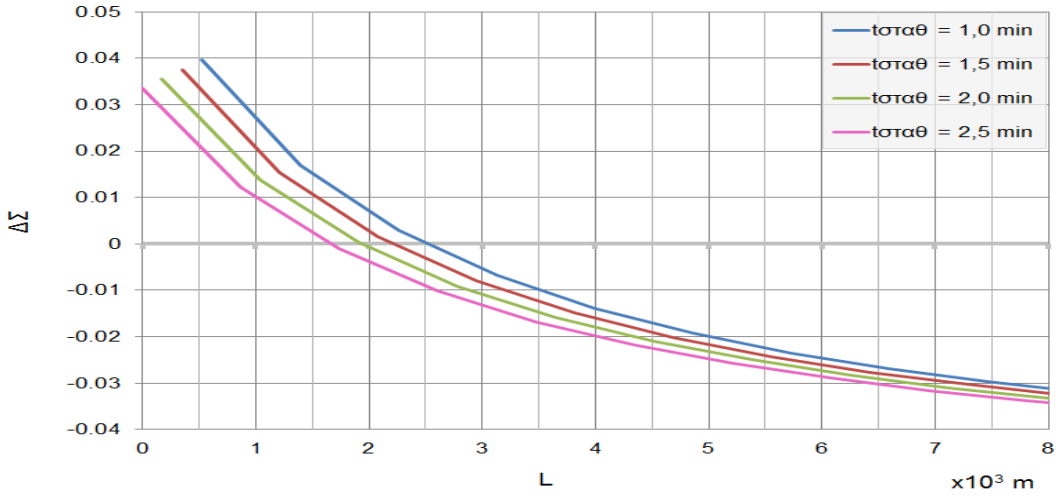
Επιπλέον, δεδομένου ότι η τιμή του ΔΣ επηρεάζεται από το χρόνο κύκλου του φορτωτή, t_φ, τον χρόνο ελιγμών και απόθεσης, $t_{\sigma\tau\alpha\theta}$, καθώς και τον λόγο ωριαίου κόστους φορτωτή προς ωριαίο κόστος οχήματος, λ_κ, είναι σκόπιμη η πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας ως προς τις τιμές των παραγόντων αυτών.

Στο Σχ. 5.6 παρουσιάζεται ενδεικτικά η μετατόπιση της καμπύλης για ξ=5,5 όταν διακύμανση η τιμή του t_φ (min) κυμαίνεται εντός του διαστήματος [0,3 , 0,7]. Διαπιστώνεται ότι η αύξηση ή μείωση του t_φ κατά 0,1min συνεπάγεται την αύξηση ή μείωση αντίστοιχα της τιμής του ΔΣ κατά 0,5-1,0 ποσοστιαία μονάδα. Για παράδειγμα για απόσταση μεταφοράς 2.000m, η αύξηση του t_φ από 0,5 σε 0,6 και 0,7 min οδηγεί σε αύξηση της τιμής του ΔΣ από 0 σε 0,008 και 0,013 αντίστοιχα, ενώ η μείωσή του από 0,5 σε 0,4 και 0,3 οδηγεί σε μείωση της τιμής του ΔΣ από 0 σε -0,01 και -0,02.



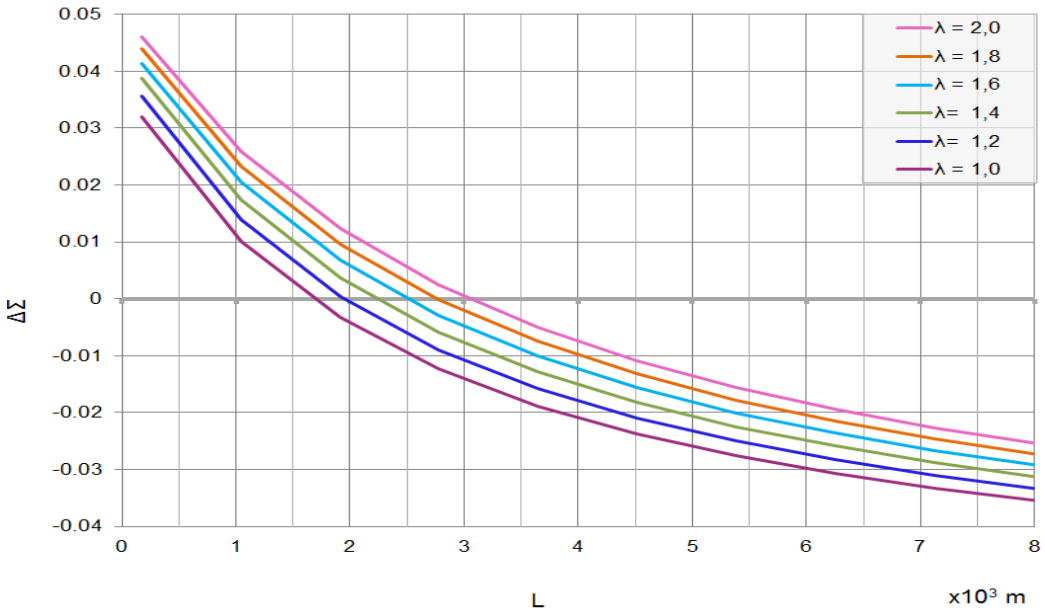
Σχ. 5.6: Επίδραση χρόνου κύκλου φορτωτή στην τιμή του Δείκτη Σκοπιμότητας – ξ=5,50

Παρομοίως, από το Σχ. 5.7 διαπιστώνεται ότι η αντίστοιχη επίδραση του $t_{σταθ}$ για ξ=5,5 είναι συγκριτικά μικρότερη. Η αύξηση ή μείωσή του κατά 0,5 min συνεπάγεται μείωση ή αύξηση αντίστοιχα της τιμής του ΔΣ κατά 0,4-0,7 ποσοστιαίες μονάδες για αποστάσεις έως 1.500m με σταδιακή μείωση της επίδρασης αυτής για μεγαλύτερες αποστάσεις.



Σχ. 5.7: Επίδραση σταθερού χρόνου οχήματος στην τιμή του Δείκτη Σκοπιμότητας – ξ=5,50

Αντιστοίχως, από το Σχ. 5.8 (ξ=5,5) διαπιστώνεται ότι η αύξηση του $λ_κ=c_φ/c_{ox}$ κατά 0,2 οδηγεί σε αύξηση του ΔΣ κατά 0,2-0,3 ποσοστιαίες μονάδες



Σχ. 5.8: Επίδραση λόγου κόστους φορτωτή-οχήματος στην τιμή του Δείκτη Σκοπιμότητας – ξ=5,50

5.6 Ταχεία επιλογή μεθόδου φόρτωσης – Ανάλυση Ευαισθησίας

Η παρούσα ενότητα στοχεύει να καταστήσει δυνατή την ταχύτερη επιλογή μεθόδου φόρτωσης, με τη σύνθεση υπολογιστικής διαδικασίας προσδιορισμού των σημείων (L, ξ) για τα οποία οι δύο μέθοδοι φόρτωσης είναι οικονομικά ισοδύναμες (ΔΣ=0). Τα σημεία αυτά πρακτικά συνθέτουν το σύνορο μεταξύ της περιοχής εφαρμογής της μεθόδου φόρτωσης Α και της περιοχής εφαρμογής της μεθόδου φόρτωσης Β, οπότε με την απεικόνισή τους προσδιορίζεται άμεσα για κάθε απόσταση μεταφοράς, η ελάχιστη απαιτούμενη πληρότητα του κάδου του φορτωτή κατά τη μη πλήρη φόρτωση, ώστε να είναι σκόπιμη η εκτέλεσή της.

Με τη θεώρηση των συνδυασμών μέσων Α (k_A, n_A) και Β (k'_B, n'_B), η συνθήκη ΔΣ=0 ισοδυναμεί με την ισότητα των τιμών μονάδας $c_{u,A}$ και $c_{u,B}$ (εξ. 5.20).

$$\frac{k_A * c_\varphi + n_A * c_{ox}}{k_A * Q_{\varphi,A}} = \frac{k'_B * c_\varphi + n'_B * c_{ox}}{k'_B * Q_{\varphi,B}} \tag{5.20}$$

Από την εξ. 5.20 προκύπτει ότι αν το ωριαίο κόστος των δύο συνδυασμών είναι διαφορετικό, δηλαδή ισχύει

$$k_A*c_\varphi+n_A*c_{ox} \neq k'_B*c_\varphi+n'_B*c_{ox} \rightarrow k_A*c_\varphi+n_A*c_{ox} = a*(k'_B*c_\varphi+n'_B*c_{ox}),$$

τότε θα πρέπει να είναι διαφορετικές και οι ωριαίες παραγωγές, δηλαδή να ισχύει $k_A * Q_{\varphi,A} \neq k'_B * Q_{\varphi,B} \rightarrow k_A * Q_{\varphi,A} = b*(k'_B * Q_{\varphi,B})$.

Ωστόσο, με δεδομένη την ισχύ της 5.20, συνάγεται ότι $a = b$. Άρα θέτοντας $a * k'_A = b * k'_A = k_A$ και $a * n'_A = n_A$ προκύπτει ότι

$$k_A*c_\varphi+n_A*c_{ox} = a*(k'_B*c_\varphi+n'_B*c_{ox}) = a*k'_B*c_\varphi+a*n'_B*c_{ox} = k_B*c_\varphi+n_B*c_{ox} \text{ και}$$

$k_A * Q_{\varphi,A} = b*(k'_B*Q_{\varphi,B}) = k_B * Q_{\varphi,B}$, οπότε είναι σαφές ότι για κάθε τυχαίο ζεύγος συνδυασμών Α (k_A, n_A) και Β (k'_B, n'_B) που ικανοποιούν την 5.20, υπάρχει ζεύγος συνδυασμών Α (k_A, n_A) και Β (k_B, n_B) για τους οποίους ισχύουν οι 5.21 και 5.22, δηλαδή ισχύει ταυτόχρονα η ισότητα παραγωγής και ωριαίου κόστους.

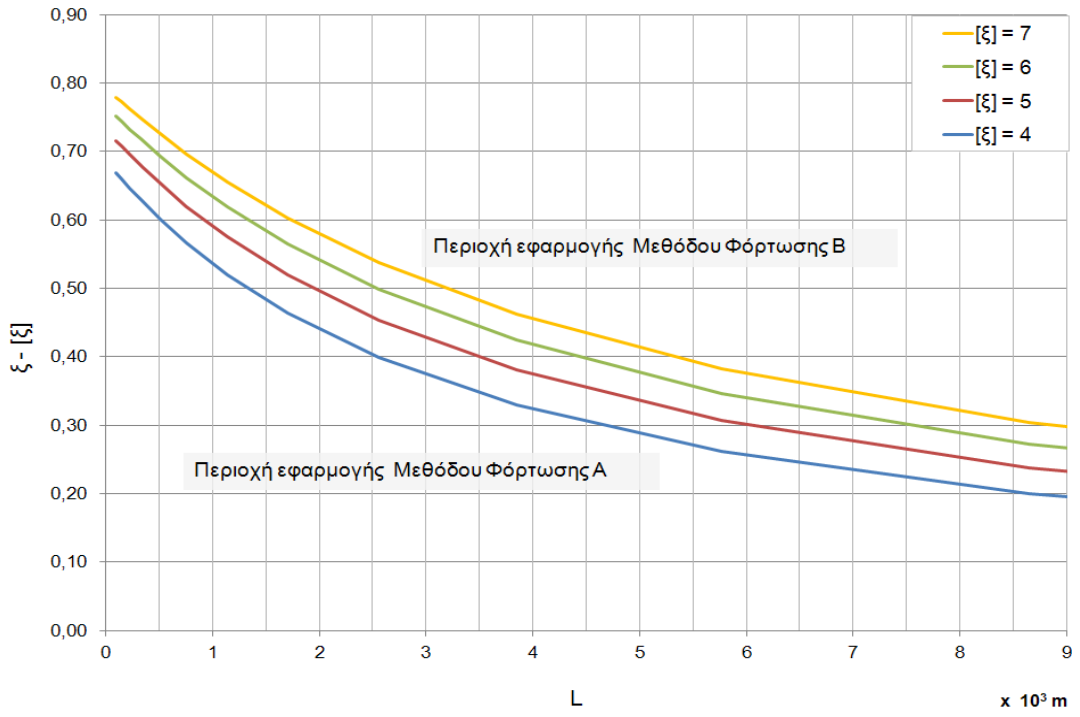
Επιπλέον, για τους συνδυασμούς αυτούς θεωρείται ότι ισχύει η απαίτηση βέλτιστης συναρμογής (εξ. 5.11 και 5.12).

$$\frac{k_A * c_\varphi + n_A * c_{ox}}{k_A * Q_{\varphi,A}} = \frac{k_B * c_\varphi + n_B * c_{ox}}{k_B * Q_{\varphi,B}} \Leftrightarrow \begin{cases} k_A * c_\varphi + n_A * c_{ox} = k_B * c_\varphi + n_B * c_{ox} & (5.21) \\ k_A * Q_{\varphi,A} = k_B * Q_{\varphi,B} & (5.22) \end{cases}$$

Κατόπιν σειράς μετασχηματισμών των συνθηκών των εξ. 5.11, 5.12, 5.21, 5.22 λαμβάνοντας υπόψη τις εξ. 5.14 – 5.17, προκύπτει η μαθηματική έκφραση της ζητούμενης συνάρτησης (L- ξ) (εξ. 5.23).

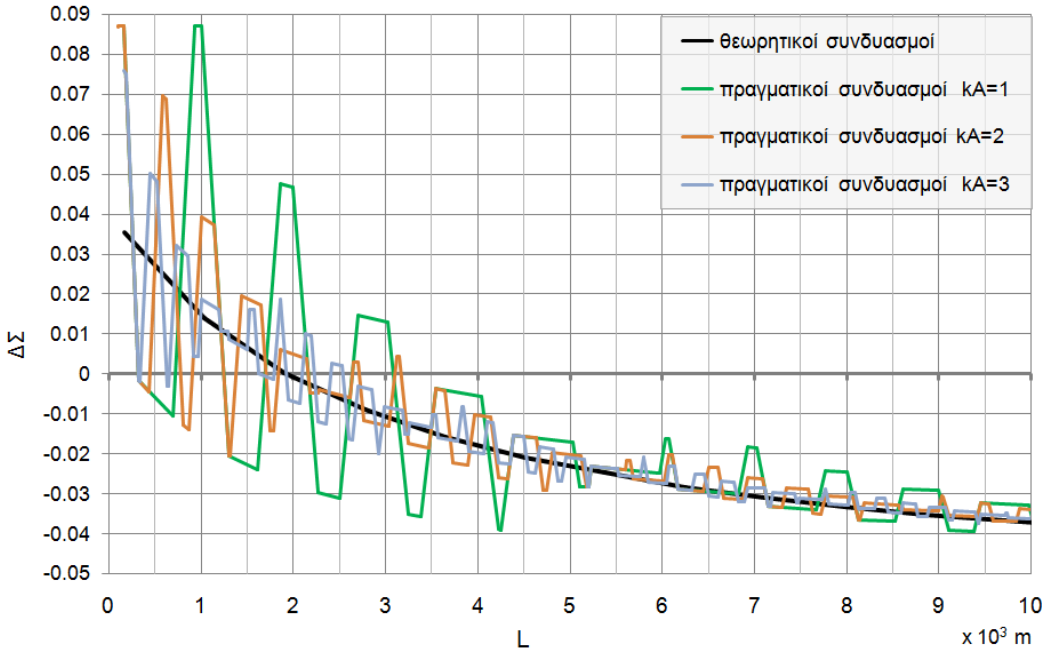
$$\xi = [\xi] + \frac{[\xi] * t_\varphi * (\frac{c_\varphi}{c_{ox}} + 1)}{[\xi] * t_\varphi * (\frac{c_\varphi}{c_{ox}} + 1) + t_{\sigma\tau\alpha\theta} + \frac{L}{U_{\varepsilon\pi,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\mu\varepsilon\tau}} + \frac{L}{U_{\varepsilon\pi,max} * \eta_{\tau\alpha\chi,\varepsilon\pi}}} \quad (5.23)$$

Στο Σχ. 5.9 απεικονίζονται ενδεικτικά με βάση τα δεδομένα του Πιν. 5.3, τα σύνορα των περιοχών εφαρμογής των μεθόδων φόρτωσης Α και Β, όπως προκύπτουν από την εξ. 5.23 για [ξ]=4, 5, 6, 7. Η μορφή τους επιβεβαιώνει ότι η ελάχιστη απαιτούμενη πλήρωση του κάδου στη μερική φόρτωση ξ-[ξ] μειώνεται με την αύξηση της απόστασης μεταφοράς. Επιπλέον, η προς τα πάνω μετατόπιση του συνόρου μεταξύ των περιοχών με την αύξηση του αριθμού των πλήρων φορτώσεων είναι ενδεικτική της εύλογης αναλογίας μεταξύ της ποσοτικής συμβολής της μερικής φόρτωσης και της σκοπιμότητας εκτέλεσής της.



Σχ. 5.9: Διάγραμμα ταχείας επιλογής μεθόδου φόρτωσης – θεωρητικοί συνδυασμοί

Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη διερεύνηση και δεδομένης της διατήρησης της παραδοχής βέλτιστης συναρμογής για τους συνδυασμούς Α και Β, ενδείκνυται και σε αυτήν την περίπτωση η συγκριτική αποτύπωση της θεωρητικής και της πραγματικής μορφής του διαγράμματος. Από την απεικόνιση των σημείων (L, ξ) που αντιστοιχούν σε πραγματικούς συνδυασμούς ελάχιστου κόστους Α, Β με την ίδια τιμή μονάδας, προκύπτει τεθλασμένη γραμμή μορφής αντίστοιχης με αυτήν που αναλύθηκε στην προηγούμενη διερεύνηση (Σχ. 5.10). Από την παρατήρηση της γραφικής παράστασης καθίσταται σαφές ότι η απόκλιση θεωρητικού και πραγματικού βέλτιστου σχεδιασμού μειώνεται σημαντικά για k≥2 και ιδιαίτερα για μεγαλύτερες αποστάσεις μεταφοράς, οπότε οι υποδείξεις της θεωρητικής καμπύλης είναι απολύτως αξιόπιστες. Για μικρές αποστάσεις μεταφοράς προτείνεται, όπως και προηγούμενα, η εξέταση αμφότερων των μεθόδων φόρτωσης.

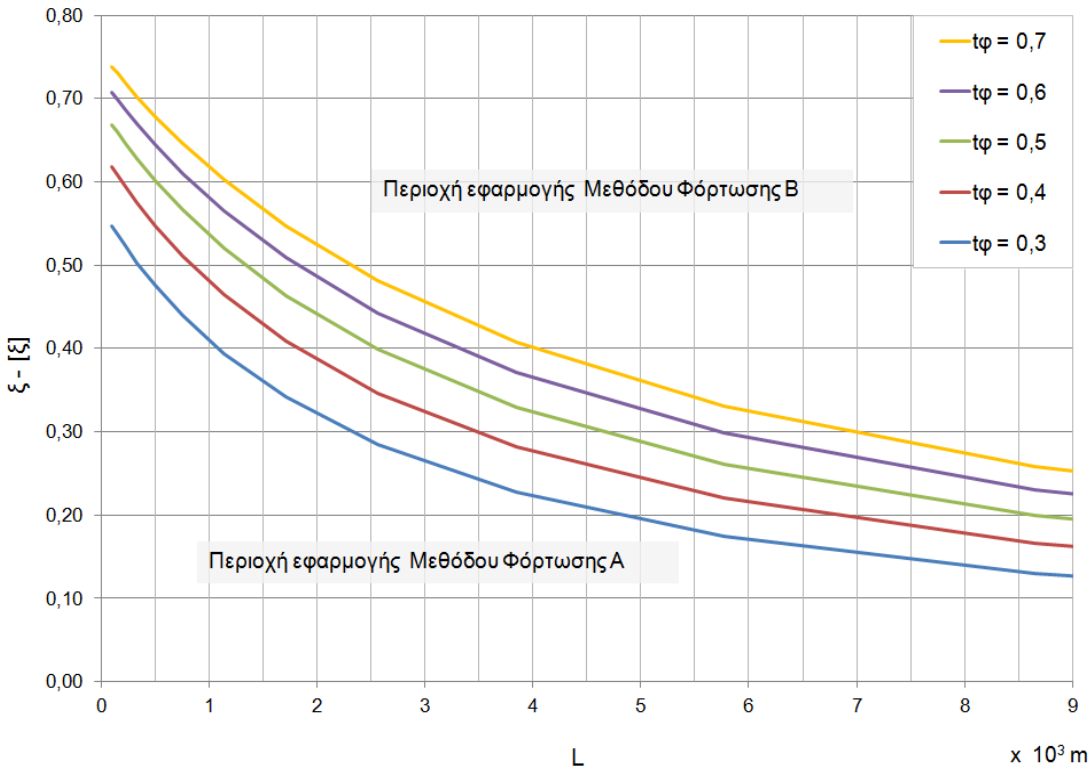


Σχ. 5.10: Διάγραμμα ταχείας επιλογής μεθόδου φόρτωσης – θεωρητικοί και πραγματικοί συνδυασμοί για k_A=1,2,3

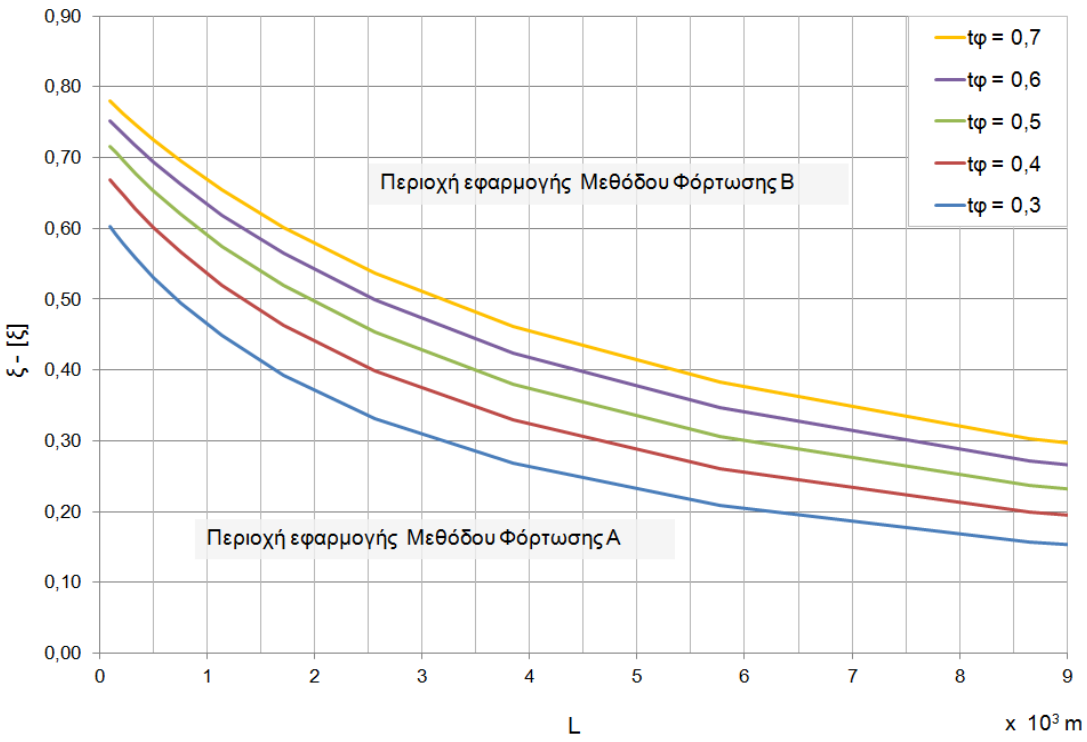
Δεδομένου ότι τα ποσοτικά χαρακτηριστικά της ανάλυσης που προηγήθηκε αποτελούν συνάρτηση των μεγεθών του Πιν. 5.3, είναι σκόπιμη η διαφοροποίηση κάποιων εξ αυτών ώστε να αποτιμηθεί η επίδρασή τους στην επιλογή της μεθόδου φόρτωσης. Όπως και προηγούμενα, η ανάλυση ευαισθησίας επικεντρώνεται στο χρόνο κύκλου του φορτωτή, $t_φ$, στο χρόνο ελιγμών και απόθεσης υλικού, $t_{σταθ}$, καθώς και στο λόγο ωριαίου κόστους φορτωτή προς ωριαίο κόστος οχήματος, $λ_κ$.

Για τιμές του t_φ εντός του διαστήματος των [0,3 , 0,7] min και σταθερές τις λοιπές παραμέτρους του προβλήματος, διαπιστώνεται ότι καθώς ο χρόνος φόρτωσης αυξάνεται, το σύνορο μεταξύ των περιοχών εφαρμογής των δύο μεθόδων φόρτωσης μετατοπίζεται προς τα πάνω (Σχ. 5.11, 5.12, 5.13), οπότε η περιοχή εφαρμογής της μεθόδου φόρτωσης Α αυξάνεται.

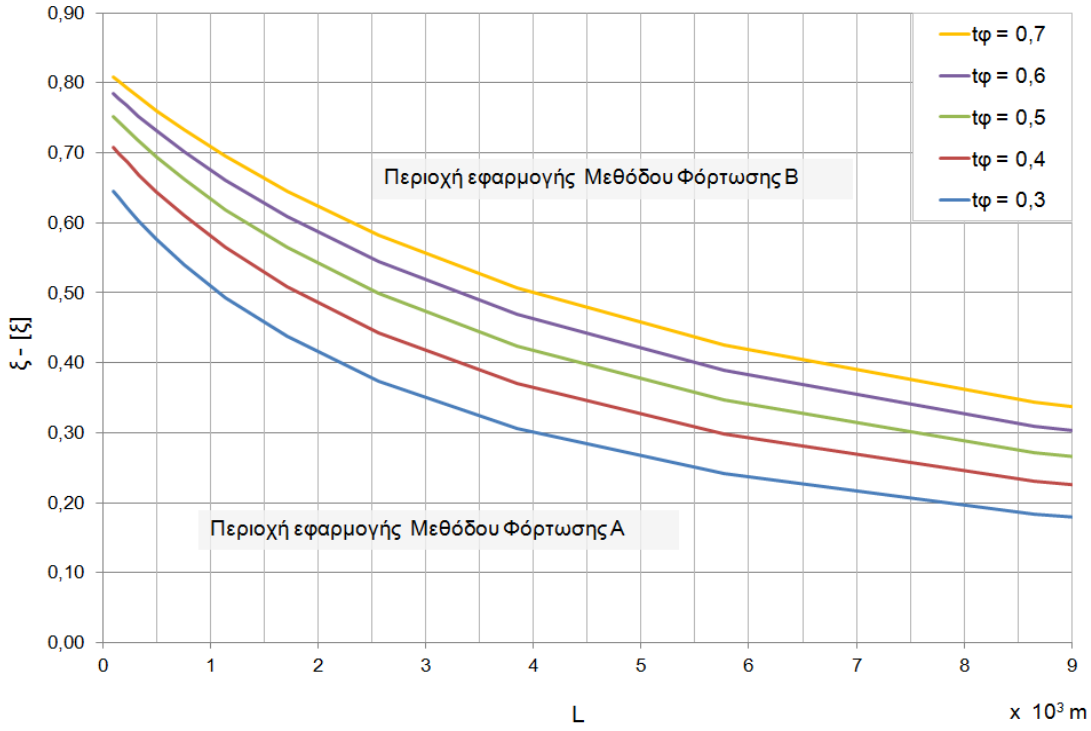
Η συμπεριφορά αυτή ερμηνεύεται από το γεγονός ότι όσο αυξάνεται η διάρκεια της κάθε φόρτωσης, τόσο μειώνεται η οικονομική σκοπιμότητα της εκτέλεσης μίας επιπλέον φόρτωσης. Ισοδύναμα, η ελάχιστη πλήρωση του κάδου για εκτέλεση της μερικής φόρτωσης για την ίδια απόσταση μεταφοράς αυξάνεται με την αύξηση του χρόνου φόρτωσης.



Σχ. 5.11: Επίδραση μεταβολής χρόνου κύκλου φορτωτή στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=4



Σχ. 5.12: Επίδραση μεταβολής χρόνου κύκλου φορτωτή στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=5

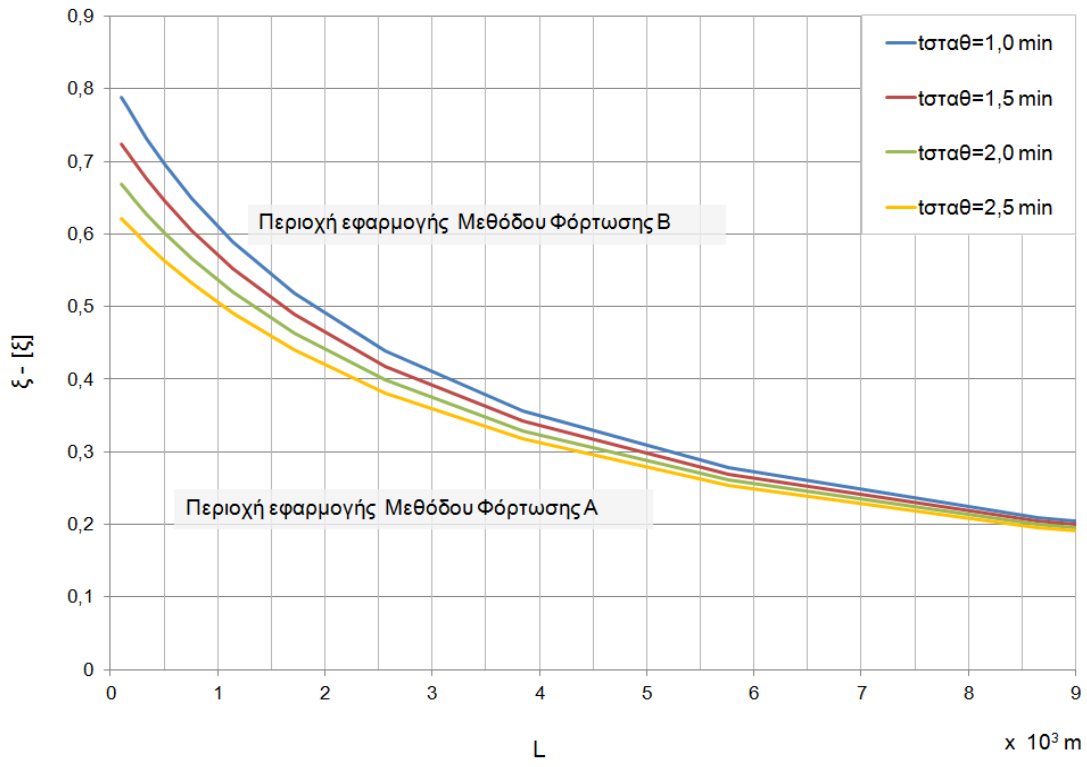


Σχ. 5.13: Επίδραση μεταβολής χρόνου κύκλου φορτωτή στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=6

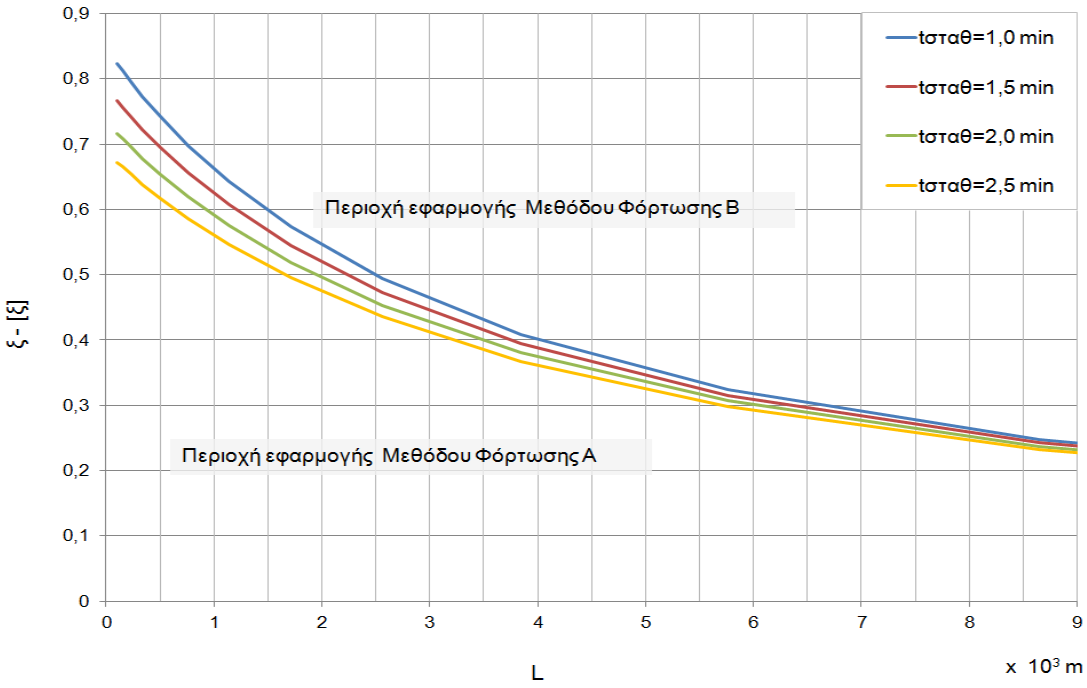
Όσον αφορά στην επίδραση του $t_{σταθ}$, από τα Σχ. 5.14, 5.15, 5.16 διαπιστώνεται ότι η αύξηση της τιμής του μετατοπίζει ελαφρά το σύνορο των περιοχών προς τα κάτω, αυξάνοντας την περιοχή εφαρμογής της μεθόδου φόρτωσης Β και μάλιστα σε μεγαλύτερο βαθμό στις μικρές αποστάσεις. Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται με το γεγονός ότι η πλήρης αξιοποίηση της μεταφορικής ικανότητας του οχήματος είναι περισσότερο σκόπιμη όσο αυξάνεται το αναπόφευκτο μη παραγωγικό μέρος του χρόνου κύκλου του οχήματος.

Αναλόγως, με την αύξηση του λόγου $λ_κ$, δηλαδή του κόστους του φορτωτή προς το κόστος του οχήματος, διαπιστώνεται ότι το σύνορο των περιοχών μετατοπίζεται προς τα πάνω, αυξάνοντας την περιοχή εφαρμογής της μεθόδου φόρτωσης Α (Σχ.5.17, 5.18, 5.19). Η δυσμενής επίδραση της αύξησης του κόστους του φορτωτή στις προϋποθέσεις εκτέλεσης της μη πλήρους φόρτωσης, δικαιολογείται από το γεγονός ότι η μερική φόρτωση συνεπάγεται τη μερική μόνο εκμετάλλευση του φορτωτή.

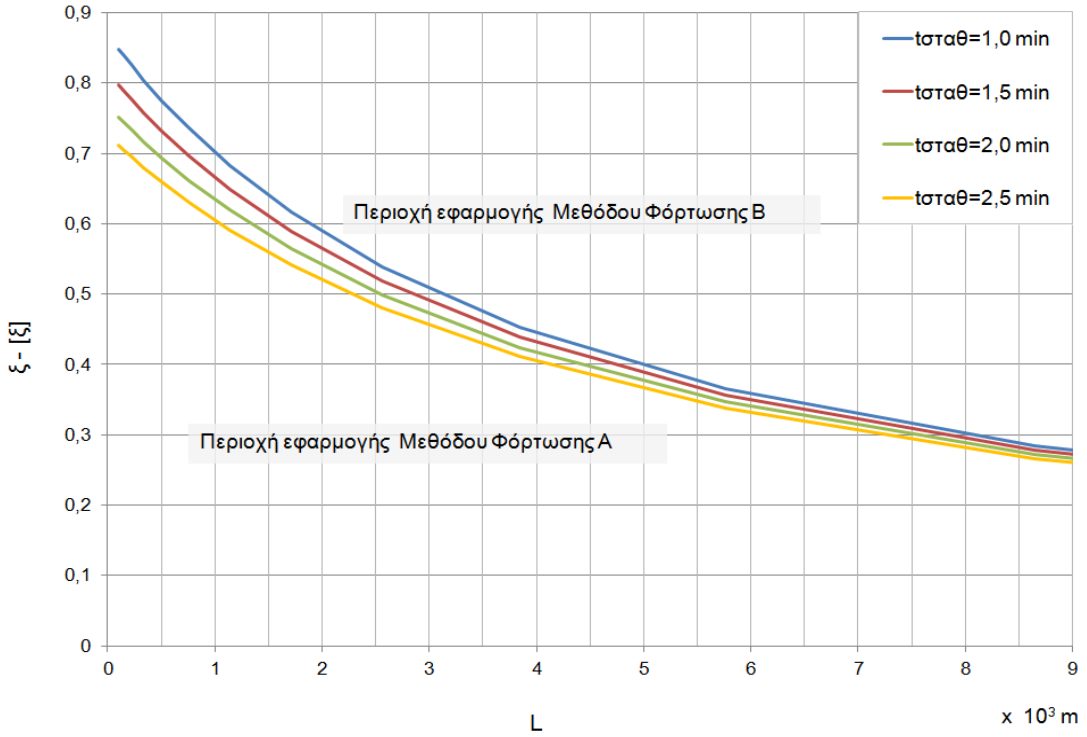
Από τα παραπάνω καθίσταται σαφής η αυξημένη επίδραση των χαρακτηριστικών του φορτωτή (χρόνος κύκλου, ωριαίο κόστος) στη σκοπιμότητα εκτέλεσης της πρόσθετης φόρτωσης.



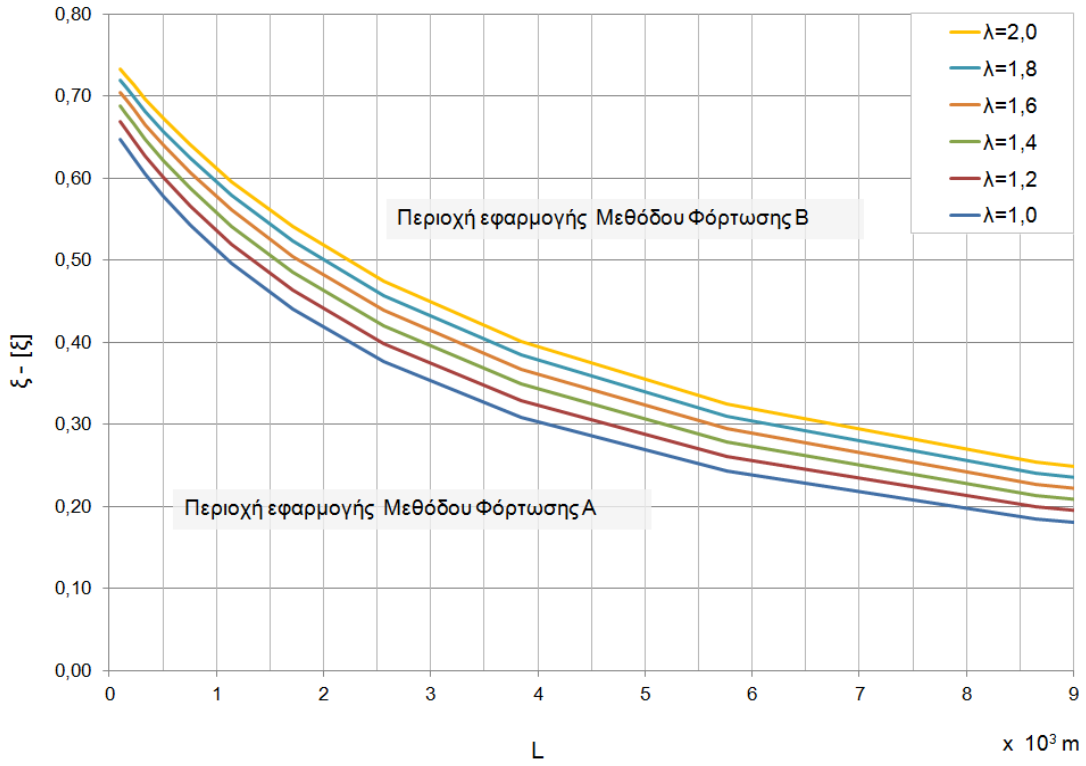
Σχ. 5.14: Επίδραση μεταβολής σταθερού χρόνου οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=4



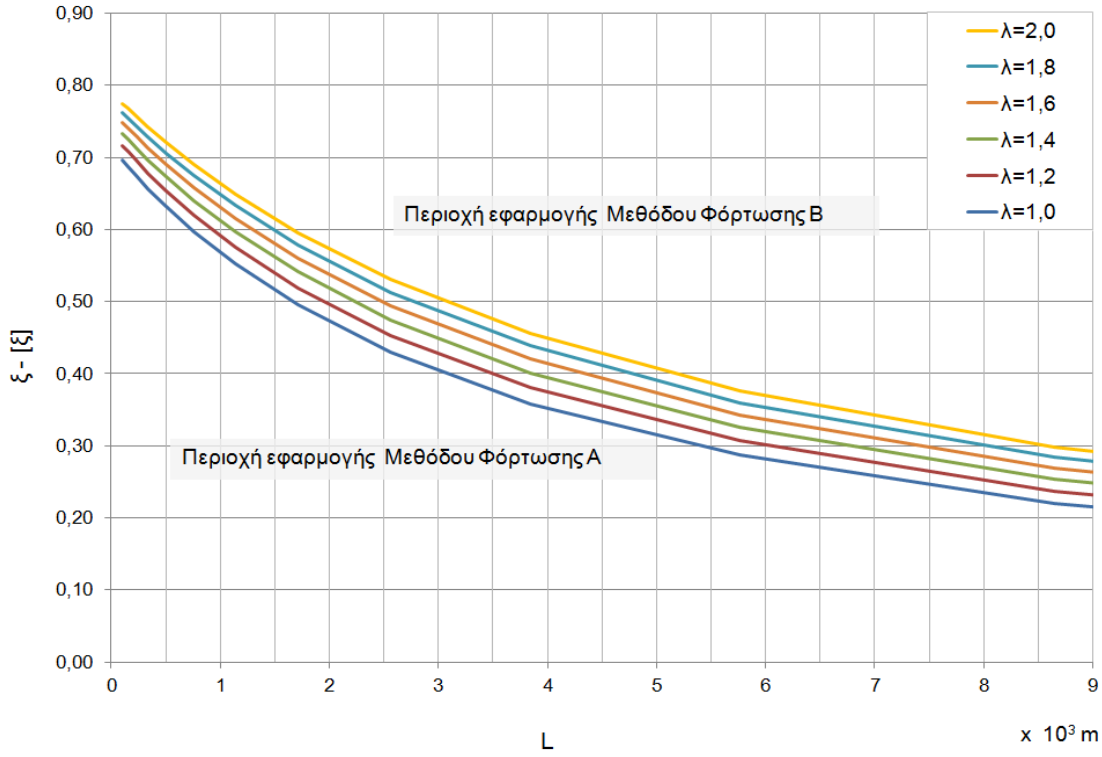
Σχ. 5.15: Επίδραση μεταβολής σταθερού χρόνου οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=5



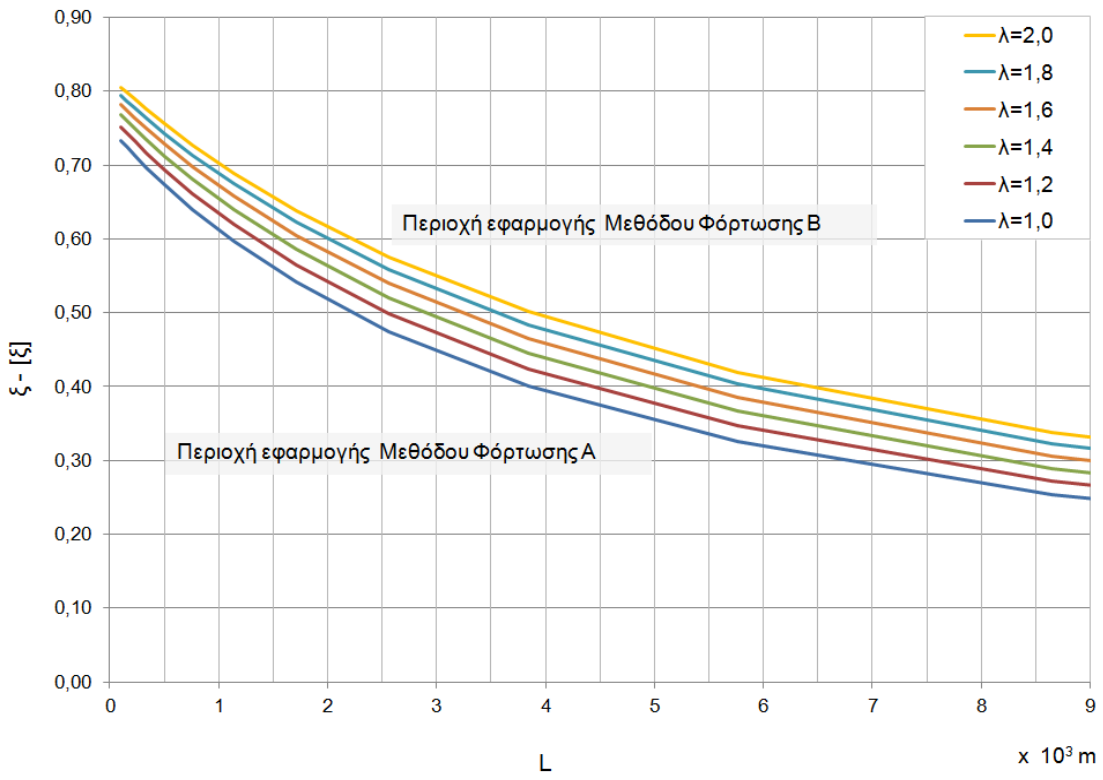
Σχ. 5.16: Επίδραση μεταβολής σταθερού χρόνου οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=6



Σχ. 5.17: Επίδραση μεταβολής λόγου κόστους φορτωτή-οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=4



Σχ. 5.18: Επίδραση μεταβολής λόγου κόστους φορτωτή-οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=5



Σχ. 5.19: Επίδραση μεταβολής λόγου κόστους φορτωτή-οχήματος στην επιλογή μεθόδου φόρτωσης - [ξ]=6

5.7 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο διερευνήθηκε η σκοπιμότητα εκτέλεσης της τελευταίας μη πλήρους φόρτωσης που πιθανότατα απαιτείται για την ολοκλήρωση της φόρτωσης του οχήματος. Αναγνωρίστηκαν οι δύο εναλλακτικές μέθοδοι φόρτωσης και προσδιορίστηκαν οι παραδοχές σύγκρισής τους. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε αλγόριθμος για την εκτίμηση της μεταβολής του κόστους της εργασίας υπό διαφορετική μέθοδο φόρτωσης και αλγόριθμος προσδιορισμού της ελάχιστης πλήρωσης του κάδου του φορτωτή, ώστε η εκτέλεση της μερικής φόρτωσης να είναι οικονομικά σκόπιμη για συγκεκριμένη απόσταση μεταφοράς. Από την εκτεταμένη αριθμητική διερεύνηση διαπιστώθηκε ότι, παρά αντίθετες αναφορές της βιβλιογραφίας, η εκτέλεση της μερικής φόρτωσης είναι πιθανό να οδηγεί σε μείωση της τιμής μονάδας της εργασίας μετακίνησης εδαφικού υλικού από 1% έως και 10%, αναλόγως της απόστασης μεταφοράς και του όγκου της μερικής φόρτωσης. Επίσης αναγνωρίστηκε με ανάλυση ευαισθησίας η επίδραση στην οικονομικότητα της μερικής φόρτωσης παραγόντων όπως ο χρόνος κύκλου και το ωριαίο κόστος του φορτωτή.

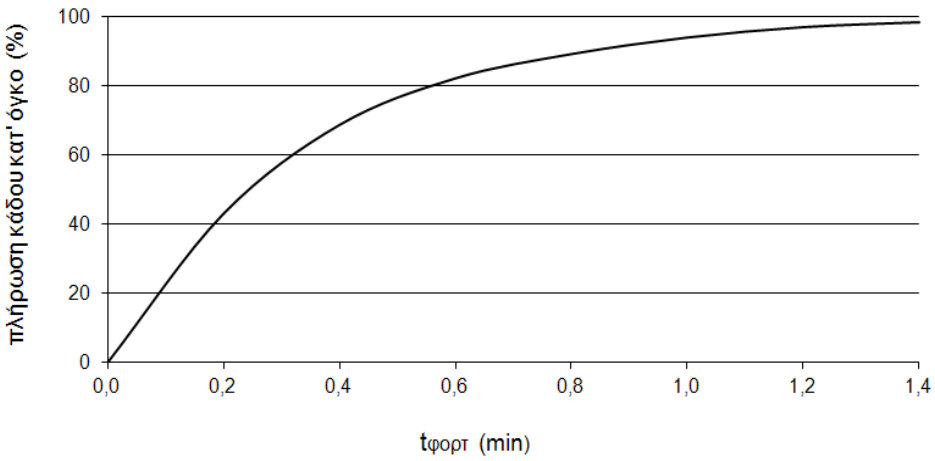
6. ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΦΟΡΤΩΣΗΣ ΑΠΟΞΕΣΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

6.1 Εισαγωγή

Κατά τη φόρτωση συμβατικού αποξεστικού οχήματος, ο ρυθμός της πλήρωσης της σκάφης βαίνει μειούμενος λόγω του ότι η εισχώρηση νέου υλικού εμποδίζεται από τη διαρκώς αυξανόμενη αντίσταση του περιεχομένου της. Κατά συνέπεια, η συνέχιση της φόρτωσης μέχρι την πλήρωση της σκάφης καθίσταται αντιοικονομική, οπότε προκύπτει η ανάγκη βελτιστοποίησης του χρόνου φόρτωσης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται κριτική ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας και αναπτύσσεται νέα μέθοδος προσδιορισμού του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης της σκάφης του αποξεστικού οχήματος, σε αυτοδύναμη εργασία ή σε συνδυασμό με προωθητή - ταύρο.

6.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

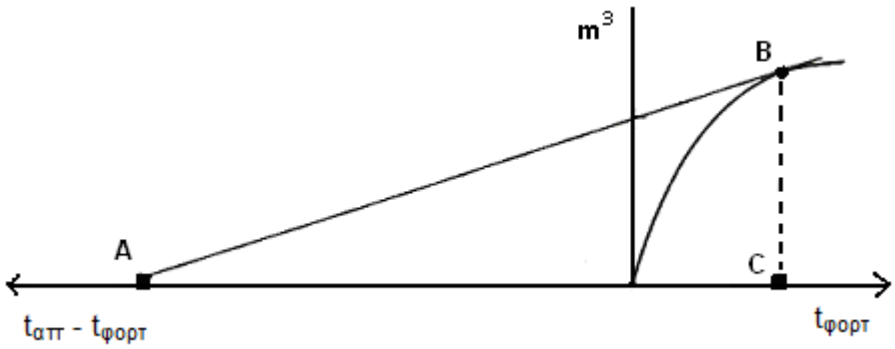
Η πρόοδος της πλήρωσης της σκάφης αποξεστικού οχήματος κατά τη φόρτωση απεικονίζεται μέσω της καμπύλης φόρτωσης, η οποία προκύπτει με επί τόπου διαδοχικές μετρήσεις χρόνου και αντίστοιχου όγκου. Η ακριβής γεωμετρία της καμπύλης εξαρτάται από τις ιδιότητες του εδάφους και τα χαρακτηριστικά του μηχανήματος, ωστόσο η τυπική μορφή της παρουσιάζεται στο Σχ. 6.1 (Carmichael 1987).



Σχ. 6.1: Τυπική μορφή καμπύλης φόρτωσης αποξεστικού οχήματος

Έρευνες πεδίου της Εταιρείας Caterpillar έχουν δείξει ότι η συνέχιση της φόρτωσης μέχρι την πλήρωση της σκάφης, συνεπάγεται μείωση της ωριαίας παραγωγής του αποξεστικού οχήματος. Συνεπώς, προκύπτει η ανάγκη βελτιστοποίησης του χρόνου φόρτωσης δηλαδή προσδιορισμού του χρόνου για τον οποίο επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση του κόστους μονάδας παραγωγής.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης που απαντάται στα σχετικά εγχειρίδια (Day and Benjamin 1991, Singh 1993, Nunnally 2007) βασίζεται στο γράφημα της καμπύλης φόρτωσης για τη συγκεκριμένη εργασία (Σχ. 6.2). Πιο συγκεκριμένα, επί του αρνητικού οριζόντιου ημιάξονα προσδιορίζεται σημείο το οποίο αντιστοιχεί στο χρόνο κύκλου του αποξεστικού $t_{απ}$ μειωμένο κατά το χρόνο φόρτωσης $t_{φορτ}$, δηλαδή στο άθροισμα των χρόνων μετάβασης, επιστροφής, απόθεσης και ελιγμών (σημείο Α). Από το σημείο αυτό άγεται εφαπτομένη στην καμπύλη φόρτωσης. Το σημείο επαφής (σημείο Β) προβάλλεται στον οριζόντιο άξονα και η προβολή του (σημείο C) αντιστοιχεί στο βέλτιστο χρόνο φόρτωσης. Η παραπάνω διαδικασία βασίζεται στο γεγονός ότι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος ΑΒ εκφράζει την παραγωγή του αποξεστικού οχήματος (μεταφερόμενος όγκος προς χρόνο) οπότε η μεγιστοποίηση της κλίσης που επιτυγχάνεται στο σημείο Β αντιστοιχεί στη μέγιστη παραγωγή.



Σχ. 6.2: Γραφικός προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αποξεστικού οχήματος

Είναι σαφές ωστόσο ότι η μέθοδος βασίζεται στην παραδοχή ότι ο χρόνος κύκλου του αποξεστικού οχήματος μετά τη φόρτωση είναι ανεξάρτητος του χρόνου φόρτωσής του. Εντούτοις, η παραδοχή αυτή δεν είναι αληθής για το χρόνο μετάβασης, καθώς, όπως ευχερώς διαπιστώνεται από τις εξ. 2.7 και 2.11, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ταχύτητα κίνησης του μηχανήματος, όπως και η αντίστοιχη μέση, εξαρτώνται από το μεταφερόμενο φορτίο. Οι συνέπειες της εξάρτησης αυτής δεν είναι αμελητέες, όπως ενδεικτικά επιβεβαιώνει και το ακόλουθο αριθμητικό παράδειγμα.

Υποθέτοντας τα δεδομένα του Πίνακα 6.1, από την εξ. 2.7 προκύπτει ότι για φορτίο ίσο με το 90% της ικανότητας του αποξεστικού, η μέγιστη ταχύτητα κίνησης κατά τη μετάβαση $U_{max,\mu\varepsilon\tau}$ είναι ίση με 23,9 km/h, ενώ όταν το φορτίο μειωθεί στο 70% της ικανότητας η τιμή της αυξάνεται στα 26,3 km/h, δηλαδή κατά περίπου 10%. Η παρατηρούμενη διαφορά στη μέση ταχύτητα $U_{\mu\varepsilon\tau}$ (εξ. 2.11), δηλαδή μετά τον προσδιορισμό του συντελεστή ταχύτητας $\eta_{\tau\alpha\chi,\ \mu\varepsilon\tau}$ (Σχ. 2.9), είναι της τάξης του 20%.

Πιν. 6.1: Δεδομένα παραδείγματος

Αποξεστικό όχημα			Συνθήκες	
N_e (PS)	$B_{\alpha\pi}$ (tn)	$B_{ox,max}$ (tn)	w_r (Kp/Mp)	w_s (Kp/Mp)
450	46,48	37,28	50	10

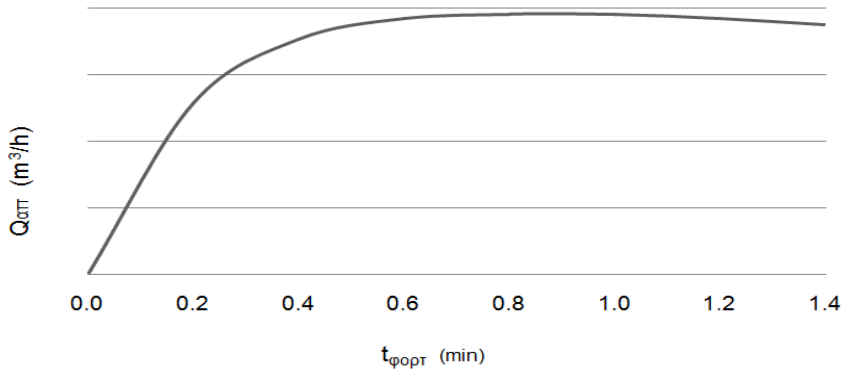
Η σημαντική αυτή διαφοροποίηση είναι ενδεικτική της θεωρητικής αστοχίας της υφιστάμενης γραφικής μεθόδου και θεμελιώνει την ανάγκη διατύπωσης νέας μεθόδου προσδιορισμού του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης του αποξεστικού, ώστε να μην αμελείται η επίδραση του φορτίου στο χρόνο κύκλου στο κόστος μονάδας παραγωγή.

6.3 Αλγοριθμικός προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αυτοδύναμου αποξεστικού οχήματος

Αν $Q_{\alpha\pi}(t_{\varphi o\rho\tau})$ η συνάρτηση της ωριαίας παραγωγής του αποξεστικού με μεταβλητή το χρόνο φόρτωσης, ο ζητούμενος βέλτιστος χρόνος $t_{\alpha\pi,\beta\varepsilon\lambda\tau}$ αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή της, δηλαδή ισχύει $Q_{\alpha\pi,max}=Q_{\alpha\pi}(t_{\alpha\pi,\beta\varepsilon\lambda\tau})$. Η αναλυτική έκφραση της $Q_{\alpha\pi}(t_{\varphi o\rho\tau})$ δεν είναι γνωστή, ωστόσο η γραφική της παράσταση μπορεί να προσδιοριστεί με εφαρμογή των βασικών εξισώσεων της προσδιοριστικής Λειτουργικής Ανάλυσης.

Συγκεκριμένα, για τυχαίες και εύλογα απέχουσες τιμές του χρόνου φόρτωσης $t_{\varphi o\rho\tau}$ (π.χ. 0,2min ώστε να μπορεί να μετρηθεί η αύξηση του όγκου του υλικού κατά τη φόρτωση) προσδιορίζεται το αντίστοιχο φορτίο από την καμπύλη φόρτωσης και βάσει αυτού γίνεται ακριβής υπολογισμός της μέσης ταχύτητας κίνησης σε μετάβαση και επιστροφή (εξ. 2.7, 2.8, 2.11 και 2.12). Ακολουθεί ο υπολογισμός του χρόνου κύκλου (εξ. 2.14) και της αντίστοιχης ωριαίας παραγωγής του αποξεστικού $Q_{\alpha\pi}$ (εξ. 2.15), οπότε από τα σημεία $(t_{\varphi o\rho\tau},Q_{\alpha\pi})$ προκύπτει η γραφική παράσταση της $Q_{\alpha\pi}(t_{\varphi o\rho\tau})$. Η τυπική μορφή της (Σχ. 6.3) επιβεβαιώνει ότι η συνέχιση της φόρτωσης πέραν συγκεκριμένου χρονικού σημείου συνεπάγεται μείωση της παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα, καθίσταται σαφές ότι το ζητούμενο μέγιστο είναι και το μοναδικό μέγιστο της συνάρτησης.

Δεδομένων των παραπάνω, ο προσδιορισμός του $Q_{απ,max}$ ανάγεται στην επίλυση προβλήματος μονοδιάστατης μεγιστοποίησης με τη βοήθεια κατάλληλου επαναληπτικού αλγορίθμου, επιλογή η οποία πλεονεκτεί έναντι άλλων μεθόδων καθώς δεν απαιτεί γνώση της αναλυτικής έκφρασης της συνάρτησης ή της παραγώγου της.

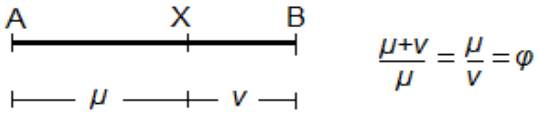


Σχ. 6.3: Συνάρτηση ωριαίας παραγωγής αποξεστικού οχήματος με το χρόνο φόρτωσης

Μία πρώτη προσέγγιση του παραπάνω προβλήματος έχει γίνει από τον Λαμπρόπουλο (1991) με χρήση της ακολουθίας Fibonacci. Η ακολουθία Fibonacci ορίζεται από τον αναδρομικό τύπο $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ με F(0)=0 και F(1)=1, δηλαδή οι δύο πρώτοι αριθμοί της ακολουθίας είναι το 0 και το 1 και κάθε επόμενος αριθμός προκύπτει ως άθροισμα των δύο προηγούμενων. Οι αριθμοί Fibonacci προκύπτουν αναλυτικά από τη σχέση $F_n = \frac{1}{\sqrt{5}}\left\{\left[\frac{1+\sqrt{5}}{2}\right]^{n+1} - \left[\frac{1-\sqrt{5}}{2}\right]^{n+1}\right\}$. Η αναλογία δύο διαδοχικών όρων της ακολουθίας συγκλίνει στη χρυσή αναλογία ή Χρυσή Τομή $\varphi=\frac{1+\sqrt{5}}{2} \cong 1{,}618$, δηλαδή ισχύει $\lim_{n\to\infty}\frac{F_{n+1}}{F_n} = \phi \cong 1{,}618$.

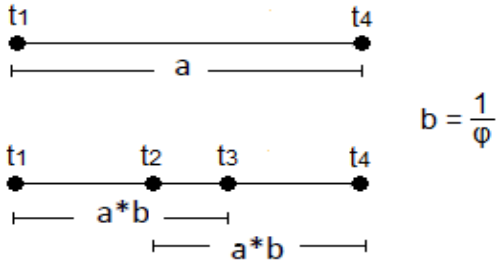
Η Χρυσή Τομή υποδεικνύει το σημείο Χ στο οποίο πρέπει να διαιρεθεί ένα ευθύγραμμο τμήμα ΑΒ, ώστε ο λόγος του ως προς το μεγαλύτερο τμήμα να ισούται με το λόγο του μεγαλύτερου τμήματος προς το μικρότερο (Σχ. 6.4). Η μαθηματική έκφραση της παραπάνω γεωμετρικής συνθήκης οδηγεί σε δευτεροβάθμια εξίσωση της οποίας η μοναδική θετική ρίζα ισούται με $\varphi=\frac{1+\sqrt{5}}{2}$.

Ο αλγόριθμος της Χρυσής Τομής χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας για τον εντοπισμό του μεγίστου της συνάρτησης της ωριαίας παραγωγής του αποξεστικού οχήματος με το χρόνο φόρτωσης.



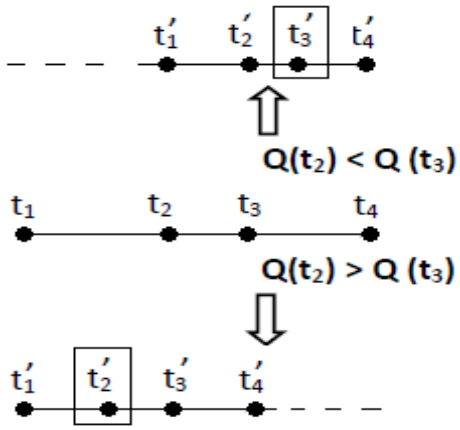
Σχ. 6.4 Η γεωμετρία της Χρυσής Τομής

Αν $[t_1, t_4]$ το διάστημα των χρόνων εντός του οποίου αναζητείται το μέγιστο, ο αλγόριθμος της Χρυσής Τομής συρρικνώνει σταδιακά το διάστημα αναζήτησής του μέχρις ότου τα άκρα του συγκλίνουν σε αυτό. Συγκεκριμένα, με δεδομένα τα t_1, t_4, στην πρώτη επανάληψη ο αλγόριθμος της Χρυσής Τομής παράγει δύο τιμές, έστω t_2 και t_3, για τις οποίες ισχύει η σχέση $t_3 - t_1 = t_4 - t_2 = b * (t_4 - t_1)$, όπου $b = \frac{1}{\varphi} = \frac{2}{1+\sqrt{5}} = 0{,}618$ ή ισοδύναμα πληρούνται οι αναλογίες του Σχ. 6.5.



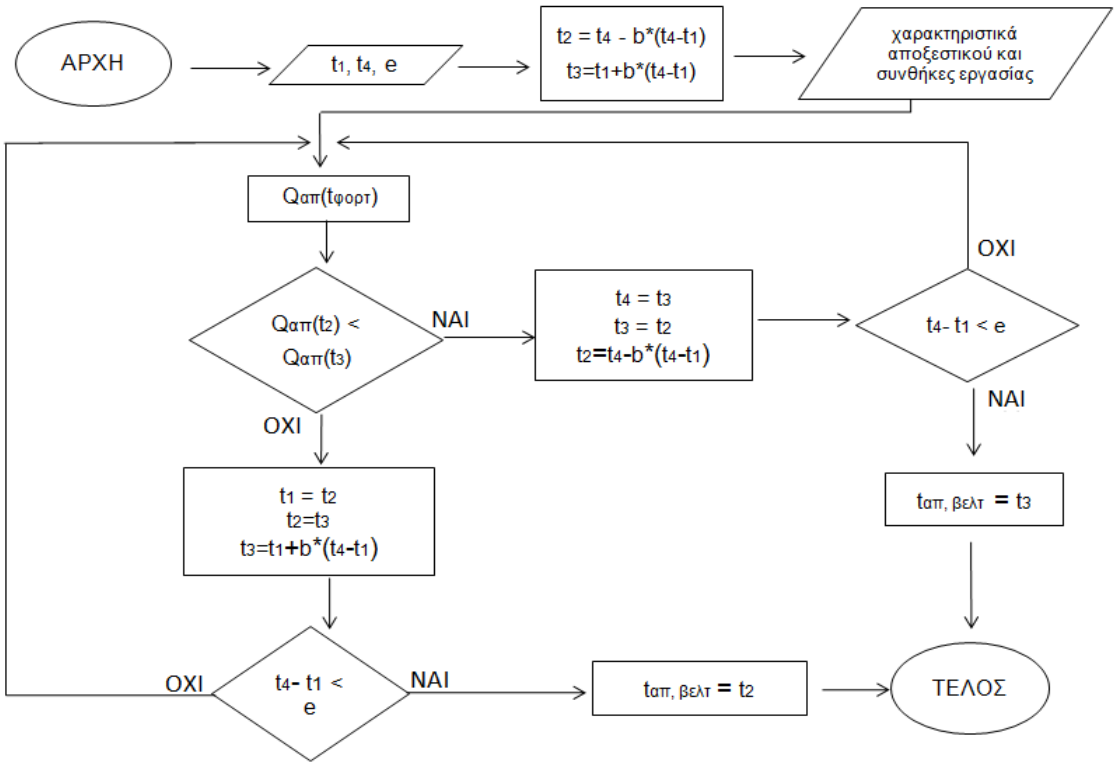
Σχ. 6.5: Χωρισμός διαστήματος με βάση τον αλγόριθμο της Χρυσής Τομής

Δεδομένου όμως ότι $t_1<t_2<t_3<t_4$, το ζητούμενο μέγιστο βρίσκεται είτε στο $[t_1, t_3]$ είτε στο $[t_2, t_4]$. Η αναζήτηση μπορεί να περιοριστεί στο ένα εκ των δύο διαστημάτων μετά από σύγκριση των τιμών $Q_{απ}(t_2)$ και $Q_{απ}(t_3)$, οι οποίες υπολογίζονται με βάση την καμπύλη φόρτωσης και τις εξ. 2.7 - 2.12, 2.14 και 2.15 όπως περιγράφηκε προηγούμενα. Εάν ισχύει $Q_{απ}(t_2) > Q_{απ}(t_3)$, το μέγιστο βρίσκεται στο υποδιάστημα $[t_1,t_3]$, οπότε η ακραία τιμή t_4 απορρίπτεται και το δεξιό άκρο του διαστήματος αναζήτησης τοποθετείται στην τιμή t_3. Αναλόγως, εάν $Q_{απ}(t_3) > Q_{απ}(t_2)$, το μέγιστο βρίσκεται στο υποδιάστημα $[t_2,t_4]$, οπότε η ακραία τιμή t_1 απορρίπτεται και το αριστερό άκρο του διαστήματος αναζήτησης τοποθετείται στην τιμή t_2. (Σχ. 6.6). Σε κάθε περίπτωση, το διάστημα με το οποίο θα ξεκινήσει η δεύτερη επανάληψη, έστω $[t_1',t_4']$, έχει ένα νέο και ένα διατηρούμενο άκρο και το εύρος του είναι ίσο με το εύρος του αρχικού διαστήματος $[t_1, t_4]$ διαιρεμένο με τον παράγοντα b. Επίσης, στη δεύτερη επανάληψη (και σε κάθε επόμενη) διατηρείται και αξιοποιείται και η έτερη ενδιάμεση τιμή, οπότε μόνο μία νέα ενδιάμεση τιμή είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα του αλγορίθμου της Χρυσής Τομής έναντι άλλων αλγορίθμων καθώς συνεπάγεται μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού φόρτου.



Σχ. 6.6: Επαναληπτική πορεία αλγορίθμου Χρυσής Τομής

Από την αριθμητική διερεύνηση προκύπτει ότι δέκα διαδοχικές επαναλήψεις αρκούν για τον εντοπισμό του $Q_{απ,max}$ και τον προσδιορισμό του $t_{απ,βελτ}$ με ακρίβεια δευτερολέπτου. Σημειώνεται ότι για τον ακριβή προσδιορισμό των τιμών του φορτίου που αντιστοιχούν στα t_2 και t_3 κάθε επανάληψης, είναι σκόπιμη η πολυωνυμική προσαρμογή των πειραματικών σημείων της καμπύλης φόρτωσης με χρήση της μεθόδου Ελαχίστων Τετραγώνων. Η προτεινόμενη αλγοριθμική μέθοδος παρουσιάζεται στο Σχ. 6.7.



Σχ. 6.7: Αλγόριθμος προσδιορισμού βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αποξεστικού

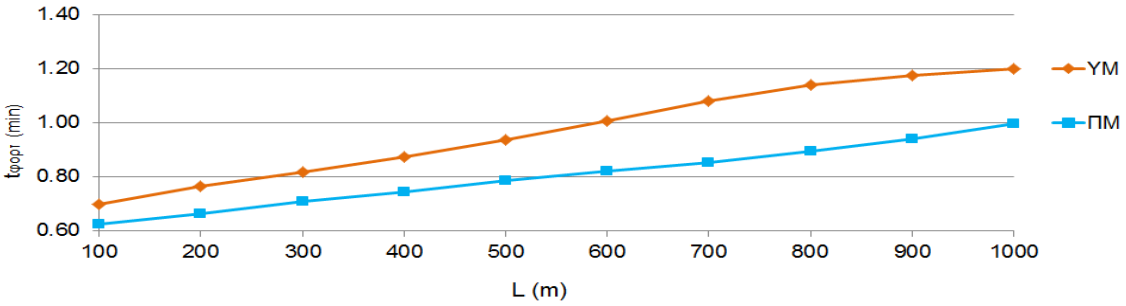
6.4 Σύγκριση υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου- Αριθμητική διερεύνηση

Στη συνέχεια κρίθηκε σκόπιμη η σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με τη γραφική μέθοδο της βιβλιογραφίας, ώστε να διαπιστωθεί το εύρος της διαφοροποίησης των αποτελεσμάτων τους. Προς αυτή την κατεύθυνση πραγματοποιήθηκε εκτεταμένη αριθμητική διερεύνηση της εφαρμογής των δύο προσεγγίσεων σε διαδρομές μεταφοράς συνήθων χαρακτηριστικών, δηλαδή μήκους L = 100-1000m και κατά μήκος κλίσης κατά τη μεταφορά α= 0 - 6%, με την υπόθεση των στοιχείων του Πιν.6.2 και της καμπύλης φόρτωσης του Σχ. 6.1. Η εκτέλεση των υπολογισμών αυτοματοποιήθηκε με χρήση Excel αφού προηγήθηκε η υποκατάσταση του γραφικού προσδιορισμού του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης με ισοδύναμο αναλυτικό τρόπο. Η υποκατάσταση αυτή βασίστηκε στο γεγονός ότι το σημείο επαφής Β αντιστοιχεί στη μέγιστη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του οριζόντιου άξονα και του ευθύγραμμου τμήματος που άγεται από το σημείο Α, οπότε προσδιορίζεται ευχερώς μέσω του αλγορίθμου της Χρυσής Τομής.

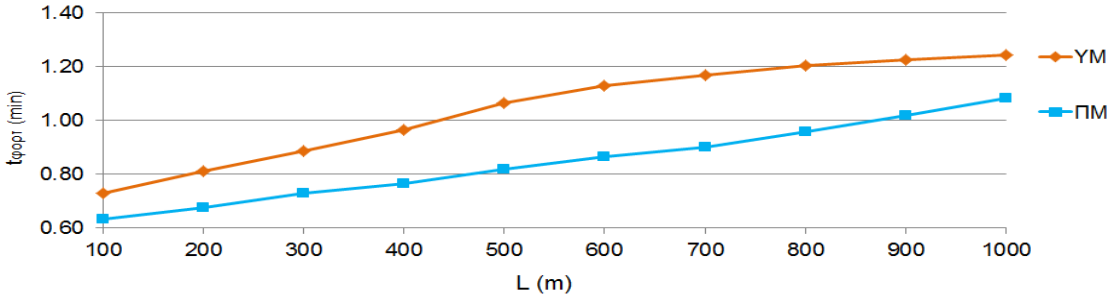
Πιν. 6.2: Δεδομένα αριθμητικής διερεύνησης

Αποξεστικό όχημα						Συνθήκες			
N_e (PS)	$B_{απ}$ (tn)	$B_{ox,max}$ (tn)	V_{ox} (m^3)	U_{lim} (km/h)	$η_{μηχ}$	γ (tn/m^3)	w_r (Kp/Mp)	$t_{σταθ}$ (min)	$η_{εκμ}$
450	46,48	37,28	26	53	0,95	1,4	50	0,9	0,83

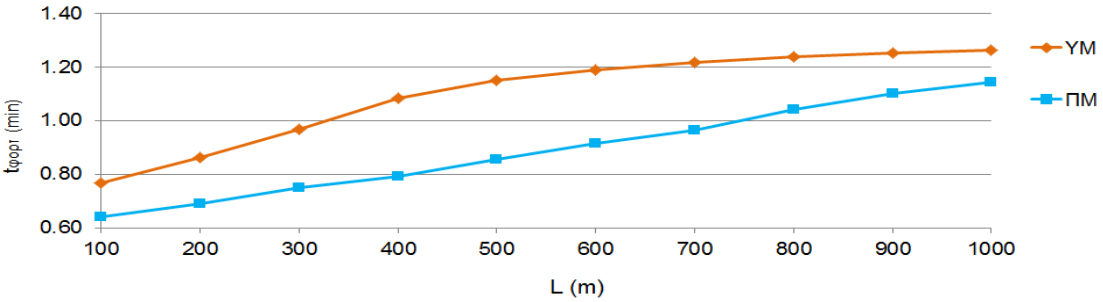
Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων (Πιν. 6.3) διαπιστώνεται ότι η υφιστάμενη μέθοδος (ΥΜ) υπερεκτιμά συστηματικά το χρόνο φόρτωσης, καθώς ο $t^{(ΥΜ)}_{απ,βελτ}$ προκύπτει αυξημένος από 8 έως 40% σε σχέση με το χρόνο της προτεινόμενης μεθόδου $t^{(ΠΜ)}_{απ,βελτ}$ για την ίδια περίπτωση απόστασης και κλίσης. Τα γραφήματα των Σχ. 6.8 - 6.11 αποδίδουν το εύρος των παρατηρούμενων διαφορών. Ως άμεση συνέπεια της άσκοπης επιμήκυνσης της φόρτωσης καταγράφεται η μείωση της ωριαίας παραγωγής από 0,2% μέχρι και 1,3% (Πιν. 6.3). Ταυτόχρονα, δημιουργούνται αναμφίβολα οι προϋποθέσεις για μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου και ταχύτερη φθορά των ελαστικών, των κοπτικών εξαρτημάτων και των μηχανικών μερών του αποξεστικού καθώς παρατείνεται η λειτουργία του μηχανήματος σε πλήρη ισχύ και αυξάνεται η αντίσταση πλήρωσης του κάδου. Δεδομένων των παραπάνω, καθίσταται σαφές ότι η υπεροχή της προτεινόμενης μεθόδου έναντι της μεθόδου της βιβλιογραφίας δεν εντοπίζεται μόνο σε θεωρητικό επίπεδο, εφόσον διαπιστώνεται επιπλέον ότι η εφαρμογή της συμβάλλει σημαντικά στον έλεγχο του κόστους.



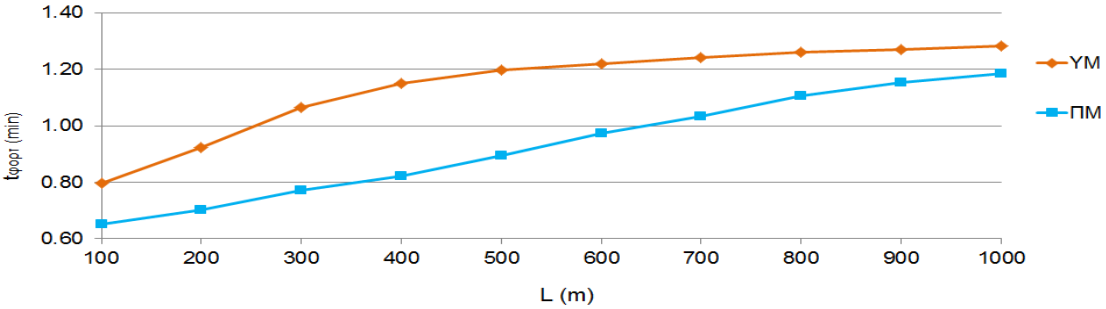
Σχ. 6.8: Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαδρομή κλίσης κατά τη μεταφορά α=0%



Σχ. 6.9: Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαδρομή κλίσης κατά τη μεταφορά α=2%



Σχ. 6.10: Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαδρομή κλίσης κατά τη μεταφορά α=4%



Σχ. 6.11: Σύγκριση αποτελεσμάτων υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαδρομή κλίσης κατά τη μεταφορά α=6%

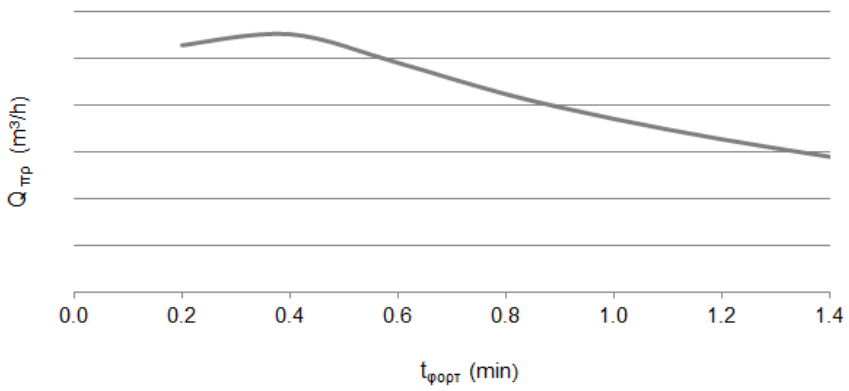
Πιν. 6.3: Αποτελέσματα συγκριτικής αριθμητικής διερεύνησης υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου για διαφορετικές περιπτώσεις απόστασης μεταφοράς L και κλίσης κατά τη μεταφορά α (%)

L (m)	α=0%						α=2%					
	$t^{(ΥΜ)}_{απ,βελτ}$ (min)	$t^{(ΠΜ)}_{απ,βελτ}$ (min)	$Δt_{απ,βελτ}$ (%)	$Q^{(ΥΜ)}_{απ,max}$ (m^3/h)	$Q^{(ΠΜ)}_{απ,max}$ (m^3/h)	$ΔQ_{απ,max}$ (%)	$t^{(ΥΜ)}_{απ,βελτ}$ (min)	$t^{(ΠΜ)}_{απ,βελτ}$ (min)	$Δt_{απ,βελτ}$ (%)	$Q^{(ΥΜ)}_{απ,max}$ (m^3/h)	$Q^{(ΠΜ)}_{απ,max}$ (m^3/h)	$ΔQ_{απ,max}$ (%)
100	0,70	0,63	-11,63	466,64	468,22	0,34	0,73	0,63	-15,44	425,49	427,67	0,51
200	0,77	0,66	-15,38	386,74	388,61	0,48	0,81	0,68	-19,66	344,28	346,72	0,70
300	0,82	0,71	-15,54	335,69	337,18	0,44	0,89	0,73	-21,15	294,67	296,75	0,70
400	0,88	0,74	-17,54	299,17	300,65	0,49	0,97	0,77	-26,09	260,23	262,37	0,82
500	0,94	0,79	-19,46	269,66	271,03	0,51	1,06	0,82	-30,16	232,89	234,91	0,86
600	1,01	0,82	-22,36	247,32	248,67	0,54	1,13	0,87	-30,39	213,18	214,78	0,74
700	1,08	0,86	-26,66	227,34	228,78	0,63	1,17	0,90	-29,93	195,59	196,86	0,65
800	1,14	0,90	-27,33	207,93	209,13	0,57	1,20	0,96	-25,61	178,08	178,95	0,48
900	1,18	0,94	-24,79	191,82	192,68	0,45	1,22	1,02	-20,29	163,54	164,12	0,35
1000	1,20	1,00	-20,41	178,10	178,72	0,35	1,24	1,08	-14,84	151,24	151,65	0,27

L (m)	α=4%						α=6%					
	$t^{(ΥΜ)}_{απ,βελτ}$ (min)	$t^{(ΠΜ)}_{απ,βελτ}$ (min)	$Δt_{απ,βελτ}$ (%)	$Q^{(ΥΜ)}_{απ,max}$ (m^3/h)	$Q^{(ΠΜ)}_{απ,max}$ (m^3/h)	ΔQmax (%)	$t^{(ΥΜ)}_{απ,βελτ}$ (min)	$t^{(ΠΜ)}_{απ,βελτ}$ (min)	$Δt_{απ,βελτ}$ (%)	$Q^{(ΥΜ)}_{απ,max}$ (m^3/h)	$Q^{(ΠΜ)}_{απ,max}$ (m^3/h)	$ΔQ_{απ,max}$ (%)
100	0,77	0,64	-19,30	388,94	391,75	0,72	0,80	0,65	-22,23	358,28	361,43	0,87
200	0,86	0,69	-25,17	308,07	311,02	0,95	0,92	0,70	-31,07	278,58	282,03	1,22
300	0,97	0,75	-28,74	260,48	263,07	0,99	1,07	0,77	-38,42	233,15	236,32	1,34
400	1,08	0,79	-36,76	228,17	230,88	1,17	1,15	0,82	-39,64	203,76	206,20	1,18
500	1,15	0,86	-34,48	203,69	205,51	0,88	1,20	0,89	-33,89	181,37	182,75	0,75
600	1,19	0,92	-29,77	186,14	187,31	0,63	1,22	0,97	-25,32	165,42	166,18	0,46
700	1,22	0,96	-26,25	170,27	171,12	0,50	1,24	1,03	-20,10	150,89	151,44	0,36
800	1,24	1,04	-19,10	154,34	154,88	0,35	1,26	1,11	-13,91	136,27	136,63	0,26
900	1,25	1,10	-13,77	141,20	141,55	0,25	1,27	1,15	-10,20	124,29	124,52	0,19
1000	1,26	1,14	-10,68	130,14	130,39	0,19	1,28	1,18	-8,42	114,22	114,41	0,16

6.5 Αλγοριθμικός προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης αποξεστικού οχήματος σε συνδυασμό με προωθητή – ταύρο

Στην περίπτωση κατά την οποία η εκσκαφή και φόρτωση εκτελείται με τη συνδρομή προωθητή, ο χρόνος φόρτωσης είναι κοινός και αποτελεί μέρος του χρόνου κύκλου αμφότερων των μέσων. Συνεπώς, είναι επιπλέον απαραίτητος ο προσδιορισμός του χρόνου φόρτωσης $t_{\pi\rho,\beta\varepsilon\lambda\tau}$ για τον οποίο μεγιστοποιείται η ωριαία παραγωγή του προωθητή (εξ. 2.16, 2.17). Για το σκοπό αυτό η βιβλιογραφία προτείνει την ίδια γραφική προσέγγιση, κατάλληλα προσαρμοσμένη στο χρόνο κύκλου του προωθητή. Αναλόγως, στο πλαίσιο της αλγοριθμικής μεθόδου είναι απαραίτητος ο μέσω της καμπύλης φόρτωσης και των εξισώσεων 2.16 και 2.17 προσδιορισμός της συνάρτησης της ωριαίας παραγωγής του προωθητή με το χρόνο φόρτωσης $Q_{\pi\rho}(t_{\varphi o\rho\tau})$. Η τυπική μορφή της $Q_{\pi\rho}(t_{\varphi o\rho\tau})$ (Σχ. 6.12) υποδεικνύει την ύπαρξη ολικού μεγίστου $Q_{\pi\rho,max}$ για το οποίο, κατ' αντιστοιχία με το αποξεστικό όχημα, ισχύει $Q_{\pi\rho,max}=Q_{\pi\rho}(t_{\pi\rho,\beta\varepsilon\lambda\tau})$ και ο εντοπισμός του είναι ευχερής δια του αλγορίθμου της Χρυσής Τομής.



Σχ. 6.12: Συνάρτηση ωριαίας παραγωγής προωθητή

Ωστόσο, η επιλογή του $t_{\pi\rho,\beta\varepsilon\lambda\tau}$ ή $t_{\alpha\pi,\beta\varepsilon\lambda\tau}$ ως βέλτιστου χρόνου φόρτωσης για το συνδυασμό προωθητή - αποξεστικού απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Δεδομένου ότι για λόγους οικονομικότητας ο προωθητής συνήθως εξυπηρετεί ομάδα αποξεστικών, οπότε η ωριαία παραγωγή του συνδυασμού ταυτίζεται με την παραγωγή της κρίσιμης ομάδας μέσων (προωθητής ή αποξεστικά), η επίτευξη των μεγίστων τιμών παραγωγής $Q_{\pi\rho}(t_{\pi\rho,\beta\varepsilon\lambda\tau})$ και $Q_{\alpha\pi}(t_{\alpha\pi,\beta\varepsilon\lambda\tau})$ προϋποθέτει ότι το αντίστοιχο μέσο είναι κρίσιμο για το βέλτιστο χρόνο φόρτωσης. Με βάση τα παραπάνω, ο προσδιορισμός του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης για τον συνδυασμό ενός προωθητή με n

αποξεστικά, $t_{συν,βελτ}$, προϋποθέτει τη διερεύνηση των συνθηκών κρισιμότητας που εκφράζουν οι εξ. 6.1 και 6.2:

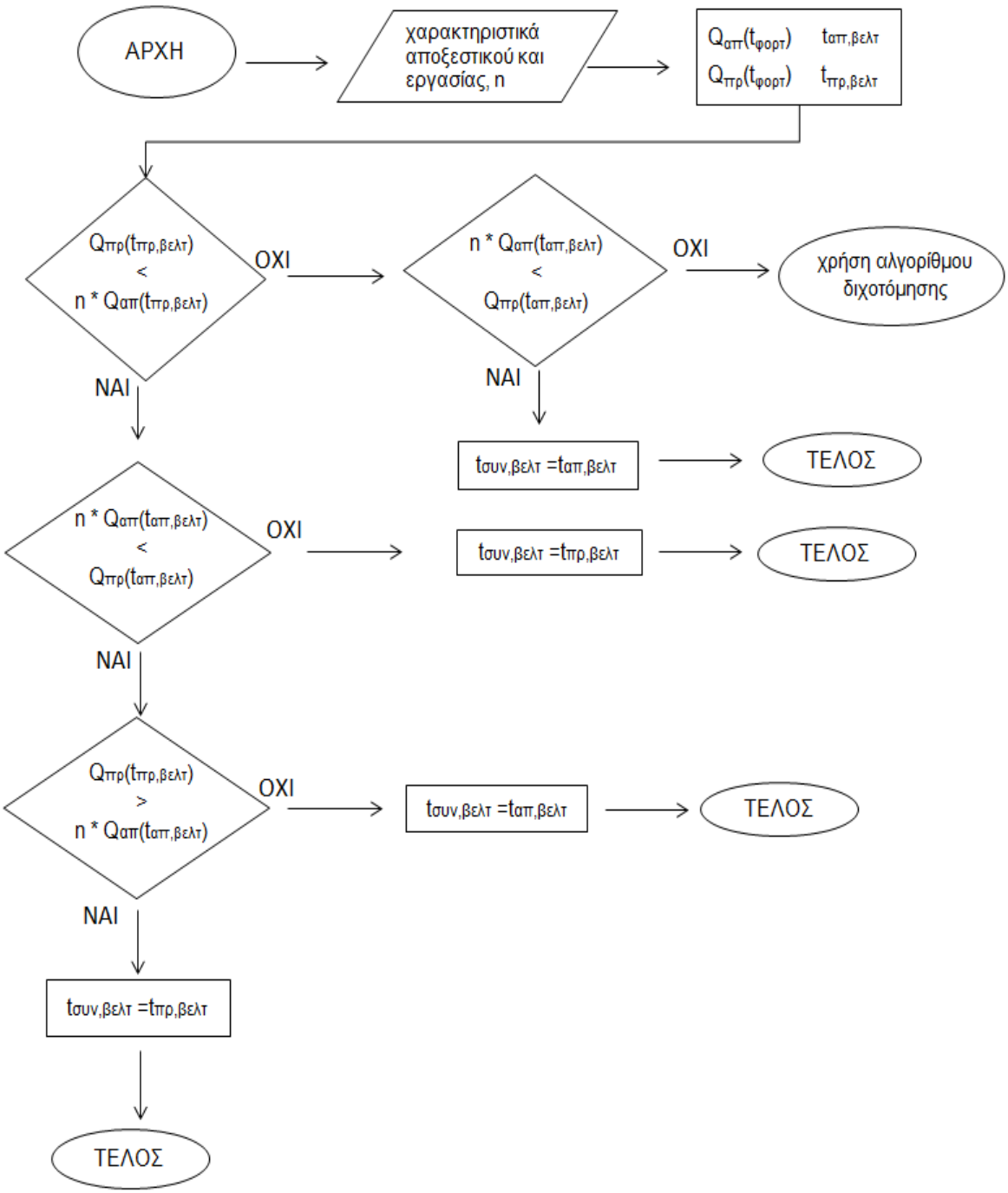
$$Q_{πρ}(t_{πρ,βελτ}) < n^*Q_{απ}(t_{πρ,βελτ}) \quad (6.1)$$

$$n^*Q_{απ}(t_{απ,βελτ}) < Q_{πρ}(t_{απ,βελτ}) \quad (6.2)$$

Ικανοποίηση της 6.1 συνεπάγεται ότι βέλτιστος χρόνος φόρτωσης για το συνδυασμό είναι ο βέλτιστος χρόνος φόρτωσης του προωθητή, δηλαδή $t_{συν,βελτ} = t_{πρ,βελτ}$. Ικανοποίηση της 6.2 συνεπάγεται ότι βέλτιστος χρόνος φόρτωσης για το συνδυασμό είναι ο βέλτιστος χρόνος φόρτωσης του αποξεστικού, δηλαδή $t_{συν,βελτ} = t_{απ,βελτ}$. Στη θεωρητική περίπτωση κατά την οποία ικανοποιούνται αμφότερες οι συνθήκες, ο $t_{συν,βελτ}$ υποδεικνύεται από τη μέγιστη μεταξύ των $Q_{πρ}(t_{πρ,βελτ})$ και $n^*\ Q_{απ}(t_{απ,βελτ})$.

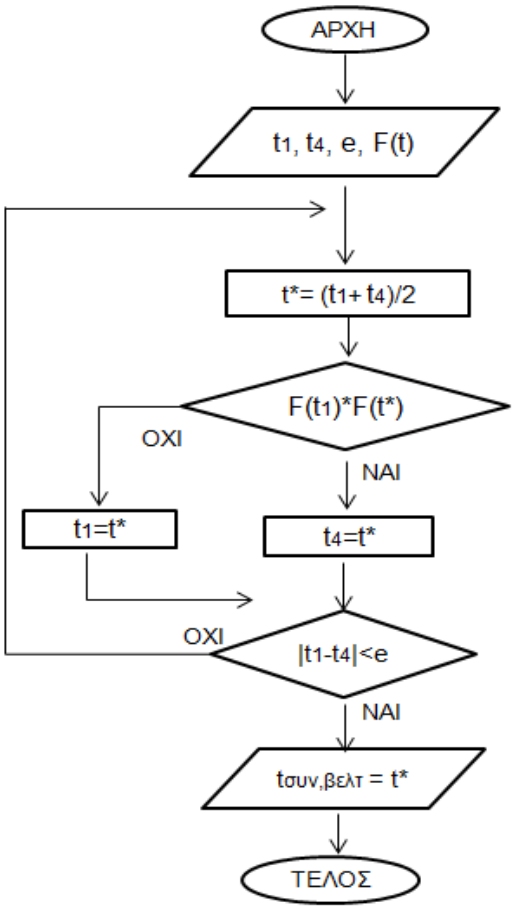
Σε περίπτωση που καμία εκ των συνθηκών 6.1 και 6.2 δεν ικανοποιείται, τότε κανένα από τα δύο μέγιστα παραγωγής δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί, αφού τόσο ο προωθητής όσο και τα αποξεστικά είναι μη κρίσιμα για εφαρμογή του αντίστοιχου βέλτιστου χρόνου φόρτωσης. Ως εκ τούτου, η πλέον οικονομική λειτουργία του συνδυασμού επιτυγχάνεται για μηδενισμό της διαφοράς παραγωγής μεταξύ προωθητή και αποξεστικών και άρα ο $t_{συν,βελτ}$ αντιστοιχεί στη ρίζα της συνάρτησης $F(t_{φορτ})=|Q_{απ}(t_{φορτ}) - Q_{πρ}(t_{φορτ})|$. Ο εντοπισμός του είναι ευχερής μέσω ενός αλγορίθμου εντοπισμού ρίζας, όπως ο αλγόριθμος της Διχοτόμησης. Η λογική διαδικασία εξέτασης των παραπάνω ενδεχομένων παρουσιάζεται στο Σχ. 6.13.

Ο αλγόριθμος της Διχοτόμησης βασίζεται στο θεώρημα Bolzano, σύμφωνα με το οποίο αν μία συνάρτηση F είναι συνεχής σε ένα διάστημα και οι τιμές της στα άκρα του είναι ετερόσημες, τότε στο διάστημα αυτό υπάρχει τουλάχιστον ένας πραγματικός αριθμός ο οποίος αποτελεί ρίζα της F=0. Με αυτή τη λογική, ο αλγόριθμος διαιρεί το αρχικό διάστημα σε δύο ίσα υποδιαστήματα και ελέγχει το πρόσημο του γινομένου των τιμών της συνάρτησης στα άκρα τους. Το αρχικό διάστημα υποκαθίσταται από το υποδιάστημα στο οποίο η τιμή του γινομένου προκύπτει αρνητική και η διαδικασία της διχοτόμησης επαναλαμβάνεται με τα ίδια κριτήρια στο υποδιάστημα αυτό. Μετά από μικρό αριθμό επαναλήψεων (δέκα), τα άκρα του διαστήματος συγκλίνουν στη ζητούμενη ρίζα t*, δηλαδή στο βέλτιστο χρόνο φόρτωσης του συνδυασμού. Στο Σχ. 6.14 περιγράφεται η εφαρμογή του αλγορίθμου της Διχοτόμησης στο $[t_1, t_4]$.



Σχ. 6.13: Προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης συνδυασμού προωθητή – αποξεστικών

Στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, όλες οι παραπάνω υπολογιστικές διαδικασίες αυτοματοποιήθηκαν σε βιβλίο εργασίας του Excel, ώστε να είναι δυνατή η εκτέλεση πολλών επαναλήψεων για διάφορες περιπτώσεις συνθηκών και δεδομένων.

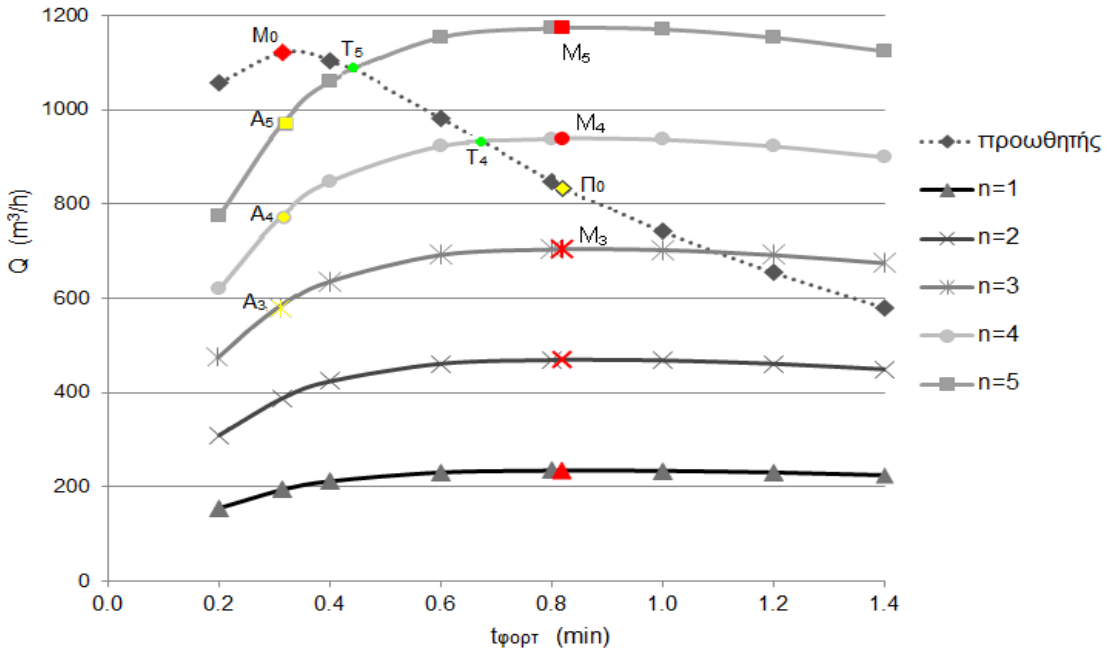


Σχ. 6.14: Προσδιορισμός βέλτιστου χρόνου φόρτωσης συνδυασμού προωθητή – αποξεστικών με τον αλγόριθμο της Διχοτόμησης

6.6 Ταυτόχρονη βελτιστοποίηση χρόνου φόρτωσης και αριθμού αποξεστικών σε συνδυασμό προωθητή - αποξεστικών

Με δεδομένη την εξάρτηση της ωριαίας παραγωγής αποξεστικών και προωθητή από το χρόνο φόρτωσης, η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του χρόνου φόρτωσης και του αριθμού των αποξεστικών απαιτεί την εκτέλεση δοκιμών. Η γραφική παράσταση των συναρτήσεων παραγωγής προωθητή και στόλων αποξεστικών οχημάτων διαφορετικού μεγέθους σε κοινό σύστημα αξόνων υποδεικνύει τα προς οικονομική διερεύνηση πιθανά μεγέθη του στόλου των αποξεστικών (και συνεπώς και το πλήθος των δοκιμών) καθώς αυτά αντιστοιχούν στις περιπτώσεις στις οποίες υφίσταται τομή μεταξύ των δύο καμπυλών. Αριθμός αποξεστικών για τα οποία δεν επιτυγχάνεται τομή της καμπύλης παραγωγής τους και της καμπύλης παραγωγής του προωθητή δεν εξετάζεται, καθώς η απουσία σημείου τομής υποδηλώνει μεγάλη διαφορά παραγωγής ή ισοδύναμα μεγάλο χρόνο αναμονής για το μη κρίσιμο μέσο.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση του Σχ. 6.15 που αντιστοιχεί σε εργασία με L=500m και α=2%, είναι σαφές από τη γραφική παράσταση των συναρτήσεων παραγωγής προωθητή και ενός έως πέντε αποξεστικών, ότι η τοποθέτηση ενός ή δύο αποξεστικών δεν μπορεί να αποτελεί τη βέλτιστη λύση, εφόσον ανεξαρτήτως του χρόνου φόρτωσης η διαφορά παραγωγής προωθητή και αποξεστικών είναι μεγάλη. Συνεπώς, ο βέλτιστος αριθμός αποξεστικών βρίσκεται ανάμεσα στα τρία και στα πέντε. Η τελική επιλογή προϋποθέτει τον προσδιορισμό του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης για κάθε συνδυασμό και ακολούθως τον υπολογισμό της αντίστοιχης τιμής μονάδας.



Σχ. 6.15: Συγκριτική απεικόνιση συναρτήσεων παραγωγής με το χρόνο φόρτωσης για L=500m και α=2%

Μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου της Χρυσής Τομής στις συναρτήσεις παραγωγής προωθητή και αποξεστικού, διαπιστώνεται ότι όσον αφορά στον προωθητή το μέγιστο της παραγωγής του δεν είναι εφαρμόσιμο (σημείο M_0), δεδομένου ότι η κατά περίπτωση αντίστοιχη ωριαία παραγωγή των τριών, τεσσάρων ή πέντε αποξεστικών (σημεία A_3, A_4, A_5) είναι μικρότερη οπότε ο προωθητής δεν είναι κρίσιμος. Με το ίδιο σκεπτικό, στην περίπτωση τριών αποξεστικών είναι δυνατή η επίτευξη του μεγίστου της παραγωγής τους (σημείο M_3) εφόσον είναι μικρότερη της αντίστοιχης ωριαίας παραγωγής του προωθητή (σημείο $Π_0$). Αντίθετα, στις περιπτώσεις τεσσάρων και πέντε αποξεστικών η μέγιστη ωριαία παραγωγή τους (σημεία M_4 και M_5) είναι μεγαλύτερη, οπότε δεν μπορεί να επιτευχθεί καθώς ο προωθητής έχει καταστεί κρίσιμος. Ως εκ τούτου, ο βέλτιστος χρόνος φόρτωσης προσδιορίζεται με τη βοήθεια

του αλγορίθμου της διχοτόμησης από το κατά περίπτωση σημείο τομής των συναρτήσεων παραγωγής αποξεστικών και προωθητή (σημεία T_4 και T_5).

Τελικά, με γνωστή τη μέγιστη δυνατή ωριαία παραγωγή κάθε συνδυασμού και με υπόθεση στοιχείων κόστους και για τις δύο ομάδες μέσων, διαπιστώνεται ότι μεταξύ των τριών περιπτώσεων η μεγαλύτερη τιμή μονάδας αντιστοιχεί στην περίπτωση των τριών αποξεστικών. Συνεπώς διαπιστώνεται ότι η βελτιστοποίηση του μεγέθους της ομάδας των αποξεστικών δε συνδέεται με την εφαρμογή του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης. Η διαπίστωση αυτή ενισχύει περαιτέρω την αναγκαιότητα εφαρμογής της προτεινόμενης αλγοριθμικής μεθόδου έναντι της γραφικής μεθόδου της βιβλιογραφίας, δεδομένου ότι ο εντοπισμός του σημείου τομής των συναρτήσεων παραγωγής είναι εφικτός μόνο δια της αλγοριθμικής μεθόδου.

6.7 Σύνοψη - Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο αναπτύχθηκε αλγοριθμική μέθοδος προσδιορισμού του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης συμβατικού αποξεστικού οχήματος. Η προτεινόμενη μέθοδος προσδιορίζει το χρόνο φόρτωσης που αντιστοιχεί στο μέγιστο της ωριαίας παραγωγής με χρήση του αλγορίθμου της Χρυσής Τομής και αποκαθιστά τη θεωρητική αστοχία των παραδοχών της υφιστάμενης γραφικής μεθόδου βελτιστοποίησης. Η συγκριτική αριθμητική διερεύνηση υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου κατέδειξε ότι η πρώτη υπερεκτιμά συστηματικά το χρόνο φόρτωσης με άμεσες συνέπειες, αφενός, τη μείωση της ωριαίας παραγωγής έως και 1,3%, αφετέρου, τη μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου και την ταχύτερη φθορά των ελαστικών, των κοπτικών εξαρτημάτων και των μηχανικών μερών του αποξεστικού. Επιπλέον, για την περίπτωση συνεργασίας αποξεστικού με προωθητή-ταύρο, αναγνωρίστηκε η πιθανότητα να καταστεί αδύνατη η επίτευξη του μεγίστου της παραγωγής λόγω της κατά περίπτωση σχέσης κρισιμότητας των μέσων. Αναπτύχθηκε συμπληρωματική αλγοριθμική διαδικασία με βάση τον αλγόριθμο της Διχοτόμησης και διαπιστώθηκε η πρόσθετη χρησιμότητά της στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του χρόνου φόρτωσης και του αριθμού των αποξεστικών.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα δεδομένα που διαμορφώνονται για τον τεχνικό κλάδο στη σύγχρονη οικονομική συγκυρία αναδεικνύουν τη βέλτιστη διαχείριση των πόρων σε προτεραιότητα κρίσιμης σημασίας. Ειδικότερα στα χωματουργικά έργα, η βέλτιστη τεχνική και οικονομική διαχείριση του μηχανικού εξοπλισμού αποτελεί όρο επιβίωσης, δεδομένου ότι το σχετικό κόστος κτήσης και λειτουργίας αποτελεί το σημαντικότερο στοιχείο κόστους του έργου.

Η παρούσα έρευνα συμβάλλει στη βέλτιστη διαχείριση του εξοπλισμού στις εργασίες μετακίνησης εδαφικού υλικού με τον εντοπισμό ανεπαρκώς τεκμηριωμένων θεωρήσεων της βιβλιογραφίας και τη συμπλήρωση των υφιστάμενων αλγορίθμων υπολογισμού με νέους αλγορίθμους.

Αρχικά, στοχεύοντας στη βελτίωση της διαχείρισης των χωματουργικών οχημάτων διερευνήθηκε και επιβεβαιώθηκε η δυνατότητα διάγνωσης της λειτουργικής τους κατάστασης μέσω των χαρακτηριστικών ηλικίας, χωρητικότητας, διανυθέντων χιλιομέτρων και επιπέδου συντήρησης. Η έρευνα βασίστηκε στην επεξεργασία στοιχείων από 126 χωματουργικά οχήματα με τις μεθόδους της Διαχωριστικής Ανάλυσης και των Νευρωνικών Δικτύων. Η αξιοπιστία της διάγνωσης προσδιορίστηκε για αμφότερες τις μεθόδους σε πολύ υψηλό επίπεδο, περί το 83% για τη Διαχωριστική Ανάλυση και περί το 95% για το νευρωνικό δίκτυο. Επίσης, προέκυψε ότι το επίπεδο συντήρησης και τα διανυθέντα χιλιόμετρα επηρεάζουν καθοριστικά την κατάσταση του οχήματος, ενώ στον αντίποδα, τα χαρακτηριστικά ηλικίας και χωρητικότητας έχουν πολύ περιορισμένη επιρροή.

Το μοντέλο διάγνωσης της λειτουργικής κατάστασης χωματουργικού οχήματος θα μπορούσε, σε μέλλοντα χρόνο, να επεκταθεί ώστε να περιλάβει περισσότερες μεταβλητές, όπως οι συνθήκες του έργου και το επίπεδο εμπειρίας και εκπαίδευσης του οδηγού του οχήματος. Επίσης, θα ήταν εύλογος ο εμπλουτισμός της βάσης δεδομένων με στοιχεία από μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων.

Στη συνέχεια, η έρευνα εστράφη στην αντιμετώπιση των συνεπειών των βλαβών στα χωματουργικά οχήματα με την τοποθέτηση εφεδρικών οχημάτων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος στηρίχθηκε στην πιθανοτική θεώρηση του αριθμού των βλαβών που θα εκδηλωθούν στο βασικό στόλο, με βάση τη διαθεσιμότητα και το πλήθος των

οχημάτων που περιλαμβάνει. Από την αριθμητική διερεύνηση της εφαρμογής του αλγορίθμου για τυπικά στοιχεία κόστους από έργα οδοποιίας, διαπιστώθηκε ότι η αναλογία μεγέθους εφεδρικού και βασικού στόλου επηρεάζεται σημαντικά από τη διαθεσιμότητα των οχημάτων και ποικίλει χονδρικά από 1 προς 10 για πολύ υψηλή διαθεσιμότητα ($\overline{\Delta}$=0,95) έως 3 προς 10 για μέση διαθεσιμότητα οχημάτων ($\overline{\Delta}$=0,80). Από την ανάλυση ευαισθησίας που ακολούθησε προέκυψε ότι οι μεταβολές των στοιχείων κόστους δεν επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα. Από τη σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με τους εμπειρικούς κανόνες που βασίζονται μόνο στο μέγεθος του βασικού στόλου, καθίσταται σαφές ότι τα αποτελέσματα των τελευταίων αποκλίνουν σημαντικά από τα βέλτιστα. Όσον αφορά στις προσεγγίσεις που λαμβάνουν υπόψη και τη διαθεσιμότητα των οχημάτων, η εικόνα που παρουσιάζουν είναι σαφώς βελτιωμένη αλλά διαπιστώνεται ότι συχνά οδηγούν σε υποδιαστασιολόγηση του εφεδρικού στόλου.

Αντικείμενο μελλοντικής έρευνας στο πεδίο των βλαβών και της αντιμετώπισής τους θα μπορούσε να αποτελέσει η συλλογή περισσότερων στοιχείων λειτουργίας και συντήρησης χωματουργικών οχημάτων μεγάλων κατασκευαστικών φορέων της χώρας, προκειμένου να καταστεί σαφέστερη η έκταση του φαινομένου των βλαβών, να καταγραφούν τα κυριότερα αίτια σε σχέση και με τις συνθήκες του εκάστοτε έργου και να αποτιμηθούν οι συνέπειες των εφαρμοζόμενων πολιτικών συντήρησης σε όρους κόστους και χρόνου.

Ακολούθως, η έρευνα επικεντρώθηκε στη φάση της φόρτωσης του χωματουργικού οχήματος και ειδικότερα στον αριθμό των εκτελούμενων φορτώσεων. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση αφορούσε στη σκοπιμότητα εκτέλεσης ή μη, της τελευταίας μη πλήρους φόρτωσης που πιθανότατα απαιτείται για την ολοκλήρωση της φόρτωσης του οχήματος. Μετά τη διάκριση των δύο εναλλακτικών μεθόδων φόρτωσης και την αναγνώριση των χαρακτηριστικών της, διαπιστώθηκε ότι η σκοπούμενη σύγκριση κόστους προϋποθέτει βέλτιστη συναρμογή για τους αντίστοιχους συνδυασμούς μέσων και κοινή απόσταση μεταφοράς. Με βάση τις παραπάνω παραδοχές αναπτύχθηκε αλγόριθμος για την εκτίμηση της μεταβολής του κόστους της εργασίας υπό διαφορετική μέθοδο φόρτωσης και αλγόριθμος προσδιορισμού της ελάχιστης πλήρωσης του κάδου του φορτωτή, ώστε η εκτέλεση της μερικής φόρτωσης να είναι οικονομικά σκόπιμη για συγκεκριμένη απόσταση μεταφοράς. Από την εκτεταμένη αριθμητική διερεύνηση που ακολούθησε, αναγνωρίστηκε η αυξημένη επίδραση παραγόντων όπως ο χρόνος κύκλου και το ωριαίο κόστος του φορτωτή και διαπιστώθηκε ότι, παρά αντίθετες αναφορές της βιβλιογραφίας, η εκτέλεση της

μερικής φόρτωσης μπορεί να οδηγεί σε μείωση της τιμής μονάδας της εργασίας μετακίνησης εδαφικού υλικού από 1% έως και 10%, αναλόγως της απόστασης μεταφοράς και του όγκου της μερικής φόρτωσης.

Τέλος, η παρούσα έρευνα πραγματεύτηκε τον προσδιορισμό του βέλτιστου χρόνου φόρτωσης συμβατικού αποξεστικού οχήματος. Αρχικά τεκμηριώθηκε η θεωρητική αστοχία της υφιστάμενης γραφικής μεθόδου βελτιστοποίησης και εν συνεχεία παρουσιάστηκε μέθοδος προσδιορισμού του χρόνου φόρτωσης που αντιστοιχεί στο μέγιστο της ωριαίας παραγωγής με χρήση του αλγορίθμου της Χρυσής Τομής. Η συγκριτική αριθμητική διερεύνηση υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου κατέδειξε ότι η πρώτη υπερεκτιμά συστηματικά το χρόνο φόρτωσης με άμεσες συνέπειες, αφενός, τη μείωση της ωριαίας παραγωγής έως και 1,3%, αφετέρου, τη μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου και την ταχύτερη φθορά των ελαστικών, των κοπτικών εξαρτημάτων και των μηχανικών μερών του αποξεστικού. Για την περίπτωση συνεργασίας αποξεστικού με προωθητή-ταύρο, αναγνωρίστηκε η πιθανότητα να καταστεί αδύνατη η επίτευξη του μεγίστου της παραγωγής λόγω της κατά περίπτωση σχέσης κρισιμότητας των μέσων. Αναπτύχθηκε συμπληρωματική αλγοριθμική διαδικασία με βάση τον αλγόριθμο της Διχοτόμησης και διαπιστώθηκε η πρόσθετη χρησιμότητά της στην ταυτόχρονη βελτιστοποίηση του χρόνου φόρτωσης και του αριθμού των αποξεστικών.

Η συγκριτική εφαρμογή υφιστάμενης και προτεινόμενης μεθόδου σε πραγματικές συνθήκες θα μπορούσε να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής πειραματικής έρευνας με στόχο την αποτίμηση στην πράξη της συμβολής της αλγοριθμικής μεθόδου στην κατεύθυνση της εκπλήρωσης των οικονομικών και χρονικών στόχων της εργασίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alkass, S., and Harris, F. (1991). “Development of an integrated system for planning earthwork operations in road construction.”, *Construct. Manag. Econ.,* 9(3), 263 – 289.

Alkass, S., El-Moslmani K., and Al-Hussein M. (2003). “A computer model for selecting equipment for earthmoving operations using queuing theory.” *Proc. Annual CIB Conference,* W78, Auckland, New Zealand.

Amirkhanian, S.N., and Baker, N.J. (1992). “Expert system for equipment selection for earthmoving operations.”, *J. Construct. Eng. Manag*., 118(2), 318-331.

Bedewy, M.K., Radwan, M.A., and Hammam S.M. (1989). “A Comparative study on the Reliability and Maintainability of Public Transport Vehicles.”, *Reliab. Eng. Syst. Saf.,* 26, 271-277.

Blackard, J.A., and Dean. D.J. (1999). “Comparative accuracies of artificial neural networks and discriminant analysis in predicting forest cover types from cartographic variables.”, *Comput. Electron. Agr.,* 24, 131-151.

Burt, C.N., and Caccetta, L. (2007). “Match factor for heterogeneous truck and loaders fleets.”, *Int. J. Min. Reclamat. Environ.,* 4, 262-270.

Carmichael, D., (1987). “Optimal Pusher – Scraper loading policies”, *Eng. Opt.,* 12, 255-267.

Carnero, M.C. (2005). ”Selection of diagnostic techniques and instrumentation in a predictive maintenance program: a case study.”, *Decis. Support Syst.,* 38, 539–555.

Caterpillar Performance Handbook (2010). 40th ed., Peoria, Illinois, U.S.A.

Celebi, N. (1998). “An equipment selection and cost analysis for opempit coal mines.”, *Int. J. Surf. Min. Reclamat. Environ.,* 12, 181-187.

Chan, C.M.R., and Harris, F.C. (1989). “A database/spreadsheet application for equipment selection.”, *Construct. Manag. Econ.,* 7(3), 235 – 247.

Chanda, E.K., and Gardiner, S. (2010). “A comparative study of truck cycle time prediction methods in open-pit mining”, *Eng. Construct. Architect. Manag.,* 17(5), 446-460.

Chang, J., and Collura, J. (1998). ”Integrating public transportation facilities and equipment management systems into capital improvement planning process.”, *Transport. Res.Rec.,* 1618, 96–102.

Chao, L.C. (2001). ”Assessing earth-moving operation capacity by Neural-Network based simulation with physical factors.”, *Comput. Aided Civ. Infrastruct. Eng.,* 16(4), pp. 287-294.

Christian, J., and Xing Xie, T. (1996). “Improving earthmoving estimating by more realistic knowledge.”, *Can. J. Civ. Eng.,* 23, 250-259.

Czaplicki, J. (1992). “On a number of spare haulage units for shovel-truck system in opet pit mines”, *Int. J. Surf. Min. Reclamat.,* 6(2), 57-59.

Day, D.A., and Benjamin, N., (1991). “Scrapers for earthmoving”, Construction Equipment Guide, 2nd Edition, Wiley Series of Practical Construction Guides, U.S.A.

Department of the Army (2000). “Earthmoving Operations”, Field Manual No 5-434, Washington.

Dodin, B., and Elimam, A.A. (2008). “Integration of equipment planning and project scheduling.”, *Eur. J. Oper. Res.,* 184, 962-980.

Dunston, P.S., Sinfield, J.V., and Lee, T.-Y. (2007). “Technology development decision economics for real-time rolling resistance monitoring of haul road.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 133(5), 393-402.

Εφραιμίδης, Χ. (1998). ”Δομικές Μηχανές”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα.

Edwards, D.J., Holt, G.D., and Harris, F.C. (1998) ‘Predictive maintenance techniques and their relevance to construction plants’, *J. Qual. Mainten. Eng.,* 4(1), 25–37.

Edwards, D.J., Malekzadeh, H., and Yisa, S.B. (2001). “A linear programming decision tool for selecting the optimum excavator.”, *Struct. Surv.,* 19(2), 113-120.

Edwards, D.J., and Holt, D.G. (2001). “An analysis of construction plant utilization, standing time and cumulative breakdown.”, *J. Construct. Res,* 2(2), 115-125.

Edwards, D.J., and Yisa, S. (2001). “Modelling the magnitude of plant downtime: a tool for improving plant operations management.”, *Eng. Construct. Architect. Manag.,* 8(3), 225-232.

Edwards, D.J., Holt, G.D., and Harris, F. (2002a). “Predicting downtime costs of tracked hydraulic excavators operating in the UK opencast mining industry.”, *Construct. Manag. Econ.,* 20, 581-591.

Edwards, D.J., Holt, D.G., and Robinson, B. (2002b). “An artificial intelligence approach for improving plant operator maintenance proficiency.”, *J. Qual. Mainten. Eng.,* 8(3), 239-252.

Edwards, D.J., and Holt, G.D. (2007). “ESTIVATE: a model for calculating excavator productivity and output costs.”, *Eng. Construct. Architect. Manag.,* 7(1), 52-62.

Elazouni, A.M., and Basha, I.M. (1996). “Evaluating the performance of construction equipment operations in Egypt.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 122(2), 109-114.

Eldin, N.N., and Mayfield, J. (2005). “Determination of most economical scrapers fleet.”, *J. Construct. Eng. Manag.,*131(10), 1109-1114.

Federal Transit Administration (FTA) (1994). “Rail modernization study.”, *Rep*. U.S. Dept. of Transp., Washington, D.C.

Flood, I., and Christophilos, P. (1996). “Modeling construction process using artificial neural networks.”, *Autom. Construct.,* 4, 307-320.

Gates. M., and Scarpa A. (1975). “Optimum size of hauling units.”, *J. Construct. Div.,* 101(CO4), 853-860.

Goldenberg, M., and Shapira, A. (2007). “Systematic evaluation of construction equipment alternatives: case study.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 133(1), 72-85.

Gove, D., and Morgan, W. (1994). “Optimizing truck-loader matching.”, *Min. Eng.,* 1179-1183.

Gransberg, D.D. (1996). “Optimizing haul unit size and number based on loading facility characteristics.”, *J. Construct. Eng. Manag.,*122(3), 248-253.

Gransberg, D.D., Popescu, C.M., and Ryan, R.C. (2006). Construction Equipment Management for Engineers, Estimators and Owners,1st ed., CRC Press, Taylor and Francis Group, New York.

Haidar, A., Naoum, S. Howes, R., and Tah, J. (1999). “Genetic Algorithms Application and Testing for Equipment Selection.”, *J. Constr. Eng. Manag.,* 125(1), 32-38.

Hall, R.A., and Daneshmend, L.K. (2003). “Reliability modeling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies.”, *Int. J. Surf. Min. Reclamat. Environ.,* Vol. 17, No. 3, pp. 139-155.

Hartman, H.L. (1987). Introductory mining engineering, Wiley – Inderscience, New York.

Hayashi S, Asakura, T., and Zhang, S. (2002). “Study of Machine fault diaghnosis system using Neural Networks.”, *Proc. Of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks*, Vol. 1, 956-961.

Hola, B., and Schabowicz, K. (2010). “Estimation of earthworks execution time cost by means of artificial neural networks.”, *Autom. Construct.,* 19, 570-579.

Jardine, A., Banjevic, D., Wiseman, M., Buck, S., and Joseph, T. (2001). ”Optimizing a mine haul truck wheel motors’ condition monitoring program.”, *J. Qual. Maint. Eng.,* 7(4), 286–301.

Jardine, A., Lin, D., and Banjevic, D. (2006). ‘A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance.”, *Mech. Syst. Signal Process.,* 20, 1483–1510.

Javadpour R., and Knapp M. (2003). “A fuzzy neural network approach to machine condition monitoring.”, *Comput. Ind. Eng.,* 45, 323-330.

Kannan, G., Vorster, M.C., and Martinez, J.C. (1999). “Developing the statistical parameters for simultaneous variation in final payload and total load time”. *Proc. Winter Simulation Conference,* 1016-1021.

Karlaftis, M.G. (1997). ”A comparison of pattern recognition and probabilistic techniques for capital asset deterioration.”, *J. Publ. Transport.,* 1(3), 87–103.

Karlaftis, M.G., and Sinha, K.C. (1997). “Modeling approach for transit rolling-stock deterioration prediction.”, *J.Transport. Eng.,* 123(3), 223–228.

Karshenas, S. (1989). “Truck capacity selection for earthmoving.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 115(2), 212-227.

Kaur, K., Kaur, A. and Malhotra, R. (2005). “Alternative methods to rank the impact of object oriented metrics in fault prediction modelling using neural networks”, *Int. J. Appl. Sci. Eng. Tech.*, 1(2), 99–104.

Kuhn, G., (1974). *“Bagger –Lkw- Betrieb”,* Die Mechanik des Baubetriebes, Teil 1: Transport Mechanik, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin.

Kumar, S., Chattopadhyay, G., and Kumar, U. (2007). “Reliability improvement through alternative designs- A case study.”, *Reliab. Eng. Syst. Saf.,* 92, 983-991.

Kumar, U., Klefsjö, B., and Granholm, S. (1989). “Reliability Investigation for a fleet of Load Haul Dump Machines in a Swedish Mine.”, *Reliab. Eng. Syst. Saf.,* 26, 341-361.

Kuprenas, J., and Henkhaus, T. (2000). “SSPE—A tool for scraper selection and production.” *Proc., 8th Int. Computing in Civil and Building Engineering Conf.,* ASCE, Reston, Va., 2, 980–987.

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.”, *Construct. Manag. Econ.,* 14, 79-92.

Le Blanc, L., and Rucks, C.T. (1996). ‘A multiple discriminant analysis of vessel accidents’, *Accid. Anal. Prev.,* 28(4), 501–510.

Lineberry, G.T. (1985). “Optimizing off-highway truck characteristics for minimum haulage cost.”, *Int. J. Min. Eng.,* 3, 295-310.

Lingaraj, B.P., and Kuo, W. (1983). “An Availability Model for the Evaluation of Equipment Alternatives.”, *J. Oper. Manag.,* 3(3), 149-154.

Makis,V., Wu, J., and Gao, Y. (2006). ”An application of DPCA to oil data for CBM modeling.”, *Eur. J. Oper. Res.,* 174,112–123.

Marjanowitch, T.P,. (1961). “Reliability of a system with mixed reserve”, Dop. AN. URSR, 8 (in Russian).

Marquez, A.C., and Herguedas, A.S. (2004). “Learning about failure root causes through maintenance records analysis.”, *J. Qual. Mainten. Eng.,* 10(4), 254-262.

Marzouk M. (2006). “Utility theory model for equipment selection.”, *Construct. Innovat.,* 6, 21-32.

Marzouk, M. and Moselhi, O. (2004). “Multiobjective optimization of earthmoving operations.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 130(1), 105-113.

Marzouk, M., and Moselhi, O. (2003). “Object-oriented simulation model for earthmoving operations”. *J. Construct. Eng. Manag.,* 129(2), 173-181.

Moselhi, O. and Alshibani, A. (2007). “Crew optimization in planning and control of earthmoving operations using spatial technologies.”, *Itcon,* 12, 121-137.

Moselhi, O. and Alshibani, A. (2009). “Optimization of earthmoving operations in heavy civil engineering projects.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 135(10), 948-954.

Moselhi, O. and Siqueira, I. (1998). “Neural Networks for Cost Estimating of Structural Steel Buildings.”, *AACE International Transactions IT/IM.06,* 1- 4.

Murty, A.S.R., and Naikan, V.N.A. (1995). “Availability and Maintenance cost optimization of a production plant.”, *Int. J. Qual. Reliab. Manag.,* 12(2), 28-35.

Nepal, M.P., and Park, M. (2004). “Downtime model development for construction equipment management.”, *Eng. Construct. Architect. Manag.,* 11(3),199-210.

Nunnally, S.W., (2007). Construction Methods and Management, 7th ed., Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

Ok, S.C. and Sinha, S.K. (2006). “Construction equipment productivity estimation using artificial neural network model”, *Construct. Manag. Econ.,* 24(10), 1029 – 1044.

Olden, D.J. and Jackson, D.A. (2002). “Illuminating the ‘‘black box’’: a randomization approach for understanding variable contributions in artificial neural networks”, *Ecol. Model.*, 154, 135-150.

Olden, D.J., Joy, M.K. and Death, R.G. (2004). “An accurate comparison of methods for quantifying variable importance in artificial neural networks using simulated data”, *Ecol. Model.*, 178, 389-397.

Oloke, D.A., Edwards, D.J., and Thorpe, T.A. (2003). “Predicting construction plant breakdown time using series modeling.”, *J. Eng. Des. Tech.,* 1(2), 202-221.

Peurifoy, R.L., (1970). Construction Planning, Equipment and Methods, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.

Peurifoy, R.L., Schexnayder, C.J. and Shapira, A. (2006). Construction Planning, Equipment and Methods, 7th ed., McGraw-Hill, New York.

Prasertrungruang, T., and Hadikusumo, B.H.W. (2007). “Heavy equipment management practices and problems in Thai lighway contractors.”, *Eng. Construct. Architect. Manag.,* 14(3), 228-241.

Prasertrungruang, T., and Hadikusumo, B.H.W. (2008). “System dynamics modelling of machine downtime for small to medium highway contractors.”, *Eng. Construct. Architect. Manag.,* 15(6), 540-561.

Prasertrungruang, T. and Hadikusumo, B.H.W. (2009a). “Study of factors influencing the efficient management and downtime consequences of highway construction equipment in Thailand.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 135(1), 2–11.

Prasertrungruang, T., and Hadikusumo, B.H.W. (2009b). “Modeling the dynamics of heavy equipment management practices and downtime in large highway contractors.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 135(10), 939-947.

Rafiee, J., Arvani, F., Harifi, A., and Sadeghi, M.H. (2007). “Intelligent condition monitoring of a gearbox using artificial neural network.”, *Mech. Syst. Signal Process.,* 21, 1746-1754.

Raza, J., Liyanage, J.P., Al Atat, H. and Lee J. (2010). “A comparative study of maintenance data classification based on neural networks, logistic regression and support vector machines”, *J. Qual. Mainten. Eng.*, 16(3), 303 – 318.

Samanta, B., and Al-Balushi, K.R. (2003). “Artificial Neural Network based fault diagnostics of rolling element bearings using time-domain features.”, *Mech. Syst. Signal Process.,*17(2), 317-328.

Saranga, H. (2002). ”Relevant condition-parameter strategy for an effective condition-based maintenance.”, *J. Qual. Maint. Eng.,* 8,(1), 92–105.

Sawicki, P., and Żak, J. (2007). ”Technical diagnostic of a fleet of vehicles using rough set theory.”, *Eur. J. Oper. Res.,* 193, 891–903.

Schexnayder C., Weber, S.L., and Brooks, B.T. (1999). “Effect of truck payload weight on production.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 125(1), 1-7.

Senouci, A., and El-Rayes, K. (2009). “Time-Profit trade-off analysis for construction projects.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 135(8), 718-725.

SME Mining Engineering Handbook (1992). Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 2nd ed., Littleton, Colorado, U.S.A.

Shapira, A., and Goldenberg, M. (2005). “AHP-Based Equipment Selection Model for Construction Projects.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 131(12), 1263-1273.

Shapira, A., and Goldenberg, M. (2007). ““Soft” Considerations in Equipment Selection for Building Construction Projects.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 133(10), 749-760.

Singh J., (1993). Heavy Construction planning, equipment and Methods, A/A Balkema, Rotterdam.

Smith, S.D. (1999). “Earthmoving productivity estimation using linear regression techniques.”, J*. Construct. Eng. Manag.,*125(3), 133-141.

Smith, S.D., Osborne, J.R., and Forde, M.C. (1995). “Analysis of Earth-moving systems using discrete-event simulation.”, *J. Construct. Eng. Manag.,*121(4), 388-396.

Smith, S.D., Wood, G.S., and Gould, M. (2000). “A new earthworks estimating methodology.”, *Construct. Manag. Econ.,* 18, 219-228.

StatSoft, Inc. (2010). Electronic Statistics Textbook, Statsoft, Tulsa, OK, available at http://www.statsoft.com/textbook/.

Tabachnick, B.G. and Fidell, L.S. (2007), Using Multivariate Statistics, 5th ed., Pearson Education Inc., Boston.

Tam, C.M., Tong, T.K.L., and Sharon, L.T. (2002). “Artificial neural networks model for predicting excavator productivity.”, *Eng., Construct. Architect. Manag.,* 9(5), 446-452.

Terex Corporation (1981). “Production and Cost Estimating of Material Movement with Earthmoving Equipment”, Hudson, Ohio.

Tian, Z. (2012). “An artificial neural network method for remaining useful life prediction of equipment subject to condition monitoring.”, *J. Intell. Manuf.,* 23, 227-237.

Tsimperdonis, A.I., and Murphree, E.L. Jr. (1994). “Equipment management through operational failure costs.”, *J. Construct. Eng. Manag.,* 120(3), 522-535.

Ulubeyli, S., and Kazaz, A. (2009). “A multiple criteria decision-making approach to the selection of concrete pumps.”, *J. Civ. Eng. Manag.,* 15(4), 369-376.

Wang, W.Q., Golnaraghi, M.F., and Ismail, F. (2004). “Prognosis of machine health condition using neuro-fuzzy systems.”, *Mech. Syst. Signal Process.,* 18, 813-831.

Worth, A.P., and Cronin, M.T.D. (2003). “The use of discriminant analysis,logistic regression and classification tree analysis in the development of classification models for humal health effects.”, *J. Mol. Struct.,* 622, 97-111.

Zakeri, M, Olomolaiye, P.O., Holt, G.D., and Harris, F.C. (1996). “A survey on constraints on Iranian construction operatives’ productivity.”, *Constr. Manag. Econ.,* 14(5), 417-425.