

**Κατανάλωση καυσίμου μηχανημάτων έργου και παραγόμενο έργο: Μελέτη περίπτωσης τεχνικής εταιρείας.**



**Τομέας: Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας**

**Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Κηρυττόπουλος, Καθηγητής ΕΜΠ**

**Αθήνα 2022**

--- κενή σελίδα ---

## **Ευχαριστίες**

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κλείνει ένας σημαντικός κύκλος της ζωής μου ως φοιτητής της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Θα ήθελα πρώτα απ' όλους να ευχαριστήσω τον υπεύθυνο καθηγητή μου κ. Κωνσταντίνο Κηρυττόπουλο. Η ευκαιρία που μου έδωσε σε συνδυασμό με την πολύτιμη καθοδήγηση του με βοήθησαν να αναπτύξω τις γνώσεις και τον εαυτό μου στο πλαίσιο μιας ανεκτίμητης για εμένα συνεργασίας. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Γεώργιο Χατζηστέλιο, η παρουσία του οποίου συνέβαλε σημαντικά στην πραγματοποίηση της παρούσας μελέτης. Ένα μεγάλο ευχαριστώ αξίζει στον κ. Θεόδωρο Καλογερόπουλο, ο οποίος υπήρξε διαθέσιμος σε οποιαδήποτε απορία που μου δημιουργήθηκε, δίνοντάς μου συμβουλές τόσο στο πλαίσιο της εργασίας όσο και εκτός αυτής, οι οποίες θα αποτελέσουν οδηγό για τη συνέχεια της ζωής μου. Εν συνεχεία, οφείλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την εταιρεία της μελέτης περίπτωσης, καθώς και προς τους ανθρώπους που έλαβαν μέρος στις συνεντεύξεις που πραγματοποιήθηκαν. Χωρίς τα δεδομένα και τις γνώσεις που μου παρείχαν θα ήταν αδύνατη η υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Σε αυτό το σημείο, επιθυμώ να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και την αγάπη μου στην οικογένεια μου, η οποία μου προσέφερε απλόχερα την αναγκαία στήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος, ιδιαίτερη θέση στην καρδιά μου έχουν οι φίλοι μου, οι οποίοι με ενθάρρυναν στην πορεία μου και υπήρξαν αδιάκοπα πλάι μου. Τα λόγια είναι φτωχά για να εκφράσουν την ευγνωμοσύνη που τους οφείλω.

*Αφιερώνεται στους ανθρώπους  
που με στήριξαν κατά τη διάρκεια  
αυτού του ταξιδιού*

Υπεύθυνη δήλωση για λογοκλοπή και για κλοπή πνευματικής ιδιοκτησίας:

Έχω διαβάσει και κατανοήσει τους κανόνες για τη λογοκλοπή και τον τρόπο σωστής αναφοράς των πηγών που περιέχονται στον οδηγό συγγραφής Διπλωματικών Εργασιών. Δηλώνω ότι, από όσα γνωρίζω, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν δικής μου εργασίας και υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποίησα.

Ζουρνατζής Οδυσσέας

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτή τη Διπλωματική εργασία είναι του συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

**Περιεχόμενα**

Σύνοψη – Περίληψη.....	8
Abstract .....	9
1. Εισαγωγή .....	11
1.1 Πλαίσιο .....	11
1.2 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι.....	12
1.3 Οριοθέτηση.....	12
1.4 Διάρθρωση της εργασίας .....	13
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	14
2.1 Παραγωγικότητα εξοπλισμού.....	15
2.2 Ωριαία κατανάλωση καυσίμου.....	16
2.3 Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου .....	17
2.4 Συμπεράσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης .....	24
3. Μεθοδολογία .....	26
3.1 Μέθοδοι έρευνας.....	26
3.1.1 Επιλογή μεθόδων έρευνας .....	26
3.1.2 Μελέτη βιβλιογραφίας.....	28
3.1.3 Μελέτη περίπτωσης .....	30
3.1.4 Συνεντεύξεις.....	31
3.2 Μέθοδος υπολογισμών.....	34
3.3 Θέματα ηθικής κατά τη μελέτη .....	38
4. Συσχέτιση κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο και σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα των εργοταξίων.....	39
4.1 Μελέτη περίπτωσης σε τεχνική εταιρεία.....	39
4.2 Εργοτάξιο Α.....	39
4.2.1 Μάιος 2021 .....	40
4.2.2 Ιούλιος 2021.....	42
4.2.3 Παραγωγικότητα Μαΐου & Ιουλίου 2021 και συσχέτιση κατανάλωσης με παραγόμενο έργο.....	43
4.3 Εργοτάξιο Β.....	48
4.3.1 Ισοπεδωτής Γαιών Ι1 .....	49
4.3.2 Ισοπεδωτής Γαιών Ι2 .....	51
4.3.3 Σύγκριση μεταξύ Ισοπεδωτών Γαιών Ι1 και Ι2.....	52
4.3.4 Προωθητήρας Γαιών Π1 .....	53
4.3.5 Προωθητήρας Γαιών Π2 .....	56
4.3.6 Εκσκαφέας Ερπυστριοφόρος Ε1 .....	58
4.3.7 Εκσκαφέας Ερπυστριοφόρος Ε2 .....	61
4.3.8 Εκσκαφέας Ελαστικοφόρος Ε3.....	63
4.3.9 Φορτωτής Ελαστικοφόρος Φ1 .....	66
4.4 Σύγκριση μεταξύ των δύο εργοταξίων για τον εκσκαφέα R500LC – 7A.....	69
4.5 Παραδοχές και πιθανά σφάλματα.....	70

4.6	Πορίσματα συγκρίσεων.....	71
4.6.1	Πορίσματα εργοταξίου Α.....	71
4.6.2	Πορίσματα εργοταξίου Β.....	72
4.7	Προτάσεις.....	73
5.	Συζήτηση.....	74
6.	Συμπεράσματα.....	77
	Κατάλογος Αναφορών.....	81
7.	Παράρτημα Α: Γενικοί Ορισμοί.....	84
	Παράρτημα Β: Ανάλυση ευαισθησίας εργοταξίου Α.....	85
	Κατάλογος Πινάκων.....	87
	Κατάλογος Σχημάτων.....	88
	Κατάλογος Εικόνων.....	90
	Κατάλογος Εξισώσεων.....	91

## Σύνοψη – Περίληψη

Οι χωματοουργικές εργασίες των κατασκευαστικών έργων αποτελούν δραστηριότητες που συμβάλουν στην αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και κατ' επέκταση στην υψηλή ρύπανση του περιβάλλοντος. Η δεδομένη ενεργειακή κρίση σε συνδυασμό με την ανάγκη για άμεση δράση στο φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής, έχει οδηγήσει τις εταιρείες στην αναζήτηση τρόπων μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης, χωρίς τη διακύβευση της παραγωγικότητας των μηχανημάτων. Για την πραγματοποίηση αυτού, πρωταρχικό βήμα αποτελεί η συσχέτιση της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο στα μηχανήματα του εργοταξίου, κάτι το οποίο συνιστά κύριο στόχο του προτύπου ISO 50001.

Σκοπός της παρούσας έρευνας αποτελεί η δημιουργία ενός πλαισίου διαχείρισης ενέργειας των μηχανημάτων εργοταξίου κατά τη διάρκεια και κατά το στάδιο μελέτης ενός έργου, μέσω συσχέτισης της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, χρησιμοποιήθηκαν τρεις βασικές μέθοδοι έρευνας. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση για την εύρεση του μοντέλου προσέγγισης της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου. Εν συνεχεία, το μοντέλο εφαρμόστηκε σε δεδομένα δύο εργοταξίων μεγάλης τεχνικής εταιρείας, ώστε να εντοπιστούν τυχόν αποκλίσεις των προσεγγίσεων από τα πραγματικά μεγέθη. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις με τους υπεύθυνους των εργοταξίων ώστε να προσδιοριστούν οι συνθήκες που πραγματοποιούνται οι εργασίες, αλλά και με εργαζόμενους τεχνικών εταιρειών για τη συλλογή πληροφοριών σχετικά με την εφαρμογή του αντικειμένου μελέτης της εργασίας στην πράξη.

Τα αποτελέσματα της έρευνας ανέδειξαν ότι στην περίπτωση του ενός εργοταξίου που μελετήθηκε υπάρχει περιθώριο μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου για την εταιρεία, η οποία μπορεί να αποφέρει εξοικονόμηση σημαντικού ποσού χρημάτων. Στην περίπτωση του δεύτερου εργοταξίου παρατηρήθηκε ότι η πραγματική κατανάλωση ανά μονάδα παραγόμενου έργου βρίσκεται στις περισσότερες περιπτώσεις εντός των ορίων που διαμορφώθηκαν με τη χρήση του προτεινόμενου μοντέλου. Επιπλέον, προέκυψε το συμπέρασμα ότι ενδεχομένως είναι εφικτή η προσέγγιση του μεγέθους της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου με ικανοποιητική ακρίβεια, χωρίς τη χρήση υψηλού κόστους πρακτικών όπως είναι η τηλεματική.

Η αξία των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας, ενδείκνυται λόγω της δυνατότητας που δίνεται στις τεχνικές εταιρείες να προσεγγίσουν το μέγεθος της κατανάλωσης ανά μονάδα παραγόμενου έργου τόσο κατά τη διάρκεια όσο και κατά το στάδιο μελέτης ενός έργου. Η προσέγγιση στο στάδιο μελέτης ενός έργου μπορεί να βοηθήσει τις εταιρείες στη βέλτιστη επιλογή μηχανημάτων για τις απαιτήσεις συγκεκριμένων εργασιών, καθώς και στην πρόβλεψη του ενεργειακού κόστους που θα προκύψει από τα καύσιμα του εξοπλισμού. Η προσέγγιση κατά τη διάρκεια του έργου δημιουργεί ένα πλαίσιο σύγκρισης των πραγματικών μετρήσεων από το εργοτάξιο, με σκοπό την αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των μηχανημάτων και τη μείωση της κατανάλωσης και των εκπομπών CO<sub>2</sub> αυτών.



## Abstract

Earthmoving activities in construction projects are activities that contribute to increased fuel consumption and thus high environmental pollution. The energy crisis of recent years, combined with the need for immediate action on climate change, has led companies to look for ways to reduce consumption without compromising the productivity of machinery. To achieve this, a primary step is to correlate fuel consumption with the work produced from on-site machinery, which is a key objective of the ISO 50001 standard.

Therefore, the purpose of this research is to establish a framework for energy management of project machinery during both the design and delivery stage of a project, by correlating fuel consumption with the work produced. To achieve this purpose, three main research methods were used. First, a literature review was conducted to find the model to approximate the fuel consumption per unit volume of earth handled. Subsequently, the model was applied to actual data of two construction sites of a large construction company, to determine any deviations of the approximations from the actual values. Finally, interviews were conducted with site managers to obtain data on the conditions under which work is carried out, and with employees of construction companies to gather information on the application of the scope of the study in practice.

The results of the research showed that in the case of one construction site there is a potential for the company to reduce fuel consumption per unit volume of earth handled, which can yield savings of a significant amount of money. In the case of the second site, it was observed that the actual consumption per unit volume of earth handled is in most cases within the limits established using the proposed model. Furthermore, it was concluded that it may be possible to approximate the amount of fuel consumption per unit volume of earth handled with a satisfactory accuracy, without the use of high-cost practices such as telematics.

The value of the results produced is indicated in the ability of industry construction companies to approximate the magnitude of consumption per unit volume of earth handled during both the design and delivery stage of a project. The approach at the design stage of a project can assist companies in the optimal selection of machinery for specific job requirements, as well as in predicting the energy costs that will result from equipment fuel. The approach during the delivery stage of the project creates a framework for comparing actual measurements from the construction site to evaluate the energy efficiency of the machinery and reduce its consumption and CO<sub>2</sub> emissions.

## Συνομεύσεις - αρτικόλεξα

**En:** Normalized energy consumption (Κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας)

**En<sub>f</sub>:** Normalized fuel consumption (Κανονικοποιημένη κατανάλωση καυσίμου)

**Eur:** Utilization rate (Ποσοστό χρήσης)

**Epr:** Productivity (Παραγωγικότητα)

**Tc:** Cycle Time (Χρόνος Κύκλου)

**Hp:** Horsepower (Ιπποδύναμη κινητήρα)

**Lf:** Load factor (Συντελεστής φόρτισης κινητήρα)

**Bp:** Bucket payload (Ωφέλιμο φορτίο κουβά)

**Bs:** Design bucket volume (Όγκος σχεδιασμού κουβά)

**Bf:** Bucket fill factor (Ποσοστό πλήρωσης του κουβά)

**SFC:** Specific Fuel Consumption (Ειδική κατανάλωση καυσίμου)

**$\rho_{fuel}$ :** Specific gravity of diesel fuel (Ειδικό βάρος καυσίμου ντίζελ)

**Dp:** Digging depth (Βάθος εκσκαφής)

**Thc:** Hauler capacity (Χωρητικότητα φορτηγού μεταφοράς)

**Hd:** Haul distance (Απόσταση μεταφοράς)

**Lt:** Loading time (Χρόνος φόρτωσης)

**Tu:** Truck utilization rate (Ποσοστό χρήσης φορτηγού)

**Sf:** Swell factor (Συντελεστής διόγκωσης υλικού)

**Lur:** Wheel-loader utilization rate (Ποσοστό χρήσης τροχοφόρου φορτωτή)

**Ltav:** Average loading time of each hauler capacity (Μέσος χρόνος φόρτωσης των φορτηγών μεταφοράς)

**ANN:** Artificial Neural Network (Τεχνητό νευρωνικό δίκτυο)

**DES:** Discrete Event Simulation (Προσομοίωση Διακριτών Γεγονότων)

**CO<sub>2</sub>:** Carbon dioxide (Διοξείδιο του άνθρακα)

## 1. Εισαγωγή

### 1.1 Πλαίσιο

Τα έργα κατασκευών χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλές καταναλώσεις καυσίμων, οδηγώντας σε πολύ υψηλά κόστη για τις εταιρείες και σε υψηλή ρύπανση του περιβάλλοντος, λόγω των εκπομπών CO<sub>2</sub> (Jassim, Lu and Olofsson, 2018b). Πολύ μεγάλο ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας αφορά τα μηχανήματα του εργοταξίου, και ειδικότερα τους εκσκαφείς (Vukonic, Leifeld and Murrenhoff, 2017). Συνεπώς, οι τεχνικές εταιρείες έχουν μία διπλή πρόκληση. Αφενός, να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου προκειμένου να περιοριστεί το κόστος ενέργειας, χωρίς ωστόσο να διακυβευτεί η παραγωγικότητα των μηχανημάτων, και αφετέρου, να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμου, έτσι ώστε να ελαττωθούν οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου (Ng, Harding and Glass, 2016).

Ως ωριαία κατανάλωση καυσίμου στην παρούσα εργασία ορίζεται η ποσότητα καυσίμου σε λίτρα που καταναλώνεται ανά ώρα λειτουργίας του μηχανήματος. Όσον αφορά την παραγωγικότητα, ένας γενικός ορισμός που αποδίδεται στη διεθνή βιβλιογραφία είναι η συσχέτιση μεταξύ των εισροών και εκροών (Park, 2006). Στην παρούσα εργασία, εκφράζεται ως τα κυβικά μέτρα που επεξεργάζεται ένα μηχάνημα ανά ώρα λειτουργίας του. Η πρόκληση για αύξηση της παραγωγικότητας των μηχανημάτων με παράλληλη ελαχιστοποίηση της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου, χρίζει όλο και μεγαλύτερης σημασίας, τόσο για τη βιομηχανία όσο και για την ακαδημαϊκή έρευνα (Ng, Harding and Glass, 2016). Σημαντικό εγχείρημα συνεπώς, αποτελεί η διαχείριση της κατανάλωσης ενέργειας των τεχνικών εταιρειών, μέσω συσχέτισης της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο. Η σύνδεση των δύο αυτών μεγεθών συνιστά κύριο στόχο του διεθνούς προτύπου ISO 50001, το οποίο βοηθά τους οργανισμούς στη βέλτιστη ενεργειακή επίδοση, προωθώντας τη βιώσιμη αξιοποίηση της ενέργειας (ISO 50001 - Energy management systems, 2018).

Το κύριο πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελεί αρχικά την έλλειψη γνώσης των τεχνικών εταιρειών αναφορικά με τη σχέση της κατανάλωσης του καυσίμου με το παραγόμενο έργο. Επιπλέον, ζήτημα αποτελεί η απουσία γνώσης στο στάδιο προμελέτης ενός έργου που αφορά τις καταναλώσεις για την υλοποίηση μιας εργασίας, ανάλογα με τον τύπο του μηχανήματος και το είδος της εργασίας. Αυτά, έχουν ως αποτέλεσμα η επιλογή του κατάλληλου μηχανήματος για την αντίστοιχη εργασία, να γίνεται αποκλειστικά με βάση την εμπειρία του ανθρώπινου δυναμικού και όχι τον συνδυασμό αυτής, με συστηματική μελέτη που βασίζεται σε αριθμητικά δεδομένα και ενδελεχή έρευνα.

Έτσι, η συσχέτιση της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο πραγματοποιήθηκε με σκοπό να καλύψει δύο άξονες, που σχετίζονται με το στάδιο που βρίσκεται ένα έργο. Αρχικά, εξετάζεται η εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου, πριν την έναρξη ενός έργου. Επιπλέον, διερευνάται η δημιουργία ενός πλαισίου σύγκρισης των πραγματικών μετρήσεων από ένα εργοτάξιο, μέσω θεωρητικού υπολογισμού των αντίστοιχων

μεγεθών, κατά τη διάρκεια ενός έργου. Η χρησιμότητα της παρούσας εργασίας ενδείκνυται στην εύκολη και με μικρό κόστος προσέγγιση των μεγεθών της κατανάλωσης, χωρίς τη χρήση υψηλού κόστους πρακτικών, όπως είναι η τηλεματική.

## 1.2 Σκοπός, ερωτήματα και στόχοι

---

Σκοπός είναι η δημιουργία ενός πλαισίου διαχείρισης ενέργειας των μηχανημάτων του εργοταξίου, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και κατά το στάδιο μελέτης ενός έργου, που στοχεύει στη μείωση του κόστους ενέργειας για τις εταιρείες και των εκπομπών CO<sub>2</sub> για το περιβάλλον.

Τα ερωτήματα που καλείται να απαντήσει η παρούσα εργασία είναι συγκεκριμένα και παρουσιάζονται στη συνέχεια:

- Ποια είναι η σχέση της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο;
- Ποιες είναι οι κατάλληλες προτάσεις, ώστε η παραπάνω συσχέτιση να συγκλίνει με τα πραγματικά δεδομένα ενός εργοταξίου;

Προκειμένου να απαντηθούν τα συγκεκριμένα ερωτήματα, τέθηκαν οι παρακάτω στόχοι:

1. Συσχέτιση της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο στα μηχανήματα του εργοταξίου.
2. Εύρεση δεδομένων που αφορούν την αντιμετώπιση των τεχνικών εταιρειών της βιομηχανίας σχετικά με το αντικείμενο της συσχέτισης της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο.
3. Δημιουργία πλαισίου προτάσεων που θα βοηθήσει τις τεχνικές εταιρείες του χώρου.

Οι δραστηριότητες οι οποίες πραγματοποιήθηκαν έτσι ώστε να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, παρουσιάζονται σε διάγραμμα ροής του κεφαλαίου 3 της Μεθοδολογίας (**Σχήμα 1**).

## 1.3 Οριοθέτηση

---

Όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο **3.2**, η σχέση της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο επηρεάζεται από ένα μεγάλο σύνολο μεταβλητών. Από τη μελέτη της παρούσας εργασίας, εξαιρείται η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα (π.χ. ικανότητα χειριστή) καθώς και η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών (π.χ. θερμοκρασία, καιρικά φαινόμενα), δεδομένου ότι αποτελούν μεταβλητές οι οποίες είναι δύσκολο να εκτιμηθούν και κατ' επέκταση να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς.

## 1.4 Διάρθρωση της εργασίας

---

Στο **Κεφάλαιο 1** δίνεται στον αναγνώστη μια αρχική ιδέα του αντικειμένου μελέτης της διπλωματικής, ο σκοπός καθώς και η οριοθέτηση της εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 2** πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τα μεγέθη της παραγωγικότητας, της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου και τέλος της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου του εξοπλισμού.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται οι μέθοδοι έρευνας που χρησιμοποιήθηκαν για τη συλλογή δεδομένων, η μέθοδος που ακολουθήθηκε για την πραγματοποίηση των υπολογισμών και τέλος τα θέματα ηθικής που προέκυψαν κατά τη μελέτη.

Στο **Κεφάλαιο 4** πραγματοποιείται συσχέτιση της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο, σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές μετρήσεις από δύο εργοτάξια μελέτης περίπτωσης τεχνικής εταιρείας και τέλος δημιουργία πλαισίου προτάσεων προς τις τεχνικές εταιρείες της βιομηχανίας.

Στο **Κεφάλαιο 5** πραγματοποιείται συσχέτιση των αποτελεσμάτων της έρευνας με αυτά που υπάρχουν στη βιβλιογραφία.

Στο **Κεφάλαιο 6** καταγράφονται τα συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα στο υπό εξέταση ερευνητικό πεδίο.

Στο **Κεφάλαιο 7** υπάρχει παράρτημα με τους γενικούς ορισμούς των μεγεθών που εξετάζει η μελέτη, το οποίο είναι χρήσιμο να διαβάσει ο αναγνώστης πριν προχωρήσει στη συνέχεια της εργασίας.

## 2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι χωματουργικές εργασίες αποτελούν σημαντικές δραστηριότητες σε έργα υποδομής, όπου εξοπλισμός βαρέων κατασκευών (heavy machinery) χρησιμοποιείται για εργασίες όπως η εκσκαφή, η μεταφορά και η τοποθέτηση ή απόρριψη των υλικών. Αυτός ο εξοπλισμός, χαρακτηρίζεται από καταναλώσεις μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και έχει υψηλό αντίκτυπο στο περιβάλλον (Jassim *et al.*, 2017). Επιπλέον, η απότομη άνοδος της τιμής των καυσίμων τα τελευταία χρόνια έχει δημιουργήσει την ανάγκη για εύρεση τρόπων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των μηχανημάτων. Είναι σαφές ότι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου είναι σημαντική έτσι ώστε να μειωθούν τόσο το ενεργειακό κόστος για τις εταιρείες όσο και οι ρυπογόνες ουσίες προς το περιβάλλον. Ωστόσο, ζητούμενο αποτελεί η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου σε συνδυασμό με την επίτευξη της υψηλότερης δυνατής παραγωγικότητας, κάτι το οποίο συχνά εξετάζεται χωριστά στη διεθνή βιβλιογραφία (Ng, Harding and Glass, 2016). Ως εκ τούτου, η παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση έχει σκοπό αρχικά να παρέχει μια εικόνα σχετικά με τη μελέτη των μεγεθών της ωριαίας κατανάλωσης και της παραγωγικότητας ως ανεξάρτητα μεγέθη. Εν συνεχεία, αποσκοπεί στη συσχέτιση των δύο μεγεθών, παρουσιάζοντας μελέτες που εξετάζουν την κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου για ένα πλήθος μηχανημάτων εργοταξίου.

Η κατανομή της ακαδημαϊκής βιβλιογραφίας πραγματοποιήθηκε με βάση το μέγεθος που εξετάζεται, καθώς και το είδος του εξοπλισμού στο οποίο εφαρμόζεται, όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

**Πίνακας 1: Μελέτες καταναμημένες με βάση το μέγεθος υπολογισμού και το είδος μηχανήματος**

Μέγεθος Υπολογισμού → Είδος Μηχανήματος ↓	Παραγωγικότητα (m <sup>3</sup> /h)	Ωριαία κατανάλωση καυσίμου (l/h)	Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου (l/m <sup>3</sup> )
Εκσκαφείς	(Panas and Pantouvakis, 2010) (Šopić <i>et al.</i> , 2021)	(Jassim, Lu and Olofsson, 2017)	(Ng, Harding and Glass, 2016) (Jassim, Lu and Olofsson, 2018b) (Devi and Palaniappan, 2017)
Φορτωτές			(Jassim, Lu and Olofsson, 2019)
Φορτηγά			(Devi and Palaniappan, 2017) (Jassim, Lu and Olofsson, 2018a)
Σύνολο μηχανημάτων εργοταξίου	(Filas, 2002) (Komatsu, 2006) (BLM, 1983)	(Filas, 2002) (Klanfar, Korman and Kujundžić, 2016)	(Trani <i>et al.</i> , 2016) (Jassim <i>et al.</i> , 2020)

## 2.1 Παραγωγικότητα εξοπλισμού

Η παραγωγικότητα ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του παραγόμενου έργου και της χρονικής διάρκειας μιας εργασίας (Hajji and Lewis, 2013) και στην παρούσα μελέτη εκφράζεται σε κυβικά μέτρα ανά ώρα ( $m^3/h$ ). Οι ερευνητές έχουν επικεντρώσει τις προσπάθειες τους στη θεωρητική εκτίμηση του μεγέθους της παραγωγικότητας, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και κατά το στάδιο μελέτης ενός έργου.

Οι Panas και Pantounakis (2010) παρείχαν ένα πλαίσιο σύγκρισης διαφόρων μεθόδων εκτίμησης της παραγωγικότητας, αξιολογώντας την ευαισθησία των μεταβλητών υπολογισμού σε εργασίες εκσκαφής. Η ανάλυση βασίστηκε σε δύο μεθοδολογίες, καλά εδραιωμένες στη βιβλιογραφία. Η πρώτη είναι γνωστή με το ακρωνύμιο BML (1983) και αναπτύχθηκε στη Γερμανία από μια επιτροπή της Κεντρικής Ένωσης των Γερμανικών Κατασκευαστικών Εταιρειών (Central Association of the German Construction Companies) και της Ομοσπονδίας της Γερμανικής Κατασκευαστικής Βιομηχανίας (Federation of the German Construction Industry) (Handbuch BML, 1983). Η συγκεκριμένη προσέγγιση, αναφέρεται στην εκτίμηση της παραγωγικότητας χωματοουργικών εργασιών σε μηχανήματα όπως οι εκσκαφείς, τα φορτηγά, οι φορτωτές και οι μπουλντόζες. Η δεύτερη βασίζεται στην 27<sup>η</sup> έκδοση του εγχειριδίου προδιαγραφών και εφαρμογών της Komatsu (Komatsu, 2006).

Τα αποτελέσματα της έρευνας, έδειξαν ότι η παραγωγικότητα των εκσκαφών επηρεάζεται σημαντικά από τις συνθήκες λειτουργίας, όπως το βάθος εκσκαφής, τη γωνία περιστροφής (με σκοπό την εκφόρτωση του υλικού) και τη χωρητικότητα του κουβά καθώς και ότι κάθε μεθοδολογία παρουσιάζει διαφορετική ευαισθησία σε κάθε λειτουργικό συντελεστή. Η προτεινόμενη προσέγγιση είναι χρήσιμη για την εκτίμηση της παραγωγικότητας υπό ένα δεδομένο σύνολο λειτουργικών συντελεστών. Έτσι, παρέχει μια εναλλακτική στις εκτιμήσεις οι οποίες προκύπτουν αποκλειστικά από την προσωπική κρίση του ανθρώπινου δυναμικού.

Σύμφωνα με τους Šorić *et al.* (2021), αποτελεσματική μέθοδος για την εκτίμηση της πραγματικής παραγωγικότητας των βαρέων μηχανημάτων του εργοταξίου αποτελεί η Όραση Υπολογιστών (Computer Vision). Σκοπός της μελέτης των παραπάνω ερευνητών αποτέλεσε η δημιουργία ενός πλαισίου γρήγορης εκτίμησης της πραγματικής παραγωγικότητας και του χρόνου κύκλου ενός εκσκαφέα σε ένα εργοτάξιο. Το πλαίσιο αυτό περιλαμβάνει τη χρήση βιντεοκάμερας και ύστερα την ανάλυση των βιντεοσκοπήσεων με τη βοήθεια υπολογιστικού προγράμματος. Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας έδειξαν ότι σε περιπτώσεις καθημερινής εφαρμογής του πλαισίου μπορούν να ληφθούν δεδομένα για την καλή παρακολούθηση και έλεγχο των χωματοουργικών εργασιών. Συγκεκριμένα, με την έννοια καθημερινής εφαρμογής, οι ερευνητές αναφέρονται στην καταγραφή πέντε με δέκα βίντεο και την ανάλυση δύο έως πέντε αυτών.

Συμπερασματικά, η εκτίμηση του μεγέθους της παραγωγικότητας μπορεί να γίνει είτε με χρήση αριθμητικών εξισώσεων (BML, 1983 ; Komatsu, 2006), λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργικές συνθήκες που πραγματοποιείται η εργασία, είτε με καταγραφή, παρατήρηση και ανάλυση της



εργασίας με τη βοήθεια τεχνολογικών μέσων. Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της κάθε περίπτωσης υπόκεινται στο κόστος εφαρμογής της, καθώς και στην ακρίβεια των υπολογισμών. Στην πρώτη περίπτωση, πραγματοποιείται μια προσέγγιση η οποία χαρακτηρίζεται από μικρό κόστος εφαρμογής και μεγαλύτερα σφάλματα, ενώ στη δεύτερη περίπτωση πραγματοποιείται μια πιο κοστοβόρα προσέγγιση που απαιτεί υψηλή τεχνογνωσία, η οποία ωστόσο διακρίνεται από σημαντική ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων.

## 2.2 Ωριαία κατανάλωση καυσίμου

Η ωριαία κατανάλωση καυσίμου στην παρούσα εργασία, ορίζεται ως η ποσότητα των λίτρων καυσίμου που καταναλώνει ένα μηχάνημα ανά ώρα λειτουργίας του. Σύμφωνα με τους Jassim, Lu και Olofsson (2017) υπάρχει έλλειψη μεθόδων στη διεθνή βιβλιογραφία που αποσκοπούν στην εκτίμηση της εν λόγω κατανάλωσης καυσίμου και κατ' επέκταση των εκπομπών CO<sub>2</sub> (μεγέθη τα οποία είναι άρρηκτα συνδεδεμένα), ιδίως κατά τη διάρκεια προμελέτης ενός έργου.

Οι συγκεκριμένοι ερευνητές πρότειναν ένα μοντέλο που χρησιμοποιεί αλγόριθμους τεχνικών νευρωνικών δικτύων (ANNs) για την πρόβλεψη της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO<sub>2</sub> ενός εκσκαφέα, λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες ενός εργοταξίου. Ο αλγόριθμος τροφοδοτήθηκε με δεδομένα από μια βάση δεδομένων που δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση που πρότεινε ο Filas (2002), λαμβάνοντας υπόψη τα λειτουργικά χαρακτηριστικά διαφόρων μοντέλων εκσκαφών και διαφορετικές παραμέτρους εκσκαφής. Τα αποτελέσματα του μοντέλου μπορούν να βοηθήσουν τους ενδιαφερόμενους να εκτιμήσουν τα εν λόγω μεγέθη με βάση μεταβλητές όπως το βάθος της εκσκαφής, τον χρόνο κύκλου του μηχανήματος, το ωφέλιμο φορτίο του κουβά, τον συντελεστή φόρτισης του μηχανήματος και τέλος την ιπποδύναμη του κινητήρα του εκσκαφέα. Τα δεδομένα που αφορούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του κάθε μηχανήματος, πάρθηκαν από εγχειρίδια της Caterpillar, ενώ οι συντελεστές φόρτισης προσδιορίστηκαν για διαφορετικές τιμές της πυκνότητας του υλικού εκσκαφής. Επιπλέον, τα μοντέλα σχεδιάστηκαν έτσι ώστε να μπορούν να προβλέπουν ποιες μεταβλητές εισόδου έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην κατανάλωση και στις εκπομπές CO<sub>2</sub>, με βάση την πραγματοποίηση Ανάλυσης Διαχωρισμού Βάρους (Partitioning Weight Analysis).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα προτεινόμενα μοντέλα μπορούν να παρέχουν ακριβή προσέγγιση της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO<sub>2</sub> των εκσκαφών, τόσο στο στάδιο προμελέτης όσο και κατά τη διάρκεια ενός έργου. Επιπλέον, οι ερευνητές οδηγήθηκαν στο συμπέρασμα ότι από τις μεταβλητές εισόδου, ο χρόνος κύκλου και ο συντελεστής φόρτισης του μηχανήματος έχουν την πιο σημαντική επίδραση στην ωριαία κατανάλωση και στις εκπομπές CO<sub>2</sub>. Η σημαντικότητα του συγκεκριμένου πορίσματος υπόκειται στη δυνατότητα που δίνεται στις τεχνικές εταιρείες να ελέγχουν τις μεταβλητές εκείνες που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα εν λόγω μεγέθη.

Μια διαφορετική προσέγγιση, βασισμένη σε μαθηματικές εξισώσεις και όχι συνδυασμό αυτών με αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης, πραγματοποίησαν οι Klanfar, Korman και Kujundžić



(2016). Η προσέγγιση αυτή βασίζεται αρχικά στην εκτίμηση της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου σύμφωνα με την κατάσταση και τον τύπο του κινητήρα. Ύστερα, στον προσδιορισμό της ονομαστικής τιμής ισχύος του κινητήρα, η οποία είναι γνωστή από τα εγχειρίδια του εξοπλισμού και τέλος, στον καθορισμό του συντελεστή φόρτισης για τον αντίστοιχο τύπο εξοπλισμού και τις αντίστοιχες συνθήκες λειτουργίας. Η παραπάνω μελέτη σε αντίθεση με τους Jassim, Lu και Olofsson (2017) δεν εστίασε αποκλειστικά στους εκσκαφείς, αλλά σε μηχανήματα όπως οι μπουλντόζες, οι τροχοφόροι φορτωτές, τα φορτηγά, οι εκσκαφείς κ.α. Έτσι, οι ερευνητές δημιούργησαν ένα πλαίσιο καθορισμού των μεταβλητών της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου και του συντελεστή φόρτισης για διαφορετικούς τύπους μηχανημάτων και για διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, το οποίο αποσκοπεί στην τελική εκτίμηση του μεγέθους της ωριαίας κατανάλωσης ενέργειας.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στην παραπάνω μελέτη δεν λήφθηκε υπόψη η μεταβλητή του χρόνου κύκλου για μηχανήματα όπως οι εκσκαφείς και οι φορτωτές, οι οποία όπως απέδειξαν οι Jassim, Lu και Olofsson (2017) έχει σημαντική επίδραση στην ενεργειακή κατανάλωση. Τέλος, το μοντέλο που ανέπτυξαν οι Jassim, Lu και Olofsson (2017) παρέχει με μεγάλη ακρίβεια εκτιμήσεις της κατανάλωσης, βάση των τιμών του μέσου τετραγωνικού σφάλματος που υπολόγισαν, σε αντίθεση με την προσέγγιση των Klanfar, Korman και Kujundžić (2016), η οποία παρέχει μια εκτίμηση που ενδεχομένως να περιέχει σημαντικότερα σφάλματα.

### 2.3 Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου

Σύμφωνα με τη μελέτη των Jassim, Lu και Olofsson (2018b) η κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά κυβικό μέτρο υλικού εκσκαφής ονομάζεται κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας και κανονικοποιημένες εκπομπές CO<sub>2</sub> αντίστοιχα. Στην παραπάνω μελέτη, το μέγεθος της κανονικοποιημένης κατανάλωσης ενέργειας μετριέται σε μονάδα MJ ανά κυβικό μέτρο εκσκαφής, ωστόσο για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας το μέγεθος ύστερα από την απαιτούμενη μετατροπή εκφράζεται ως κανονικοποιημένη κατανάλωση καυσίμου και η μονάδα μέτρησης είναι τα λίτρα ανά κυβικό μέτρο υλικού που επεξεργάζεται.

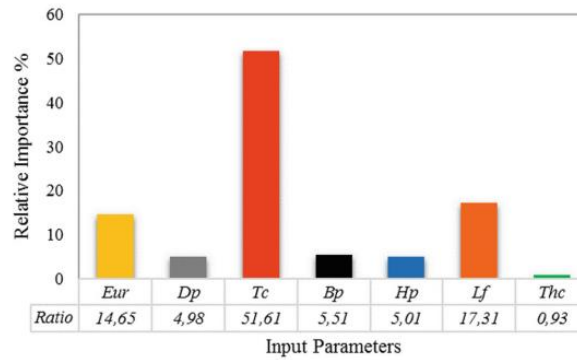
Το 2016 δημοσιεύτηκε μια μελέτη από τους Trani *et al.* (2016) η οποία εισήγαγε στη διεθνή βιβλιογραφία την έννοια της κατανάλωσης καυσίμου που απαιτείται για την επεξεργασία ενός κυβικού μέτρου οποιασδήποτε χωματουργικής εργασίας. Οι συγκεκριμένοι μελετητές, πρότειναν μια ποσοτική μέθοδο η οποία εστιάζει στην πρόβλεψη του μεγέθους της κατανάλωσης καυσίμου ανά κυβικό μέτρο στο στάδιο της προμελέτης ενός έργου. Οι υπολογισμοί βασίστηκαν σε δεδομένα που περιέχονται στα έγγραφα του κατασκευαστικού έργου, στις λειτουργικές παραμέτρους των μηχανημάτων του εργοταξίου που περιλαμβάνονται στα εγχειρίδια των κατασκευαστών και τέλος, στον υπολογισμό του συντελεστή φόρτισης κάθε μηχανήματος ξεχωριστά, λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του εδάφους, τον τύπο της επιφάνειας και τη διάρκεια χρήσης του μηχανήματος. Οι μελετητές πραγματοποίησαν υπολογισμούς για ένα μεγάλο σύνολο μηχανημάτων ενός εργοταξίου,

χαρακτηριστικά των οποίων αποτελούν οι εκσκαφείς, οι φορτωτές, οι μπουλντόζες και οδοστρωτήρες.

Εν συνεχεία, η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε σε μελέτη περίπτωσης έτσι ώστε να απεικονιστεί η προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου συγκριτικά με τα πραγματικά δεδομένα της κατανάλωσης που προκύπτουν από ένα εργοτάξιο. Τα αποτελέσματα της παραπάνω έρευνας έδειξαν ότι υπάρχει μια υποεκτίμηση της τάξης του 15% των θεωρητικών σε σχέση με τα πραγματικά δεδομένα. Σύμφωνα με τους μελετητές, η εν λόγω απόκλιση ενδέχεται να οφείλεται σε σφάλματα της υπολογιστικής μεθόδου λόγω παραδοχών στους υπολογισμούς, καταγραφής των πραγματικών δεδομένων του εργοταξίου καθώς και παραγόντων όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες οι οποίες δεν λήφθηκαν υπόψη στους υπολογισμούς. Ωστόσο, συμπεραίνουν ότι η προτεινόμενη μέθοδος χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική ακρίβεια και μπορεί να παρέχει μια αξιόπιστη εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου.

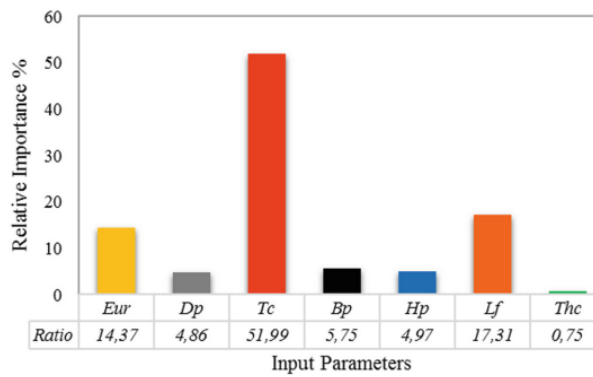
Η επόμενη μελέτη, η οποία εξέτασε την κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου πραγματοποιήθηκε από τους Jassim, Lu και Olofsson (2018b), εν συνεχεία της μελέτης που δημοσίευσαν για την πρόβλεψη της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου με χρήση αλγορίθμων τεχνητών νευρωνικών δικτύων (Jassim, Lu and Olofsson, 2017). Η εν λόγω μελέτη όπως προαναφέρθηκε, όρισε το μέγεθος της κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου έργου ως κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας με μονάδα μέτρησης τα MJ ανά κυβικό μέτρο εκσκαφής. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφει τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, τα οποία αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας δεδομένα από το εγχειρίδιο της Caterpillar, με σκοπό την εκτίμηση της κανονικοποιημένης κατανάλωσης ενέργειας και των κανονικοποιημένων εκπομπών CO<sub>2</sub> διαφορετικών εκσκαφών. Επιπλέον, οι μελετητές πραγματοποίησαν ανάλυση ευαισθησίας, έτσι ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση των βασικών παραμέτρων (ποσοστό χρήσης, βάθος εκσκαφής, χρόνος κύκλου, ωφέλιμο φορτίο κουβά, ιπποδύναμη, συντελεστής φόρτισης, χωρητικότητα μεταφορικού φορτηγού) στην ενεργειακή κατανάλωση και στις εκπομπές CO<sub>2</sub> (**Εικόνα 1, Εικόνα 2**).

Η παραπάνω μελέτη συμπέρανε ότι οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκσκαφών και κατ'επέκταση η ενεργειακή κατανάλωση τους, μπορούν να μειωθούν σημαντικά με τη βελτίωση του ποσοστού χρήσης ή/και του χρόνου κύκλου των εκσκαφών, καθώς και τη μείωση του συντελεστή φόρτισης του κινητήρα τους. Επιπλέον, αναφέρεται ότι η χρήση των μοντέλων στο στάδιο προμελέτης ενός έργου μπορεί να βοηθήσει τις τεχνικές εταιρείες στη βέλτιστη επιλογή εκσκαφέα για μια συγκεκριμένη εργασία, καθώς και στην αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των δραστηριοτήτων τους. Τέλος, η εφαρμογή του παραπάνω μοντέλου σε έργο οδοποιίας προσδιόρισε τον καταλληλότερο εκσκαφέα για τις απαιτήσεις του συγκεκριμένου έργου (**Εικόνα 3**), υποστηρίζοντας πως η επιλογή των κατάλληλων μηχανημάτων για τις χωματοουργικές εργασίες μπορεί να βοηθήσει την απόδοσή τους, να μειώσει τις εκπομπές CO<sub>2</sub> προς το περιβάλλον και να εξοικονομήσει χρήματα στις εταιρείες τα οποία προκύπτουν από το κόστος του καυσίμου.



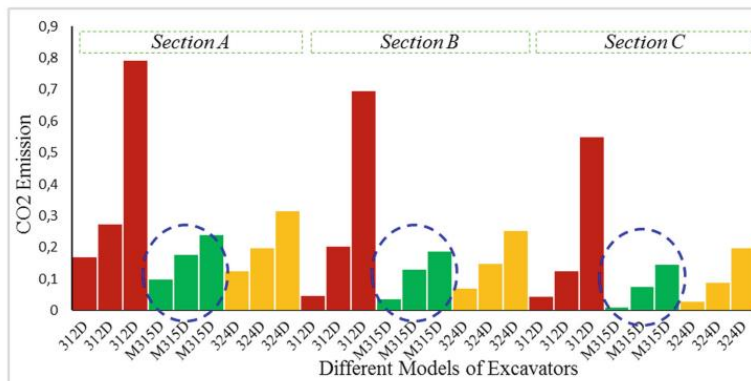
**Εικόνα 1: Επίδραση μεταβλητών εισόδου στην κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας**

Πηγή: (Jassim, Lu and Olofsson, 2018b)



**Εικόνα 2: Επίδραση μεταβλητών εισόδου στις κανονικοποιημένες εκπομπές CO2**

Πηγή: (Jassim, Lu and Olofsson, 2018b)

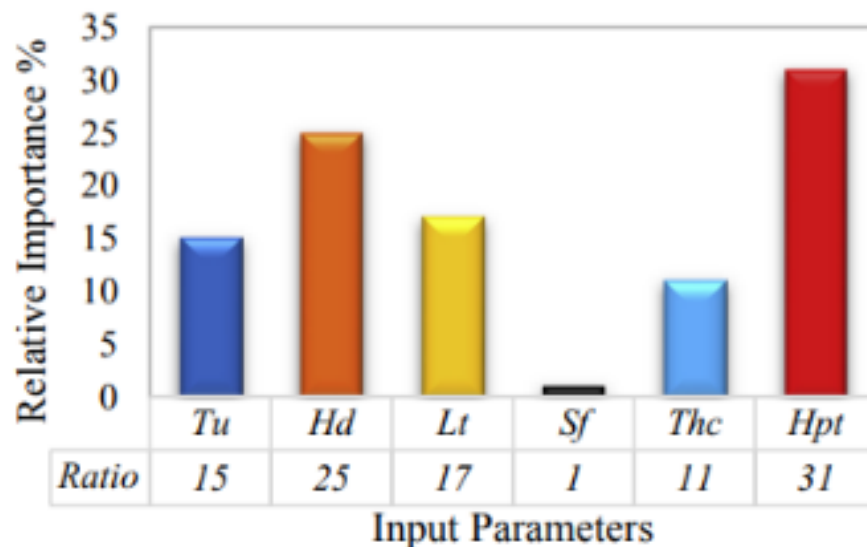


**Εικόνα 3: Εκπομπές CO2 διαφορετικών μοντέλων εκσκαφών**

Πηγή: (Jassim, Lu and Olofsson, 2018b)

Οι ίδιοι ερευνητές (Jassim, Lu and Olofsson, 2018a), σε συνέχεια της προαναφερόμενης μελέτης εξέτασαν την εκτίμηση των μεγεθών της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα κυβικού μέτρου μεταφερόμενων υλικών από φορτηγά εκτός δρόμου (offhighway trucks) σε χωματουργικές εργασίες, με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν δεδομένα από προσομοιώσεις διακριτών γεγονότων (Discrete Event Simulations), μια βάση δεδομένων με τα λειτουργικά χαρακτηριστικά των φορτηγών και λάβαν υπόψη διαφορετικές συνθήκες ενός εργοταξίου έτσι ώστε να εκπαιδεύσουν το προτεινόμενο μοντέλο τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANN'S). Οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποίησαν, αποτελούνταν από τα ανεξάρτητα μεγέθη του ποσοστού χρήσης φορτηγού, την απόσταση μεταφοράς του φορτίου, τον χρόνο φόρτωσης, τον συντελεστή διόγκωσης του υλικού, τη χωρητικότητα του φορτηγού και την ιπποδύναμη του κινητήρα.

Τα αποτελέσματα της εν λόγω έρευνας, έδειξαν ότι το προτεινόμενο μοντέλο αποτελεί αξιόπιστη μέθοδο για την πρόβλεψη των μεγεθών της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα κυβικού μέτρου μεταφερόμενων υλικών, στο στάδιο προμελέτης ενός έργου. Επιπλέον, οι ερευνητές συμπέραναν ότι η ιπποδύναμη κινητήρα του φορτηγού καθώς και οι αποστάσεις μεταφοράς του φορτίου επηρεάζουν σημαντικά την αύξηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των φορτηγών και κατ' επέκταση την ενεργειακή τους κατανάλωση. Τέλος, τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι η περιβαλλοντική επίπτωση των φορτηγών μπορεί να μειωθεί με τη βελτίωση του ποσοστού χρήσης τους και τη μείωση του χρόνου φόρτωσης του υλικού σε αυτά (**Εικόνα 4**).

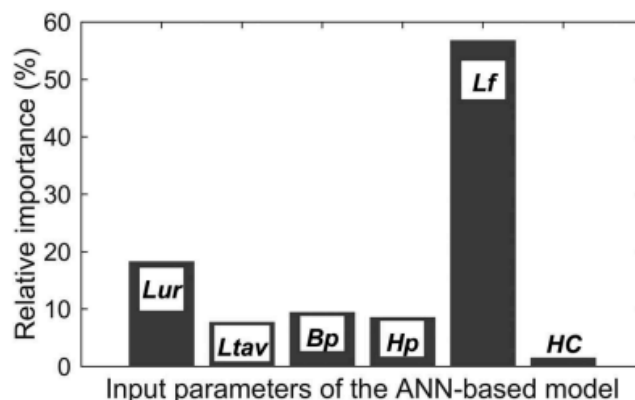


**Εικόνα 4:** Επίδραση μεταβλητών εισόδου στην κατανάλωση και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά κυβικό μέτρο μεταφερόμενων υλικών

Πηγή: (Jassim, Lu and Olofsson, 2018a)

Έναν χρόνο αργότερα, οι ίδιοι ερευνητές Jassim, Lu και Olofsson (2019) προσδιόρισαν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της μεταφοράς υλικών με χρήση τροχοφόρων φορτωτών, κατά τη διάρκεια χωματοουργικών εργασιών. Αυτό πραγματοποιήθηκε όπως και στις προηγούμενες δύο μελέτες των ερευνητών, με την ανάπτυξη ενός μοντέλου τεχνητών νευρωνικών δικτύων το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα στάδια προμελέτης ενός έργου με σκοπό τον προσδιορισμό της κατανάλωσης καυσίμου ανά κυβικό μέτρο υλικού που μεταφέρεται από τους τροχοφόρους φορτωτές. Η προσέγγιση του συγκεκριμένου μεγέθους, τους επέτρεψε να εκτιμήσουν τις εκπομπές έξι συνολικά ατμοσφαιρικών ρύπων ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{VOC}$  &  $\text{PM}$ ). Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιήσαν αποτελούνταν από το ποσοστό χρήσης του φορτωτή, τον μέσο χρόνο φόρτωσης του υλικού, το ωφέλιμο φορτίο του κουβά, την ιπποδύναμη του κινητήρα, τον συντελεστή φόρτισης και τέλος τη χωρητικότητα του μεταφορικού φορτηγού. Οι εν λόγω μεταβλητές πάρθηκαν από εγχειρίδια της Caterpillar καθώς και από προσομοιώσεις διακριτών συμβάντων (DES) για επιλεγμένες συνθήκες χωματοουργικών εργασιών. Επιπλέον, πραγματοποίησαν ανάλυση ευαισθησίας ώστε να προσδιορίσουν την επίδραση της κάθε μεταβλητής εισόδου στην ενεργειακή κατανάλωση (Εικόνα 5).

Η παραπάνω μελέτη έδειξε ότι η μεταβλητή που συμβάλει σημαντικότερα στην εκπομπή ατμοσφαιρικών ρύπων είναι ο συντελεστής φόρτισης και ότι ο καλύτερος τρόπος για να μειωθούν αυτές οι εκπομπές είναι η μεγιστοποίηση του ποσοστού χρήσης των τροχοφόρων φορτωτών. Επιπλέον, η εφαρμογή της μεθόδου σε μελέτη περίπτωσης έδειξε ότι το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη με σκοπό την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των χωματοουργικών εργασιών ενός τροχοφόρου φορτωτή, βοηθώντας παράλληλα τις τεχνικές εταιρείες να πραγματοποιήσουν τη βέλτιστη επιλογή του εξοπλισμού.



**Εικόνα 5: Επίδραση μεταβλητών εισόδου στην κατανάλωση και τις εκπομπές  $\text{CO}_2$  ανά μονάδα παραγόμενου έργου των φορτωτών**

Πηγή: (Jassim, Lu and Olofsson, 2019)

Οι ερευνητές (Jassim *et al.*, 2020) ολοκληρώνοντας τη μελέτη τους γύρω από το αντικείμενο της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου, προτείναν ένα πλήρες μοντέλο το οποίο έχει ως σκοπό να προσφέρει χρήσιμη καθοδήγηση για τον βέλτιστο σχεδιασμό και την αξιολόγηση των χωματοουργικών εργασιών. Αυτό επιτυγχάνεται με την επιλογή των βέλτιστων αποστάσεων για τη μεταφορά των υλικών από τις περιοχές εκσκαφής και πλήρωσης, ακολουθούμενη από την επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού ύστερα από την εκτίμηση της επίδοσης που βασίζεται στο κόστος, τη διάρκεια, την κατανάλωση καυσίμου και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου. Εν συνεχεία, οι μελετητές προτείνουν τρεις προσεγγίσεις για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων που αφορούν την κατανομή των χωματοουργικών εργασιών στον χώρο του εργοταξίου, έτσι ώστε να διασφαλίζεται η μείωση των συνολικών επιπτώσεων του έργου. Ο εξοπλισμός και οι αντίστοιχες χωματοουργικές εργασίες που εξετάζονται, είναι εκσκαφείς, τροχοφόροι φορτωτές, μεταφορικά φορτηγά και μπουλντόζες, ωστόσο το μοντέλο έχει εφαρμογή και σε υπόλοιπα μηχανήματα εργοταξίου.

Έτσι, δημιούργησαν ένα πλαίσιο μείωσης των επιπτώσεων χωματοουργικών εργασιών που λαμβάνουν χώρα σε ένα εργοτάξιο χρησιμοποιώντας το εργαλείο βελτιστοποίησης μαζικών μεταφορών DynaRoad, προσομοιώσεις διακριτών συμβάντων (DES) ώστε να μοντελοποιήσουν τις πραγματικές συνθήκες εργασίας σε ένα εργοτάξιο και τέλος τις μαθηματικές εξισώσεις που ανέπτυξαν οι ίδιοι (Jassim, Lu and Olofsson, 2018b, 2018a). Το εν λόγω πλαίσιο εφαρμόστηκε σε μελέτη περίπτωσης, ώστε να εξεταστεί η καταλληλότερη από τις προτεινόμενες προσεγγίσεις, για συγκεκριμένα δεδομένα ενός έργου.

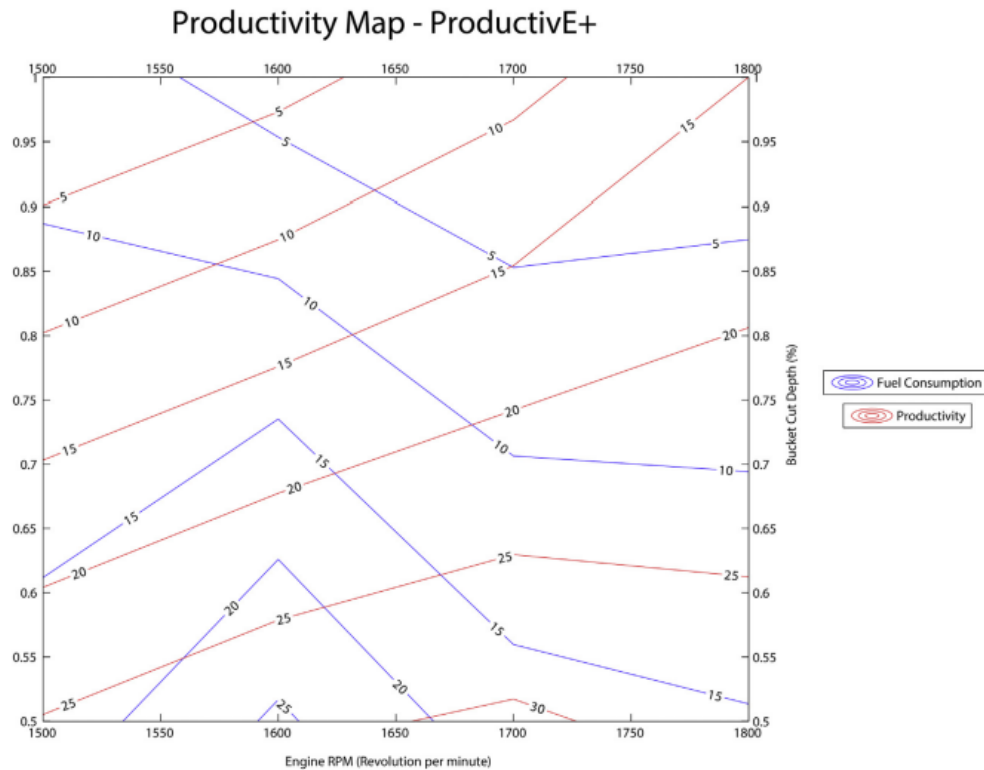
Οι Devi και Palaniappan, (2017) εξέτασαν την επίδραση των λειτουργικών, τεχνολογικών και του έργου παραμέτρων στην απόδοση των χωματοουργικών εργασιών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν πραγματικά δεδομένα από μελέτες περιπτώσεων πέντε συνολικά εργοταξίων, στα οποία διερεύνησαν την επίδραση μεταβλητών όπως ο τύπος του εδάφους, το βάθος της εκσκαφής, ο τύπος του μηχανολογικού εξοπλισμού και η εμπειρία των χειριστών στην ενεργειακή κατανάλωση (σε μονάδα MJ/m<sup>3</sup>), τον χρόνο και το κόστος. Για κάθε εργοτάξιο μελετήθηκαν εργασίες εκσκαφής και μεταφοράς του υλικού και εξετάστηκε η σχέση μεταξύ της παραγωγικότητας του εξοπλισμού και της ενεργειακής κατανάλωσης. Αξιοσημείωτη παρατήρηση σε ένα από τα εργοτάξια αποτέλεσε ότι το υψηλότερο ποσοστό παραγωγικότητας οδήγησε σε μικρότερη κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα εκσκαφέντος υλικού. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι ενώ στα τέσσερα εργοτάξια η ενεργειακή κατανάλωση βρίσκεται στο εύρος 19-23 MJ/m<sup>3</sup>, στο πέμπτο εργοτάξιο ισούται με 135 MJ/m<sup>3</sup> η οποία είναι περίπου πέντε φορές μεγαλύτερη, λόγω της εκσκαφής σε περιβάλλον σκληρού βράχου. Επιπρόσθετα, οι μελετητές διαπίστωσαν ότι το κόστος μεταφοράς ανά κυβικό μέτρο εκσκαφέντος υλικού ενδέχεται να είναι υψηλότερο από το κόστος εκσκαφής, στην περίπτωση που το φορτηγό δεν αξιοποιείται σωστά. Συμπέραναν συνεπώς, ότι πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην επιλογή του κατάλληλου μηχανολογικού εξοπλισμού (εκσκαφέα-φορτηγού) κατά το στάδιο σχεδιασμού ενός έργου. Ακόμη, αναφέρουν ότι τα ευρήματα της έρευνας τους πρόκειται να είναι χρήσιμα στη λήψη αποφάσεων της διαδικασίας σχεδιασμού ενός έργου.



Ολοκληρώνοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση στο εξεταζόμενο ερευνητικό αντικείμενο, άξια αναφοράς είναι η μελέτη η οποία πραγματοποιήθηκε από τους Ng, Harding και Glass (2016). Οι εν λόγω ερευνητές δηλώνουν τη σημαντικότητα εξερεύνησης της σχέσης που συνδέει την παραγωγικότητα με την κατανάλωση του καυσίμου ενός εκσκαφέα. Επιπλέον, δηλώνουν την κρισιμότητα που χαρακτηρίζει τον ρόλο του χειριστή του μηχανήματος, ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη παραγωγικότητα με την ελάχιστη κατανάλωση καυσίμου. Ως εκ τούτου, οι μελετητές παρουσιάζουν μια προσέγγιση που επιτρέπει στους χειριστές να πετύχουν τη βέλτιστη παραγωγικότητα με την ελάχιστη δυνατή ενεργειακή κατανάλωση. Η προσέγγιση αυτή εξετάζει τις μεταβλητές της ταχύτητας του κινητήρα και του βάθους κοπής του κουβά (bucket cut depth), ώστε να καθορίσει τις επιπτώσεις τους στα μεγέθη της παραγωγικότητας και της κατανάλωσης.

Τα αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν ότι ο συνδυασμός διαφόρων ρυθμίσεων της ταχύτητας του κινητήρα και του βάθους κοπής του κουβά μπορεί να αυξήσει την παραγωγικότητα κατά 30% και να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 24%, μετακινώντας 62% περισσότερο υλικό ανά ώρα και λίτρο καυσίμου που καταναλώνεται. Επιπλέον, υποδηλώνουν ότι ο προσδιορισμός του βέλτιστου βάθους κοπής του κουβά αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την αύξηση της παραγωγικότητας και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Καταλήγουν ότι η εκπαίδευση των χειριστών με στόχο την καλύτερη δυνατή επιλογή της ταχύτητας του κινητήρα και του βάθους κοπής του κουβά αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική προσέγγιση για τη μείωση του λειτουργικού κόστους και των εκπομπών CO<sub>2</sub>, μέσω της χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου και της μικρότερης καταπόνησης του μηχανήματος.

Είναι αναγκαίο να σημειωθεί ότι, ενώ η παραπάνω έρευνα δεν εξετάζει με τη χρήση ποσοτικών μεθόδων τη σχέση μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και παραγόμενου έργου, αποτυπώνει τη σημαντική επίδραση που έχει ο χειριστής στα εκάστοτε μεγέθη. Επίσης, προτείνει ένα διάγραμμα το οποίο βοηθά τους χειριστές να επιλέξουν τον κατάλληλο συνδυασμό μεταβλητών ταχύτητας κινητήρα και βάθους κοπής κουβά, με σκοπό τη βέλτιστη απόδοση του μηχανήματος (**Εικόνα 6**).



Εικόνα 6: Χάρτης παραγωγικότητας ProductivE+

Πηγή: (Ng, Harding and Glass, 2016)

## 2.4 Συμπεράσματα βιβλιογραφικής ανασκόπησης

Ολοκληρώνοντας τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, διαπιστώνεται ότι το αντικείμενο της εκτίμησης των μεγεθών της κατανάλωσης καυσίμου και της παραγωγικότητας των μηχανημάτων ενός εργοταξίου έχει μελετηθεί από διαφορετικές οπτικές γωνίες. Αρχικά, έχει μελετηθεί ως προς την ανεξάρτητη εκτίμηση των μεγεθών της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου και της παραγωγικότητας των μηχανημάτων. Επιπλέον, οι μελετητές έχουν πραγματοποιήσει σύνδεση των δύο μεγεθών, υπολογίζοντας τελικά το μέγεθος της κατανάλωσης ανά μονάδα παραγόμενου έργου. Ακόμα, όσον αφορά τη μέθοδο εκτίμησης των μεγεθών, έχουν χρησιμοποιηθεί μέθοδοι που συνδυάζουν μαθηματικές εξισώσεις και αλγόριθμους τεχνητής νοημοσύνης, καθώς και αμιγώς ποσοτικές μέθοδοι που προσεγγίζουν τα μεγέθη με την αποκλειστική χρήση μαθηματικών εξισώσεων. Η διαφορά των δύο αυτών προσεγγίσεων, υπόκειται στη μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών που προσφέρουν οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης, οι οποίοι ωστόσο απαιτούν την αντίστοιχη τεχνογνωσία. Τέλος, οι μελετητές έχουν εστιάσει στην πρόβλεψη του μεγέθους της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου κυρίως στο στάδιο μελέτης ενός έργου, για μηχανήματα όπως οι



εκσκαφείς, οι τροχοφόροι φορτωτές, τα φορτηγά, καθώς και σε συνδυαστικό επίπεδο για το σύνολο των μηχανημάτων ενός εργοταξίου.

Τα αποτελέσματα των μελετών έχουν δείξει ότι υπάρχουν πολλές μεταβλητές που επηρεάζουν τα αντίστοιχα μεγέθη, με τις σημαντικότερες από αυτές που συμβάλουν στην αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου ανά παραγόμενο έργο, να αποτελούν τον χρόνο κύκλου, το ποσοστό χρήσης και τον συντελεστή φόρτισης ενός μηχανήματος. Επιπλέον, ενώ στις περισσότερες μελέτες δεν εξετάζεται η επίδραση του χειριστή του εκάστοτε μηχανήματος στα μεγέθη της ενεργειακής κατανάλωσης, έχει πραγματοποιηθεί έρευνα που εξετάζει την εν λόγω επίδραση δημιουργώντας τελικά έναν οδηγό χρήσης για τους χειριστές, με σκοπό την επίτευξη της βέλτιστης κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου (**Εικόνα 6**). Τέλος, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι είναι εφικτή μια ικανοποιητικής ακρίβειας προσέγγιση των μεγεθών της κατανάλωσης τόσο κατά τη διάρκεια όσο και στο στάδιο μελέτης ενός έργου, η οποία μπορεί να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και του κόστους ενέργειας των τεχνικών εταιρειών και να βοηθήσει τους κατασκευαστές στη βέλτιστη επιλογή μηχανολογικού εξοπλισμού για τις απαιτήσεις μίας συγκεκριμένης εργασίας.

Σε αυτό το σημείο, κρίνεται απαραίτητο να αποτυπωθεί το κενό της υφιστάμενης βιβλιογραφίας το οποίο ύστερα από τη σχετική ανασκόπηση, διαπιστώθηκε ότι βρίσκεται στη σύγκριση των εκτιμήσεων της κατανάλωσης ανά μονάδα παραγόμενου έργου με τα πραγματικά δεδομένα που προκύπτουν από ένα εργοτάξιο. Πιο συγκεκριμένα, η βιβλιογραφία κρίνεται ελλιπής στην προσέγγιση των ενεργειακών καταναλώσεων με οριακές τιμές των μεταβλητών που συμβάλουν σημαντικότερα στην αύξηση των καταναλώσεων αυτών (π.χ. χρόνος κύκλου). Εξίσου ελλιπής παρουσιάζεται ως προς την αναγωγή σε κόστος της απόκλισης των θεωρητικών με τα πραγματικά μεγέθη, καθώς και ως προς την υποβολή προτάσεων στις τεχνικές εταιρείες για το πώς η θεωρητική προσέγγιση με τα πραγματικά δεδομένα μπορούν να συγκλίνουν όσο το δυνατόν περισσότερο.

Συνεπώς, η παρούσα διπλωματική εργασία με τη βοήθεια της μελέτης περίπτωσης σε τεχνική εταιρεία προσπαθεί να καλύψει το εν λόγω κενό και να συνεισφέρει στην περαιτέρω ενίσχυση του ερευνητικού πεδίου της συσχέτισης μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και παραγόμενου έργου, το οποίο δεν έχει μελετηθεί από πολλούς επιστήμονες.

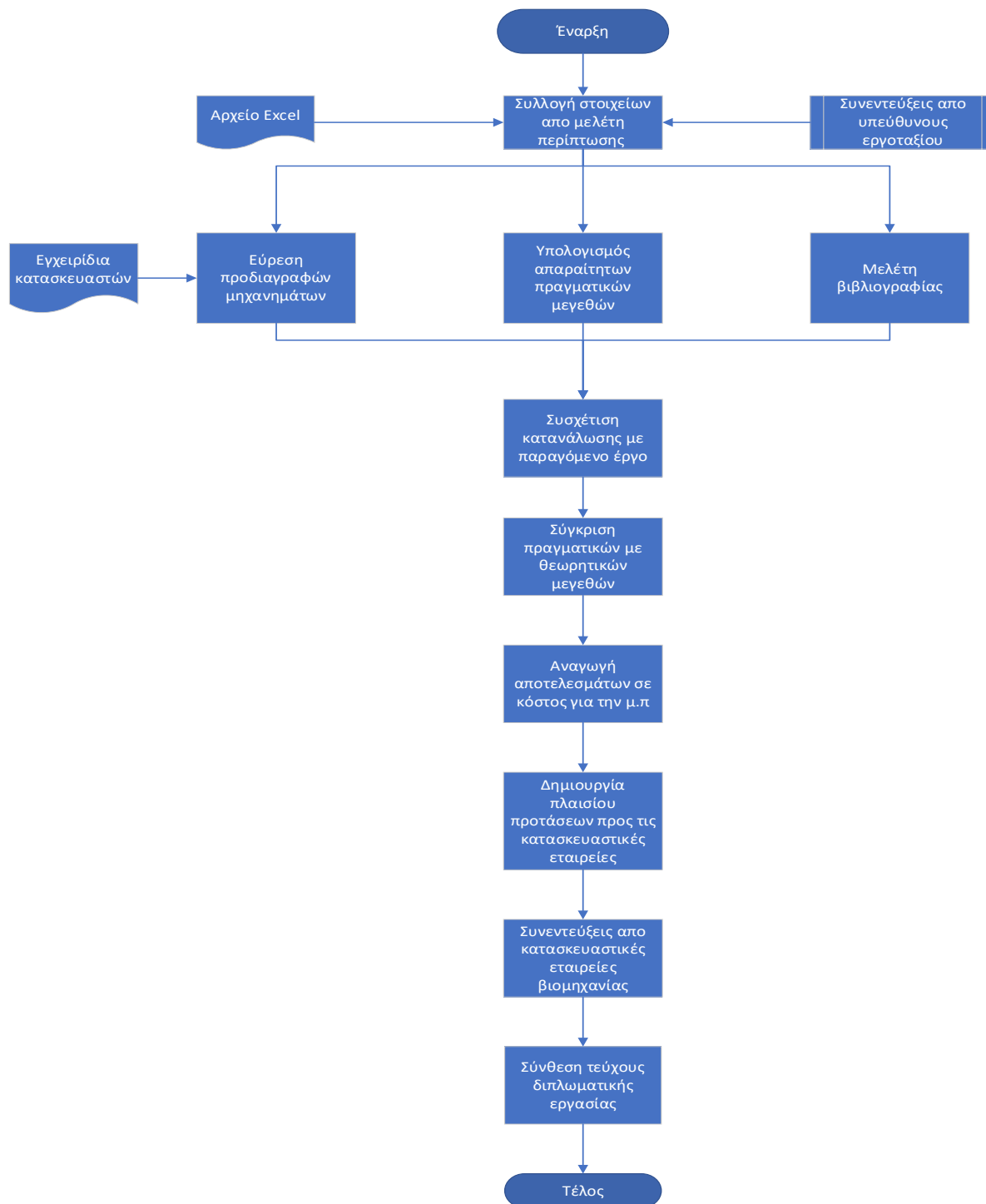
## 3. Μεθοδολογία

### 3.1 Μέθοδοι έρευνας

#### 3.1.1 Επιλογή μεθόδων έρευνας

Για την επιτυχή εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν τρεις βασικές μέθοδοι έρευνας. Αρχικά, κρίθηκε απαραίτητη η μελέτη της υφιστάμενης βιβλιογραφίας με σκοπό την κατανόηση του ερευνητικού αντικειμένου, τον εντοπισμό παρόμοιων ερευνών και τέλος τον προσδιορισμό του «κενού» το οποίο επιχειρεί η παρούσα εργασία να καλύψει. Εν συνεχεία, κρίθηκε σημαντικό οι γνώσεις και τα δεδομένα που αποκομίστηκαν από τη βιβλιογραφική μελέτη, να εφαρμοστούν σε μελέτη περίπτωσης τεχνικής εταιρείας έτσι ώστε να αξιολογηθεί η εφαρμογή τους σε ένα πραγματικό κατασκευαστικό έργο. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη περίπτωσης βοήθησε στη συλλογή δεδομένων από δύο εργοτάξια, που αφορούσαν τους τύπους μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται, τις ώρες λειτουργίας τους καθώς και την κατανάλωση καυσίμου και το παραγόμενο έργο. Τέλος, πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις τόσο με τους υπεύθυνους εργοταξίου της μελέτης περίπτωσης για την καλύτερη κατανόηση των συνθηκών λειτουργίας του, όσο και με εργαζόμενους άλλων τεχνικών εταιρειών τα βιομηχανίας με σκοπό την άντληση πληροφοριών που αφορούν την εφαρμογή του ερευνητικού αντικειμένου της εργασίας στην πράξη.

Τα βήματα τα οποία ακολουθήθηκαν για την επίτευξη των ερευνητικών στόχων της εργασίας, παρουσιάζονται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί (**Σχήμα 1**).



**Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής μεθόδου ανάπτυξης εργασίας**

### 3.1.2 Μελέτη βιβλιογραφίας

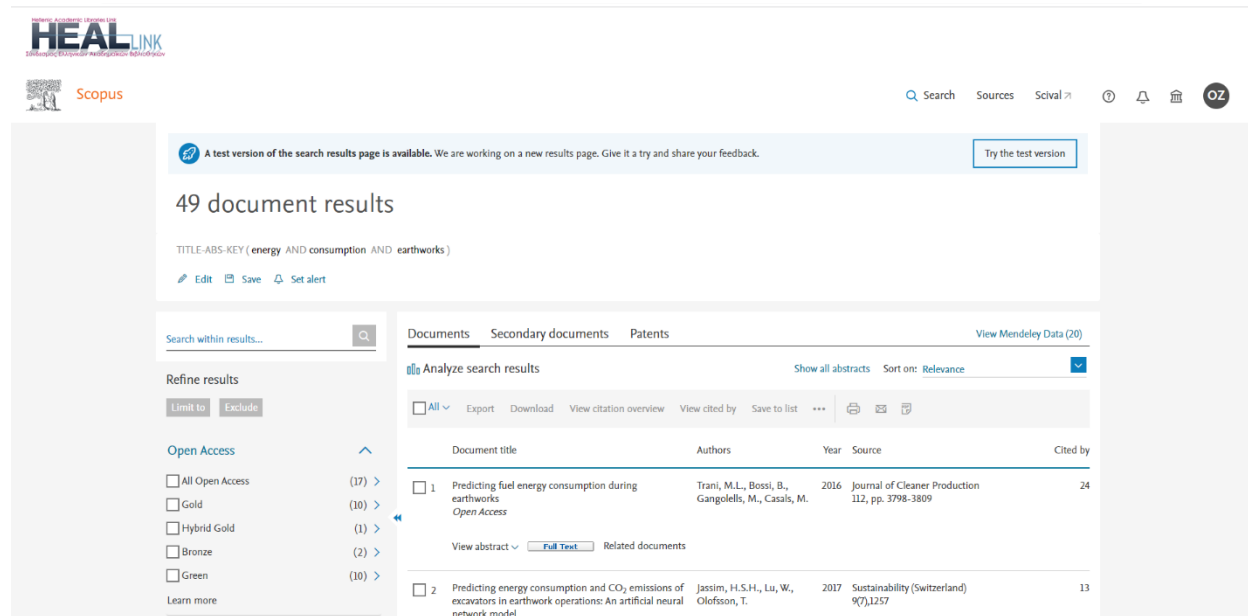
Η μελέτη της βιβλιογραφίας συνιστά απαραίτητη διαδικασία για την εκπόνηση μίας επιτυχημένης διπλωματικής εργασίας. Πιο συγκεκριμένα, παρέχει στον μελετητή το απαραίτητο γνωστικό υπόβαθρο έτσι ώστε να μπορέσει να πραγματοποιήσει έρευνα στο αντικείμενο που έχει επιλέξει, και κατ' επέκταση να συνεισφέρει στην περαιτέρω ανάπτυξη του ερευνητικού πεδίου με τα αποτελέσματα της εργασίας του. Αυτό πραγματοποιείται, ύστερα από τον εντοπισμό ενός πλήθους ακαδημαϊκών άρθρων και ερευνών, τα οποία συνοψίζονται, αξιολογούνται και συγκρίνονται από τον ερευνητή. Αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας είναι η διαμόρφωση μιας πλήρους εικόνας του υπό ανάλυση κλάδου. Αυτό δίνει τη δυνατότητα στον ερευνητή να πραγματοποιήσει την έρευνά του υποβοηθούμενος από μελέτες άλλων επιστημόνων, καθώς και να εντοπίσει το «κενό» που υπάρχει στην υφιστάμενη βιβλιογραφία, έτσι ώστε να επιχειρήσει να εξελίξει το πεδίο που σχετίζεται με το αντικείμενο της μελέτης του.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η βιβλιογραφική έρευνα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια των βιβλιογραφικών βάσεων δεδομένων Scopus, ResearchGate και Google Scholar. Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο παρέχει τη δυνατότητα στους φοιτητές να έχουν ελεύθερη πρόσβαση στις πλατφόρμες Scopus και ResearchGate με τη χρήση της ακαδημαϊκής ταυτότητας, ενώ το Google Scholar είναι μία ελεύθερα προσβάσιμη μηχανή αναζήτησης, η οποία χρησιμοποιήθηκε συμπληρωματικά.

Με σκοπό τον εντοπισμό των απαραίτητων ακαδημαϊκών δημοσιεύσεων, κρίθηκε απαραίτητος ο προσδιορισμός των λέξεων-κλειδιών που σχετίζονται με το αντικείμενο της μελέτης. Συγκεκριμένα, έγινε διερεύνηση επιστημονικών άρθρων γύρω από το αντικείμενο της συσχέτισης της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο στην κατασκευαστική βιομηχανία. Συνεπώς, οι βασικές λέξεις κλειδιά που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής : **“energy consumption”, “productivity”, “construction”, “earthworks”, “excavators”, “produced”, “work”**.

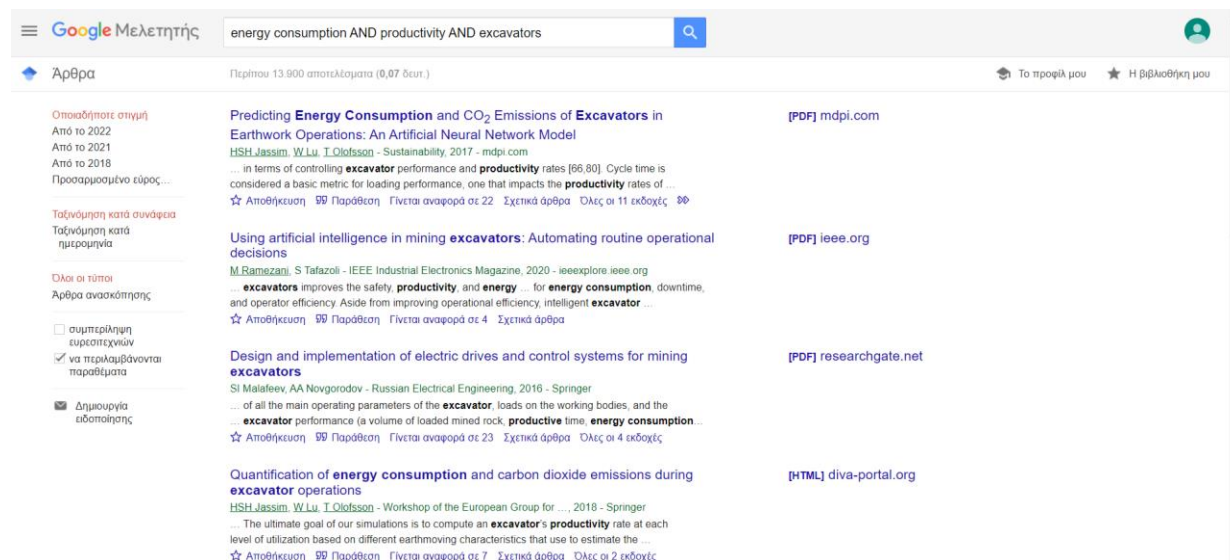
Έπειτα, πληκτρολογώντας τις λέξεις-κλειδιά στο περιβάλλον γραμμής αναζήτησης του Scopus (**Εικόνα 7**) με τη χρήση των απαιτούμενων λογικών τελεστών AND και OR, εντοπίστηκε ένας αριθμός δημοσιεύσεων που σχετίζονται με τις εν λόγω λέξεις. Από τα αποτελέσματα της αναζήτησης έγινε ανάγνωση της περίληψης αυτών που είχαν τη μεγαλύτερη συσχέτιση με τις λέξεις-κλειδιά, και σε περίπτωση που αποτελούσαν έρευνες που εξετάζουν το αντικείμενο μελέτης, πραγματοποιούνταν πλήρης ανάγνωση και αξιολόγηση της δημοσίευσης. Στην περίπτωση που προαναφέρθηκε, έλαβε χώρα ιχνηλάτηση του συγκεκριμένου άρθρου, μέσω εντοπισμού των βιβλιογραφικών αναφορών, καθώς και των παραπομπών (citations) διαφορετικών δημοσιεύσεων σε αυτό. Έτσι, εντοπίστηκε ένας αριθμός δημοσιεύσεων που εξετάζουν επακριβώς το αντικείμενο της κατανάλωσης ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου έργου, αλλά και δημοσιεύσεις που εξετάζουν τα μεγέθη της παραγωγικότητας και της ωριαίας κατανάλωσης ενέργειας ξεχωριστά. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στις μελέτες που σχετίζονται άμεσα με το αντικείμενο της έρευνας, ωστόσο

πραγματοποιήθηκε ανάγνωση ενός μεγάλου αριθμού μελετών που σχετίζονται έμμεσα με αυτό, με σκοπό την καλύτερη κατανόηση του χώρου που εξετάζει η παρούσα εργασία.



Εικόνα 7: Περιβάλλον αναζήτησης Scopus

Αντίστοιχα, παρατίθενται και παραδείγματα των αναζητήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον του Google Scholar (Εικόνα 8) και του ResearchGate (Εικόνα 9).



Εικόνα 8: Περιβάλλον αναζήτησης Google Scholar

**Εικόνα 9: Εντοπισμός αναφορών και παραπομπών επιστημονικού άρθρου μέσω του ResearchGate**

### 3.1.3 Μελέτη περίπτωσης

Η μελέτη περίπτωσης είναι μία ερευνητική προσέγγιση η οποία χρησιμοποιείται για την σε βάθος και πολύπλευρη κατανόηση ενός σύνθετου ζητήματος στο πλαίσιο της πραγματικής ζωής (Crowe *et al.*, 2011). Σύμφωνα με τον Yin (2009), οι μελέτες περιπτώσεων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να «εξηγήσουν, περιγράψουν ή διερευνήσουν» γεγονότα ή φαινόμενα στο πλαίσιο όπου συμβαίνουν. Με λίγα λόγια, η μελέτη περίπτωσης αναλύει ένα καθορισμένο πρόβλημα που συνιστάται σε μια πραγματική κατάσταση και χρησιμοποιεί πραγματικά δεδομένα ως εργαλείο μεθόδου (Herrera, Cruz, Ramírez and Cisternas, 2016). Η συγκεκριμένη μέθοδος προκρίνεται από τους ερευνητές έναντι άλλων, καθώς τους δίνει τη δυνατότητα να εξετάσουν σε βάθος ένα πραγματικό φαινόμενο και να ελέγξουν την εφαρμογή της έρευνάς τους σε ένα πλαίσιο πραγματικών συνθηκών.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε μελέτη περίπτωσης τεχνικής εταιρείας ούτως ώστε να υπάρχει ένα πλαίσιο σύγκρισης των θεωρητικών υπολογισμών των μεγεθών της ενεργειακής κατανάλωσης με τις πραγματικές μετρήσεις που προέκυψαν από τα εργοτάξια. Επιπλέον, ύστερα από την εν λόγω σύγκριση δόθηκε η δυνατότητα για αναγωγή σε ενδεχόμενη εξοικονόμηση κόστους ενέργειας για την εταιρεία, η οποία οδήγησε στη δημιουργία ενός πλαισίου προτάσεων προς τις τεχνικές εταιρείες της βιομηχανίας με σκοπό την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης ανά μονάδα παραγόμενου έργου και κατ' επέκταση των εκπομπών CO<sub>2</sub> και του κόστους ενέργειας.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν, δόθηκαν από την εταιρεία και αφορούσαν μετρήσεις των μεγεθών της κατανάλωσης καυσίμου σε λίτρα, του παραγόμενου έργου σε κυβικά μέτρα καθώς και των ωρών λειτουργίας για κάθε τύπο μηχανήματος που χρησιμοποιήθηκε στα εργοτάξια. Επιπλέον, δόθηκε υπόμνημα για το ακριβές μοντέλο του μηχανήματος που χρησιμοποιήθηκε στις χωματουργικές εργασίες, το οποίο έδωσε τη δυνατότητα για τη θεωρητική προσέγγιση της κατανάλωσης μέσω εγχειριδίων των κατασκευαστών. Επιπρόσθετα, εκτός από τα δεδομένα που αφορούσαν τις μετρήσεις από τα εργοτάξια, κρίθηκε σημαντικό να πραγματοποιηθεί συνέντευξη από τους υπεύθυνους, έτσι ώστε να αντληθούν πληροφορίες σχετικά με τις συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν οι εργασίες (π.χ. τύπος εδάφους). Τα πορίσματα της εν λόγω συνέντευξης αναφέρονται αναλυτικά στο κεφάλαιο **3.1.4**. Κλείνοντας, είναι σημαντικό να αναφερθεί πως η χρήση μελέτης περίπτωσης αποτέλεσε ανεκτίμητο εργαλείο για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής, χωρίς το οποίο θα ήταν δύσκολο να πραγματοποιηθεί η παρούσα έρευνα.

### 3.1.4 Συνεντεύξεις

Οι συνεντεύξεις συνιστούν μια ποιοτική μέθοδο έρευνας που βασίζεται στην πραγματοποίηση ερωτήσεων με σκοπό τη συλλογή δεδομένων (George, 2022). Οι συνεντεύξεις διακρίνονται ανάλογα με τη δομή τους σε δομημένες, ημιδομημένες και μη δομημένες. Στο πλαίσιο μιας ποιοτικής έρευνας, οι δομημένες συνεντεύξεις οι οποίες περιλαμβάνουν την πραγματοποίηση των ίδιων ερωτήσεων σε όλους τους συμμετέχοντες, κρίνονται περιοριστικές. Ωστόσο, οι ημιδομημένες συνεντεύξεις κρίνονται πιο ευέλικτες, καθώς περιλαμβάνουν ένα σύνολο ερωτήσεων που σκοπό έχουν να καθοδηγήσουν τη συζήτηση (Duncan and Holtslander, 2012). Οι συνεντεύξεις μπορούν να πραγματοποιηθούν δια ζώσης, τηλεφωνικά ή ηλεκτρονικά με τη χρήση προγραμμάτων όπως το Skype (Duncan and Holtslander, 2012). Οι ερευνητές συχνά χρησιμοποιούν την εν λόγω μέθοδο, καθώς τους βοηθά να κατανοήσουν καλύτερα και να διερευνήσουν τις απόψεις, τη συμπεριφορά και τις εμπειρίες των υποκείμενων της έρευνας (Research Guides: Research Methods Guide: Interview Research, 2022).

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκαν συνεντεύξεις τόσο με τους υπεύθυνους των εργοταξίων της μελέτης περίπτωσης όσο και με εργαζόμενους άλλων τεχνικών εταιρειών της βιομηχανίας. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ήταν αυτή των ημιδομημένων συνεντεύξεων, καθώς είχαν προετοιμαστεί εκ των προτέρων κάποιες ερωτήσεις που σκοπό ωστόσο είχαν να καθοδηγήσουν τη συζήτηση, ούτως ώστε να ληφθούν όσο το δυνατόν περισσότερες πληροφορίες από τους ανθρώπους που έλαβαν μέρος. Ειδικότερα, η συνέντευξη με τους υπευθύνους των εργοταξίων πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού Microsoft Teams, ενώ αυτή με τους εργαζόμενους τεχνικών εταιρειών της βιομηχανίας πραγματοποιήθηκε τηλεφωνικά. Σκοπός της πρώτης συνέντευξης ήταν η συλλογή πληροφοριών σχετικά με τις συνθήκες που πραγματοποιούνται οι εργασίες στα υπό εξεταζόμενα εργοτάξια, καθώς και η διευκρίνιση κάποιων δεδομένων που αφορούσαν αυτά. Σκοπός της δεύτερης συνέντευξης αποτέλεσε η συλλογή πληροφοριών σχετικών με την πρακτική εφαρμογή του αντικειμένου μελέτης της εργασίας από τις τεχνικές εταιρείες της



βιομηχανίας. Η δεύτερη συνέντευξη πραγματοποιήθηκε ύστερα από το πέρας του ερευνητικού σταδίου της παρούσας διπλωματικής, προκειμένου ο ερευνητής να είχε πλήρη κατανόηση του υπό εξέταση αντικειμένου, και οι ερωτήσεις να ήταν όσο το δυνατόν πιο στοχευμένες.

Αναλυτικότερα, στη συνέντευξη με τους υπεύθυνους εργοταξίου έλαβαν μέρος ο Υπεύθυνος Ενεργειακής Διαχείρισης μιας εκ των μεγαλύτερων τεχνικών εταιρειών της Ελλάδος, καθώς και ο Υπεύθυνος Συντήρησης Μηχανολογικού Εξοπλισμού σε ένα από τα μεγαλύτερα και πιο προβεβλημένα εργοτάξια της χώρας. Οι ερωτήσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στην συνέχεια:

- **Χρόνος Κύκλου εκσκαφέα:** Εάν η παραδοχή για χρόνο μεταξύ 22 και 28 δευτερολέπτων βρίσκεται κοντά στα πραγματικά δεδομένα.
- **Χρόνος λειτουργίας μηχανημάτων:** Εάν αυτός ο χρόνος αντιπροσωπεύει τον συνολικό χρόνο που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί η αντίστοιχη εργασία, ή τον χρόνο που δούλεψε στην πραγματικότητα ο εκσκαφέας. Στην ουσία, εάν ο χρόνος αυτός περιλαμβάνει και οποιαδήποτε αναμονή του εκσκαφέα ή διάλειμμα του χειριστή.
- **Ποσοστό χρήσης εκσκαφέα:** Εάν η παραδοχή για ποσοστό χρήσης του μηχανήματος ίσο με 60%, ανταποκρίνεται στα πραγματικά δεδομένα.
- **Υλικό εκσκαφής:** Εάν η παραδοχή για αργλικό υλικό σε ξηρή κατάσταση ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα, και σε περίπτωση που δεν ανταποκρίνεται είναι σημαντικό να προσδιοριστεί το υλικό εκσκαφής, καθώς και σε περίπτωση που είναι εφικτό και το βάθος της.

Ύστερα από τη συζήτηση που έλαβε χώρα με τους υπευθύνους, προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- **Χρόνος Κύκλου εκσκαφέα:** Η παραδοχή για το εύρος χρόνου κύκλου του εκσκαφέα που αναφέρθηκε παραπάνω αποτελεί λογικό νούμερο, ωστόσο μέσα σε αυτόν τον χρόνο περιλαμβάνονται κάποια δευτερόλεπτα για διαμόρφωση του υλικού. Επιπρόσθετα, σε κάθε εκσκαφή υλικού, στόχος είναι να γεμίσει όσο το δυνατόν περισσότερο ο κουβάς του μηχανήματος.
- **Χρόνος λειτουργίας μηχανημάτων:** Αυτός ο χρόνος αντιπροσωπεύει τον συνολικό χρόνο που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί η αντίστοιχη εργασία, συνεπώς περιλαμβάνει 30 λεπτά διάλειμμα των χειριστών και οποιονδήποτε χρόνο αναμονής σε περίπτωση που αργήσει το δρομολόγιο κάποιου φορτηγού.
- **Ποσοστό χρήσης εκσκαφέα :** Η παραδοχή για ποσοστό χρήσης ίσο με 60% αποτελεί πολύ μικρό νούμερο. Το ποσοστό αναφέρθηκε ότι βρίσκεται μεταξύ 80-90% με μέση τιμή το 85%. Το συγκεκριμένο ποσοστό αποτελεί στην πραγματικότητα τον χρόνο επί τοις 100 που σκάβει το μηχάνημα (δηλαδή αφαιρούνται ο χρόνος διαμόρφωσης, ο χρόνος διαλείμματος και ο χρόνος αναμονής).



- **Υλικό εκσκαφής:** Το υλικό εκσκαφής είναι κυρίως αργιλικό, μέχρι ημιβραχώδες σε κάποια σημεία. Το βάθος της εκσκαφής δεν είναι εφικτό να προσδιοριστεί καθώς αποτελεί αστάθμητο παράγοντα, ωστόσο οι υπεύθυνοι ανέφεραν ότι σύμφωνα με την εμπειρία τους δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την κατανάλωση ενέργειας.

Σε αυτό το σημείο σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι τα παραπάνω συμπεράσματα αφορούν τις εργασίες ενός εκσκαφέα για τις συνθήκες λειτουργίας του εργοταξίου Α, το οποίο αναφέρεται στο κεφάλαιο **3.2**.

Όσον αφορά τις συνεντεύξεις με εργαζομένους τεχνικών εταιρειών της βιομηχανίας, αρχικά περιγράφηκε το αντικείμενο μελέτης της διπλωματικής εργασίας, τονίζοντας τη σημαντικότητα του εγχειρήματος της συσχέτισης μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και παραγόμενου έργου στα μηχανήματα ενός εργοταξίου. Ύστερα, διερωτήθηκαν εάν στην εταιρεία που εργάζονται πραγματοποιείται μελέτη σχετικά με την κατανάλωση του καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου, τόσο σε πλαίσιο πρόβλεψης πριν την έναρξη ενός έργου όσο σε πλαίσιο σύγκρισης κατά τη διάρκεια ενός έργου. Από τις εν λόγω συνεντεύξεις λήφθηκαν οι εξής πληροφορίες:

- Δεν πραγματοποιείται κάποια μελέτη στο πλαίσιο συσχέτισης της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο, ωστόσο οποιαδήποτε προσέγγιση των μεγεθών της κατανάλωσης και της παραγωγικότητας ξεχωριστά, γίνεται με βάση τα εγχειρίδια των κατασκευαστών.
- Οι συγκεκριμένες εταιρείες δουλεύουν με υπεργολάβους, συνεπώς πολλές φορές δεν είναι αυτές οι οποίες ασχολούνται με τέτοιου είδους μελέτες.
- Θεωρούν πως με τη μελέτη της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι εφικτή η κοστολόγηση μιας εργασίας πριν την έναρξη ενός έργου, δεδομένου ότι είναι γνωστός ο όγκος εκσκαφής ή επεξεργασίας.
- Σημαντικό πόρισμα το οποίο προέκυψε και από την ίδια τη βιβλιογραφική ανασκόπηση της εργασίας, είναι ότι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα μεγέθη της κατανάλωσης και παραγωγικότητας είναι η ικανότητα του εκάστοτε χειριστή μηχανήματος.

### 3.2 Μέθοδος υπολογισμών

Οι μέθοδοι έρευνας που προαναφέρθηκαν δημιούργησαν το πλαίσιο για την πραγματοποίηση της συσχέτισης μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και παραγόμενου έργου σε κατασκευαστικά έργα. Με τη βοήθεια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης προσδιορίστηκαν οι απαραίτητες μαθηματικές εξισώσεις για τον υπολογισμό της κατανάλωσης ανά μονάδα παραγόμενου έργου. Επιπλέον, με τη βοήθεια των εγχειριδίων των κατασκευαστών προσδιορίστηκαν τα απαραίτητα για τους υπολογισμούς λειτουργικά χαρακτηριστικά των μηχανημάτων. Ύστερα, η μελέτη περίπτωσης αποτέλεσε σημαντικό πλαίσιο σύγκρισης των υπολογισμών, έτσι ώστε να είναι εφικτή η δημιουργία πλαισίου προτάσεων προς τις τεχνικές εταιρείες της βιομηχανίας. Ακόμα, οι συνεντεύξεις με τους υπεύθυνους των εργοταξίων της μελέτης περίπτωσης οδήγησαν στη λήψη σημαντικών δεδομένων σχετικά με τις συνθήκες λειτουργίας που αποτέλεσαν μεταβλητές για τους υπολογισμούς που ακολούθησαν. Τέλος, οι συνεντεύξεις με εργαζόμενους τεχνικών εταιρειών της βιομηχανίας βοήθησαν στην καλύτερη κατανόηση της εφαρμογής της παρούσας έρευνας στην πράξη καθώς και στον προσδιορισμό των περιορισμών που τη χαρακτηρίζει. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί η μέθοδος που ακολουθήθηκε για τους υπολογισμούς σε δύο εργοτάξια της μελέτης περίπτωσης, για συνολικά τέσσερα μηχανήματα εργοταξίου.

Αρχικά, τα εργοτάξια και οι μήνες για τα οποία πραγματοποιήθηκε η ανάλυση είναι:

- Εργοτάξιο Α
  - i. Μάιος 2021
  - ii. Ιούλιος 2021
  
- Εργοτάξιο Β
  - i. Νοέμβριος 2021
  - ii. Δεκέμβριος 2021
  - iii. Ιανουάριος 2022
  - iv. Φεβρουάριος 2022

Ενώ τα μηχανήματα των εργοταξίων τα οποία μελετήθηκαν είναι:

- Ελαστικοφόροι – Ερπυστριοφόροι Εκσκαφείς
- Ελαστικοφόροι Φορτωτές
- Πρωθητήρες Γαιών
- Ισοπεδωτές Γαιών

Οι εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο αναπτύχθηκαν από τους Jassim, Lu και Olofsson (2017,2018b) (**Εξίσωση 1, Εξίσωση 2, Εξίσωση 3**) και από τους Trani *et al.* (2016) (**Εξίσωση 4**) και παρουσιάζονται στη συνέχεια:

**Εξίσωση 1: Κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας**

$$En = \frac{SFC \cdot Hp \cdot L_f \cdot E_{cf}}{\rho_{fuel} \cdot Epr}$$

**Εξίσωση 2: Παραγωγικότητα**

$$Epr = \frac{Bp \cdot Eur \cdot 60}{T_c}$$

**Εξίσωση 3: Ωφέλιμο φορτίο κουβά**

$$Bp = B_s \cdot B_f$$

**Εξίσωση 4: Συντελεστής φόρτισης**

$$L_f = \frac{L_{f1} + L_{f2}}{2} = \frac{0.0399e^{0.0014D} + 0.2007e^{0.00262T}}{2}$$

Όπου:

- $En \left(\frac{MJ}{m^3}\right)$ : Κανονικοποιημένη κατανάλωση καυσίμου
- $SFC \left(\frac{kg}{kW \cdot h}\right)$ : Ειδική κατανάλωση καυσίμου
- $Hp (kW)$ : Μέγιστη ιπποδύναμη σχεδιασμού κινητήρα
- $L_f (\%)$ : Συντελεστής φόρτισης κινητήρα
- $E_{cf} \left(\frac{MJ}{l}\right)$ : Συντελεστής μετατροπής για την ενέργεια κάθε λίτρου καυσίμου ντίζελ
- $\rho_{fuel} \left(\frac{kg}{l}\right)$ : Ειδικό βάρος καυσίμου ντίζελ
- $Epr \left(\frac{m^3}{h}\right)$ : Παραγωγικότητα μηχανήματος
- $Bp (m^3)$ : Ωφέλιμο φορτίο κουβά
- $B_s (m^3)$ : Χωρητικότητα κουβά
- $B_f (\%)$ : Ποσοστό πλήρωσης κουβά

- $Eur$  (%): Ποσοστό χρήσης μηχανήματος
- $T_c$  (min): Χρόνος κύκλου μηχανήματος

Υπογραμμίζεται ακόμη, ότι στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, όπου απαιτούμενο μέγεθος υπολογισμού είναι η κατανάλωση καυσίμου σε λίτρα ανά μονάδα παραγόμενου έργου σε κυβικά μέτρα, από την **Εξίσωση 1** παραλήφθηκε ο συντελεστής μετατροπής ενέργειας για κάθε λίτρο καυσίμου ντίζελ, ούτως ώστε η κανονικοποιημένη κατανάλωση καυσίμου να είναι σε μονάδα μέτρησης λίτρων ανά κυβικό μέτρο. Προέκυψε έτσι η **Εξίσωση 5**:

**Εξίσωση 5: Κανονικοποιημένη κατανάλωση καυσίμου**

$$En_f \left( \frac{l}{m^3} \right) = \frac{SFC \cdot Hp \cdot L_f}{\rho_{fuel} \cdot Epr}$$

Συμπληρωματικά, ο συντελεστής φόρτισης σύμφωνα με τους Trani *et al.* (2016) επηρεάζεται τόσο από τον τύπο του εδάφους, δηλαδή την πυκνότητα αυτού, όσο και από τη διάρκεια του ημερήσιου προγράμματος εργασίας. Έτσι, ο υπολογισμός του με βάση την **Εξίσωση 4** προκύπτει από το ημίθροισμα της μεταβλητής  $L_{f1}$  όπου  $D \left( \frac{kg}{m^3} \right)$  η πυκνότητα του εδάφους, με τη μεταβλητή  $L_{f2}$  όπου  $T$  η διάρκεια χρήσης μετρημένη σε λεπτά.

Οι υπολογισμοί για το εργοτάξιο Α πραγματοποιήθηκαν για μέση τιμή της πυκνότητας εδάφους που περιλαμβάνει εργασίες αφαίρεσης φυτικών γαιών, καθώς και γενικές εκσκαφές σε κυρίως αργιλικό μέχρι ημιβραχώδες περιβάλλον, σύμφωνα με την **Εικόνα 10**.

Identification of load factor values, depending on type of soil.

Type of soil	Material density in bank [kg/m <sup>3</sup> ]	Load factor range	Cluster mean	Load factor
<b>Top soil</b>	<b>1370</b>	<b>L</b>	<b>1545.71</b>	<b>20%</b>
Silt – dry	1420	L	1545.71	23%
Earth – loam	1540	L	1545.71	26%
Earth and silt – dry	1540	L	1545.71	29%
Sand – dry loose	1600	L	1545.71	31%
Clay and gravel – dry	1660	L	1545.71	34%
Gravel – dry	1690	L	1545.71	37%
<b>Clay – dry</b>	<b>1840</b>	<b>M</b>	<b>1952.31</b>	<b>40%</b>
Clay and gravel – wet	1840	M	1952.31	42%
Sand and silt – dry	1850	M	1952.31	43%
Earth – dry packed	1900	M	1952.31	45%
Gravel – dry 6–50 mm	1900	M	1952.31	47%
Sand – damp	1900	M	1952.31	48%
Sand and gravel – dry	1930	M	1952.31	50%
Rock 25%, earth 75%	1960	M	1952.31	52%
Earth – wet excavated	2020	M	1952.31	53%
Sand and clay	2020	M	1952.31	55%
Earth and silt – wet	2060	M	1952.31	57%
Clay – wet	2080	M	1952.31	58%
Sand – wet	2080	M	1952.31	60%
Sand and gravel – wet	2230	H	2390.00	65%
Gravel – wet 6–50 mm	2260	H	2390.00	70%
<b>Rock 50%, earth 50%</b>	<b>2280</b>	<b>H</b>	<b>2390.00</b>	<b>75%</b>
Rock 75%, earth 25%	2790	H	2390.00	80%

**Εικόνα 10: Πυκνότητα υλικού ανάλογα με τον τύπο του εδάφους**

Πηγή: (Trani *et al.*, 2016).

Συγκεκριμένα, υπολογίστηκε μέση τιμή της πυκνότητας υλικού ίση με  $1834 \text{ kg/m}^3$ , η οποία υπολογίστηκε για τις εργασίες που περιλαμβάνει ο **Πίνακας 2**.

**Πίνακας 2: Μέση τιμή πυκνότητας υλικού**

Είδος εργασίας	Συντελεστής βαρύτητας	Πυκνότητα υλικού ( $\text{kg/m}^3$ )
Αφαίρεση φυτικών γαιών	0,2	1370
Γενικές εκσκαφές σε αργιλικό περιβάλλον	0,6	1840
Γενικές εκσκαφές σε ημιβραχώδες περιβάλλον	0,2	2280
Μέση τιμή πυκνότητας υλικού		1834

Η μέση τιμή της πυκνότητας του υλικού προσδιορίστηκε για εργασίες που πραγματοποιήθηκαν κατά ποσοστό ίσο με 20% σε περιβάλλον φυτικών γαιών, 60% σε αργιλικό περιβάλλον και 20% σε ημιβραχώδες περιβάλλον. Το ποσοστό εργασιών για αφαίρεση φυτικών γαιών προέκυψε από τα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης, ενώ τα υπόλοιπα δύο ποσοστά αποτελούν εκτιμήσεις με βάση τη συνέντευξη. Η διάρκεια χρήσης θεωρήθηκε ίση με 8 ώρες κατά μέσο όρο, ύστερα από την επεξεργασία των δεδομένων που αφορούν τις ημερήσιες ώρες εργασίας των μηχανημάτων, καθώς και τον χρόνο διαλείμματος των χειριστών. Σε αυτό το σημείο, άξιες αναφοράς είναι οι τιμές των μεταβλητών οι οποίες παραμένουν σταθερές στους υπολογισμούς της κατανάλωσης ανά μονάδα παραγόμενου έργου και των δύο εργοταξίων. Αρχικά, το ειδικό βάρος του καυσίμου ντίζελ προσδιορίστηκε ίσο με  $0,85 \left(\frac{\text{kg}}{\text{l}}\right)$  (Kecojevic and Komljenovic, 2011; Zhang *et al.*, 2014). Συνακόλουθα, από τις συνεντεύξεις που πραγματοποιήθηκαν με τους υπεύθυνους των εργοταξίων, προσδιορίστηκε το ποσοστό χρήσης των μηχανημάτων ίσο με 85% καθώς και το ποσοστό πλήρωσης του κουβά ίσο με 100%. Τέλος, για τον υπολογισμό των εκπομπών  $\text{CO}_2$  ανά μονάδα κυβικού μέτρου χρησιμοποιήθηκε συντελεστής μετατροπής  $\text{CO}_2$  για κάθε λίτρο καυσίμου ντίζελ, ίσος με  $2,6569 \left(\frac{\text{kg CO}_2}{\text{l}}\right)$  (Hill *et al.*, 2011). Οι υπόλοιπες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για τους υπολογισμούς διαφέρουν ανά εργοτάξιο και τύπο μηχανήματος, και συνεπώς οι τιμές τους θα προσδιοριστούν στο κύριο μέρος της εργασίας.

Τέλος, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο **1.3** υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός μεταβλητών που επηρεάζει την κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου (**Εξίσωση 5**). Ωστόσο, οι υπολογισμοί με βάση την **Εξίσωση 5** δεν λαμβάνουν υπόψη τον ανθρώπινο παράγοντα καθώς και την επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών (π.χ. θερμοκρασία, καιρικά φαινόμενα) στο μέγεθος της κατανάλωσης.

### 3.3 Θέματα ηθικής κατά τη μελέτη

Είναι δεδομένο ότι στα πλαίσια εκπόνησης μιας μελέτης, ο ερευνητής πρέπει να συμμορφώνεται με τους κώδικες ηθικής που χαρακτηρίζουν μια επιστημονική έρευνα. Αρχικά, οι κώδικες ηθικής προωθούν τους στόχους της έρευνας, όπως είναι «*η γνώση, η αλήθεια και η αποφυγή σφαλμάτων*» (Resnik, 2020). Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι η διαδικασία της έρευνας πολλές φορές περιλαμβάνει τη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών ανθρώπων, τα δεοντολογικά πρότυπα προωθούν αξίες όπως η εμπιστοσύνη, ο αμοιβαίος σεβασμός και η διασφάλιση των προσωπικών δεδομένων. Επομένως, στη συνέχεια θα γίνει αναφορά σε θέματα ηθικής που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Κατά τη διάρκεια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης ήταν απαιτούμενο να ληφθούν υπόψη οι σημαντικοί ηθικοί κώδικες που τη χαρακτηρίζουν. Ειδικότερα, ο ερευνητής ήταν υποχρεωμένος να αναφέρει κάθε πηγή που χρησιμοποιήθηκε για την έρευνά του και να μην υποπέσει σε ζητήματα λογοκλοπής. Ακόμη, σημαντική κρίθηκε η ορθή ερμηνεία και μεταφορά των αποτελεσμάτων της έρευνας άλλων επιστημόνων, χωρίς τη διαστρέβλωση του περιεχομένου αυτής. Έτσι, μία έρευνα που συνδυάζει την αποτελεσματική χρήση των διαθέσιμων πόρων, με αναφορά σε αυτούς και χωρίς παραποίηση του περιεχομένου τους συνιστά μια αξιόπιστη μελέτη που συμμορφώνεται στους κανόνες της ηθικής.

Εν συνεχεία, η χρήση της μεθόδου μελέτης περίπτωσης στην παρούσα διπλωματική απαιτούσε εξίσου τη συμμόρφωση στους ηθικούς κώδικες. Συγκριμένα, η εταιρεία της μελέτης περίπτωσης θέλησε για ευνόητους λόγους να παραμείνει ανώνυμη. Έτσι, οποιαδήποτε αναφορά στην παρούσα εργασία που σχετίζεται με την εταιρεία, όπως για παράδειγμα τα εργοτάξια ή η τυπολογία των μηχανημάτων έχει πραγματοποιηθεί με τρόπο τέτοιο ώστε να διασφαλίζεται η ανωνυμία της. Επιπλέον, τα δεδομένα τα οποία λήφθηκαν από την εταιρεία για την πραγματοποίηση της παρούσας έρευνας, αποτέλεσαν εμπιστευτικά στοιχεία τα οποία ο ερευνητής χρησιμοποίησε αποκλειστικά και μόνο για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Τέλος, η μέθοδος έρευνας των συνεντεύξεων αποτελεί έρευνα η οποία πραγματοποιείται σε ανθρώπους. Απαιτούμενο μιας τέτοιας έρευνας είναι να σέβεται τα δικαιώματα και τα προσωπικά δεδομένα του κάθε συμμετέχοντα. Έτσι, κρίθηκε απαραίτητο να διασφαλιστεί η ανωνυμία των συμμετεχόντων, χωρίς να γίνει αναφορά στο όνομά τους ή στην εταιρεία την οποία εργάζονται. Τα πορίσματα των εν λόγω συνεντεύξεων προέκυψαν ύστερα από γραπτές σημειώσεις του ερευνητή κατά τη διάρκεια της συνέντευξης, καθώς δεν υπήρξε οποιασδήποτε μορφής καταγραφή των συζητήσεων που έλαβαν χώρα.

## 4. Συσχέτιση κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο και σύγκριση με τα πραγματικά δεδομένα των εργοταξίων

### 4.1 Μελέτη περίπτωσης σε τεχνική εταιρεία

Ο όμιλος της τεχνικής εταιρείας της μελέτης περίπτωσης αποτελεί έναν από τους πιο ισχυρούς ομίλους στην Ελλάδα. Κατέχει σημαντική θέση σε τομείς όπως οι κατασκευές, η ενέργεια καθώς και η διαχείριση των απορριμμάτων. Σκοπός του ομίλου είναι η διαρκής και βιώσιμη ανάπτυξη του, καθώς και η διατήρηση και ενίσχυση της ισχυρής θέσης του τόσο στην Ελληνική όσο και στην παγκόσμια αγορά. Η παρουσία του στην παγκόσμια αγορά εμφανίζεται σε χώρες της κεντρικής και νοτιοανατολικής Ευρώπης καθώς και στις Η.Π.Α, τη Μέση Ανατολή και τη Βόρεια Αφρική.

Η κατασκευαστική εταιρεία του ομίλου αναλαμβάνει και εκτελεί ένα μεγάλο πλήθος δημοσίων και ιδιωτικών έργων, τα οποία χαρακτηρίζονται από υψηλό προϋπολογισμό και σύνθετη τεχνογνωσία. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων έργων αποτελούν τα οδικά και σιδηροδρομικά δίκτυα, κτιριακές εγκαταστάσεις, πολιτιστικές και βιομηχανικές εγκαταστάσεις κ.λπ. Δύο από τα εν ενεργεία έργα της εταιρείας χρησιμοποιούνται για την ανάλυση που ακολουθεί, με τη μορφή του εργοταξίου Α και του εργοταξίου Β αντίστοιχα.

### 4.2 Εργοτάξιο Α

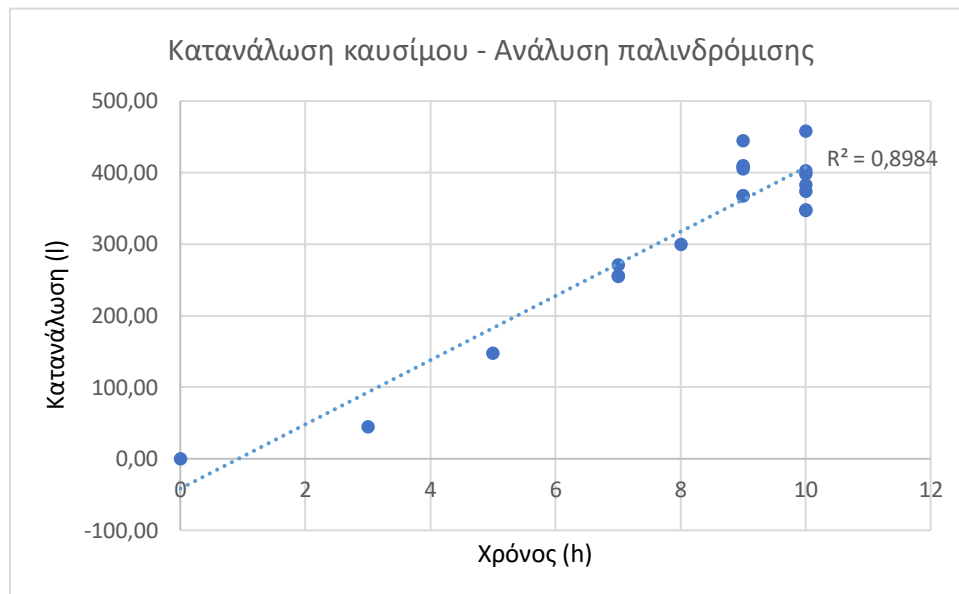
Στο συγκεκριμένο εργοτάξιο πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για ερπυστριοφόρο εκσκαφέα του μοντέλου R500LC-7A της Hyundai με τα παρακάτω χαρακτηριστικά (**Πίνακας 3**) για τους μήνες Μάιο και Ιούλιο του 2021.

**Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά Ερπυστριοφόρου Εκσκαφέα εργοταξίου Α**

Κατασκευαστής	Hyundai
Μοντέλο	R500LC – 7A
Συντελεστής φόρτισης	57,3 %
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kg/kWh)	0,217
Ιπποδύναμη (kW)	266
Χωρητικότητα κουβά (m <sup>3</sup> )	2,15
Ειδικό βάρος καυσίμου (kg/l)	0,85

#### 4.2.1 Μάιος 2021

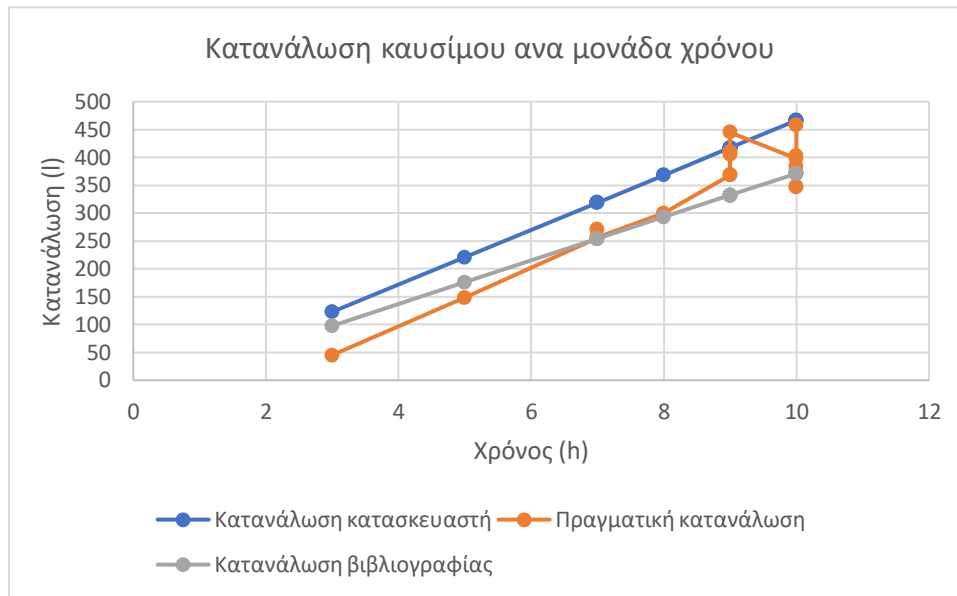
Διαπιστώθηκε ότι στα δεδομένα υπήρχαν καταγραφές που αφορούσαν την ποσότητα καυσίμου που εισέρχεται στο ντεπόζιτο και όχι τις καταναλώσεις καυσίμου του μηχανήματος. Έτσι, θεωρήθηκε ότι το ντεπόζιτο του κάθε μηχανήματος γεμίζει με καύσιμα στο τέλος της ημέρας. Το συμπέρασμα που προέκυψε, είναι ότι ουσιαστικά το γέμισμα της επόμενης ημέρας λειτουργίας ενός μηχανήματος είναι ίσο με την κατανάλωση καυσίμου της προηγούμενης ημέρας. Ύστερα από ανάλυση παλινδρόμησης που πραγματοποιήθηκε, αποδείχθηκε η παραπάνω θεώρηση, καθώς τα δεδομένα κατανάλωσης ανά ώρα και ημέρα λειτουργίας χαρακτηρίζονται από συντελεστή  $R^2 = 0,8984$ , όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2**.



**Σχήμα 2: Ανάλυση παλινδρόμησης**

Υπολογίστηκε έτσι η κατανάλωση καυσίμου ανά ημέρα και σε σχέση με τον χρόνο λειτουργίας με βάση τη βιβλιογραφία, καθώς και τον κατασκευαστή του μηχανήματος, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**.





**Σχήμα 3: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα χρόνου**

Όπου ισχύει ότι:

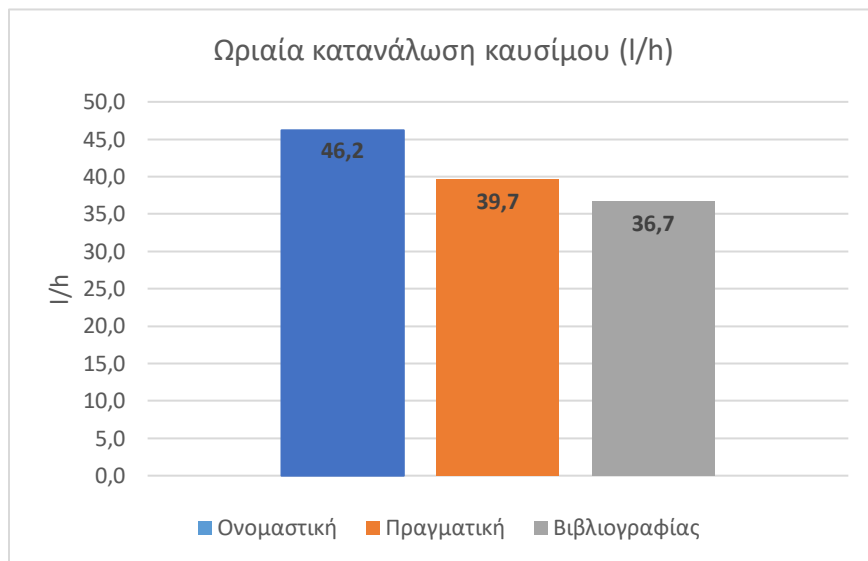
- Πραγματική κατανάλωση: Είναι η πραγματική κατανάλωση του καυσίμου που προκύπτει από τα δεδομένα του εργοταξίου.
- Κατανάλωση βιβλιογραφίας: Είναι η κατανάλωση καυσίμου που προκύπτει από την ανάλυση της βιβλιογραφίας και χαρακτηρίζεται από συντελεστή φόρτισης μικρότερο της μονάδας και υπολογισμένο αριθμητικά κατά μέσο όρο, για έδαφος κυρίως αργιλικό μέχρι και ημιβραχώδες, καθώς και περιβάλλον φυτικών γαιών.
- Κατανάλωση κατασκευαστή (Ονομαστική κατανάλωση): Η κατανάλωση καυσίμου που προκύπτει από τον κατασκευαστή του μηχανήματος και ισχύει για συνθήκες μέγιστης φόρτισης αυτού (δηλαδή συντελεστή φόρτισης = 100%).

Τα σημεία που παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3** δηλώνουν την κατανάλωση σε λίτρα που έχει το μηχάνημα για τις αντίστοιχες ώρες λειτουργίας την αντίστοιχη ημέρα. Δηλαδή, κάθε σημείο αντιστοιχεί σε μία ημέρα, όπου το μηχάνημα δούλεψε τις ώρες που παρουσιάζονται στον οριζόντιο άξονα. Συγκεκριμένα, στην θεωρητική περίπτωση των καταναλώσεων που προκύπτουν από τον κατασκευαστή του μηχανήματος καθώς και τη βιβλιογραφία, παρατηρείται μια γραμμική αύξηση αυτών σε σχέση με τον χρόνο λειτουργίας. Αντίθετα, στην περίπτωση της πραγματικής κατανάλωσης παρουσιάζονται σημεία τα οποία χαρακτηρίζονται με ίδια τιμή του χρόνου λειτουργίας, αλλά διαφορετική τιμή κατανάλωσης ("κάθετα σημεία" πραγματικής κατανάλωσης). Αυτά τα σημεία προκύπτουν καθώς το μηχάνημα σε διαφορετικές ημέρες λειτουργίας δούλεψε τον ίδιο χρόνο, ωστόσο είχε διαφορετική κατανάλωση καυσίμου.

Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες που πραγματοποιήθηκαν οι εργασίες τις συγκεκριμένες ημέρες (π.χ. αργιλικό – ημιβραχώδες περιβάλλον).

Δεδομένου ότι οι ώρες λειτουργίας του μηχανήματος στα δεδομένα που προκύπτουν από το εργοτάξιο, περιλαμβάνουν και 30 λεπτά διαλείμματος του χειριστή, οι υπολογισμοί της κατανάλωσης του κατασκευαστή και της βιβλιογραφίας έχουν γίνει για τον συνολικό χρόνο λειτουργίας του μηχανήματος μείον τον χρόνο διαλείμματος του χειριστή, προκειμένου η σύγκριση να είναι όσο το δυνατόν πιο ακριβής.

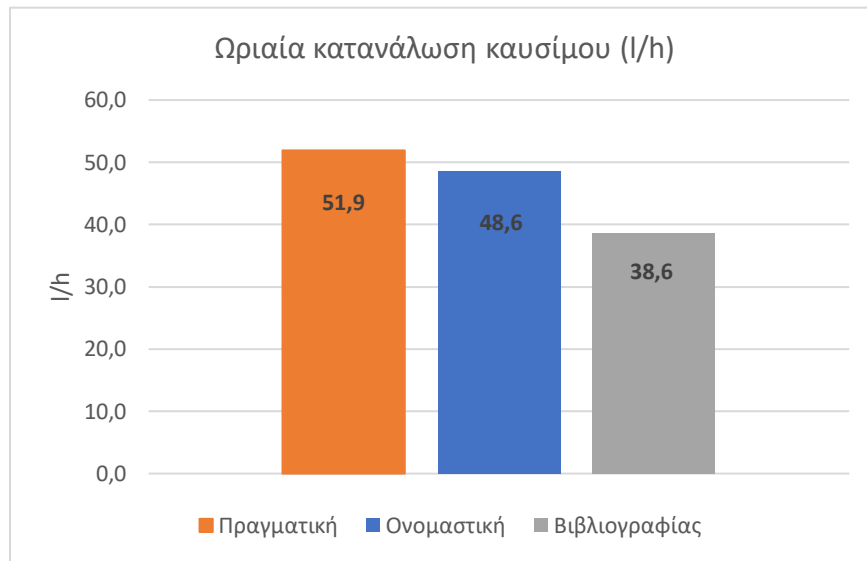
Επιπλέον, υπολογίστηκε και η κατανάλωση καυσίμου ανά ώρα, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 4**:



**Σχήμα 4: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου Μαΐου 2021**

#### 4.2.2 Ιούλιος 2021

Αναφορικά με τα δεδομένα του Ιουλίου 2021, έγινε προσπάθεια εύρεσης της κατανάλωσης καυσίμου ανά ημέρα, όπως και στην περίπτωση του Μαΐου, ωστόσο υπολογίστηκε συντελεστής  $R^2=0,45$  με αποτέλεσμα η ανάλυση να πραγματοποιηθεί σε επίπεδο μηνός, όπου προσδιορίστηκε η ωριαία κατανάλωση καυσίμου, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 5**.



**Σχήμα 5: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου Ιουλίου 2021**

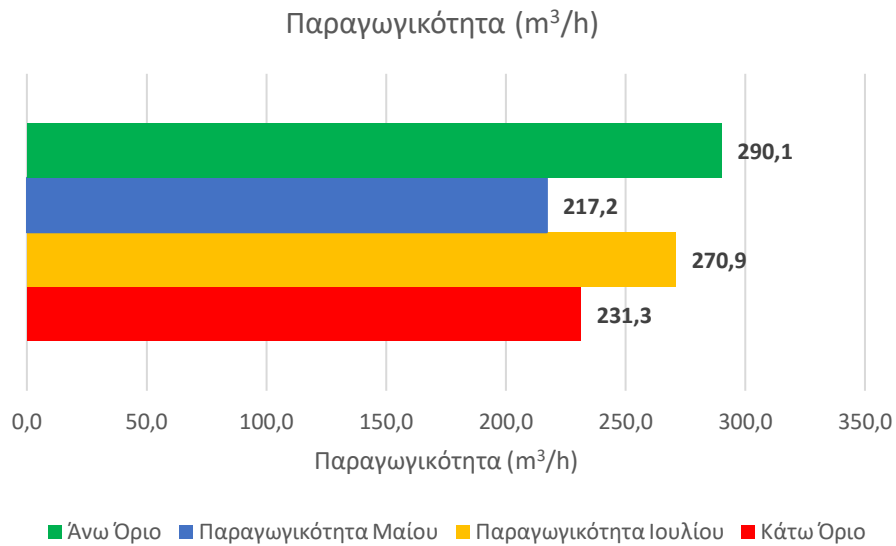
Αξιοσημείωτη παρατήρηση στο **Σχήμα 5** αποτελεί ότι η πραγματική ωριαία κατανάλωση καυσίμου είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική που δίνεται από τον κατασκευαστή του μηχανήματος για συνθήκες μέγιστης φόρτισής του. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στη χαμηλή τιμή του συντελεστή  $R^2$ , που υποδηλώνει πιθανά σφάλματα στις καταγραφές των ωρών λειτουργίας του εκσκαφέα.

#### 4.2.3 Παραγωγικότητα Μαΐου & Ιουλίου 2021 και συσχέτιση κατανάλωσης με παραγόμενο έργο

Με βάση την **Εξίσωση 2** υπολογίστηκαν τα θεωρητικά μέσω βιβλιογραφίας άνω και κάτω όρια της παραγωγικότητας, χρησιμοποιώντας τις παρακάτω ποσότητες:

- Χρόνος κύκλου ( $T_c$ ): 22-28 δευτερόλεπτα
- Ποσοστό χρήσης (Eur): 85%
- Ωφέλιμο φορτίο κουβά (Br): 2,15 m<sup>3</sup>

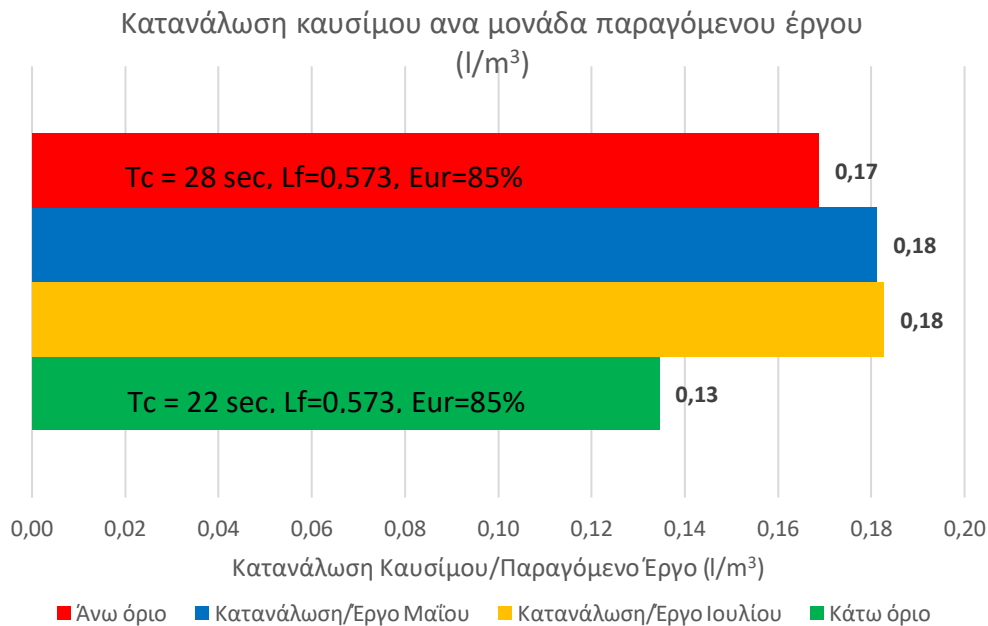
Πρόέκυψε το παρακάτω διάγραμμα (**Σχήμα 6**), το οποίο περιλαμβάνει τα αριθμητικά υπολογισμένα άνω και κάτω όρια της παραγωγικότητας, καθώς και την πραγματική παραγωγικότητα του εκσκαφέα για τους μήνες Μάιο και Ιούλιο 2021.



**Σχήμα 6: Παραγωγικότητα Μαΐου & Ιουλίου 2021**

Τελικά, πραγματοποιήθηκε και η ζητούμενη συσχέτιση της κατανάλωσης του καυσίμου με το παραγόμενο έργο σε μονάδα λίτρων ανά κυβικό μέτρο εκσκαφής (**Σχήμα 7**), με βάση τις παρακάτω ποσότητες:

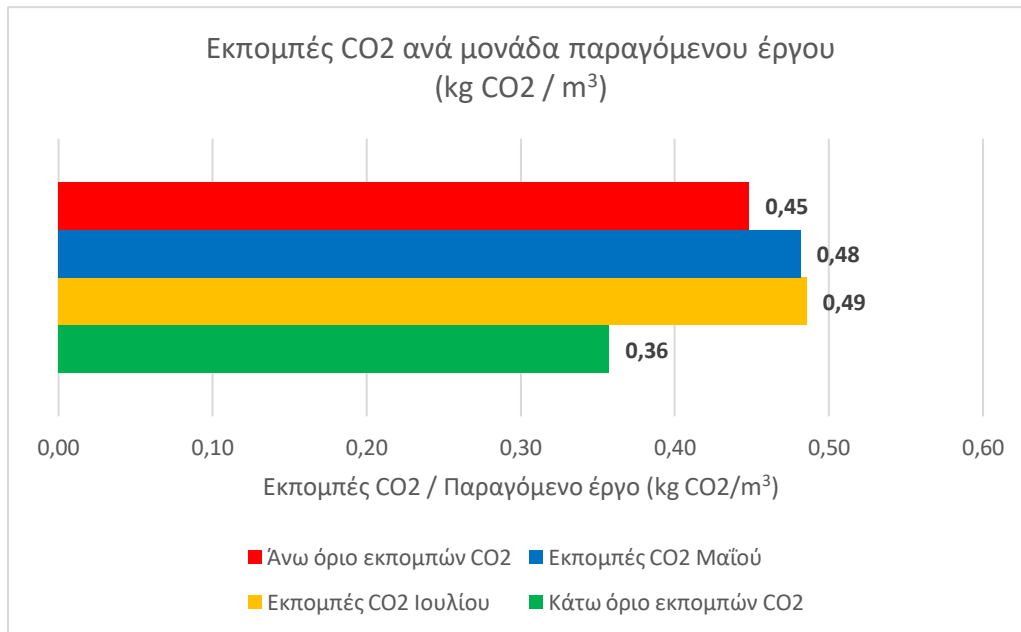
- Χρόνος Κύκλου (Tc): 22 – 28 δευτερόλεπτα
- Ποσοστό Χρήσης (Eur): 85%
- Ωφέλιμο φορτίο κουβά (Bp): 2,15 m<sup>3</sup>
- Συντελεστής Φόρτισης (Lf): 0,573 (υπολογισμένος αριθμητικά με βάση τη μέση πυκνότητα του εδάφους και τον χρόνο χρήσης του μηχανήματος)
- Ειδική κατανάλωση καυσίμου (SFC): 0.217 kg/kWh, από το εγχειρίδιο του κατασκευαστή
- Ιπποδύναμη (Hp): 266 kW
- Ειδικό βάρος καυσίμου ( $\rho_{fuel}$ ): 0,85 kg/l
- Θεωρήθηκαν εργασίες σε έδαφος κυρίως αργιλικό μέχρι ημιβραχώδες, καθώς και εργασίες αφαίρεσης φυτικών γαιών



**Σχήμα 7: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου**

Το άνω και κάτω όριο της κατανάλωσης που φαίνεται στο **Σχήμα 7** είναι τα θεωρητικά υπολογισμένα όρια για τις συνθήκες του εργοταξίου και τις ποσότητες που προαναφέρθηκαν, και όχι για συνθήκες μέγιστης φόρτισης του μηχανήματος. Τα δύο όρια έχουν προκύψει αποκλειστικά από το εύρος του χρόνου κύκλου του μηχανήματος, δεδομένου ότι έχει υπολογιστεί η μέση τιμή του συντελεστή φόρτισης αρχικά για την απαραίτητη αφαίρεση των φυτικών γαιών και ύστερα για την πραγματοποίηση γενικών εκσκαφών σε κυρίως αργιλικό μέχρι και ημιβραχώδες περιβάλλον.

Επιπλέον, υπολογίστηκαν και οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου (**Σχήμα 8**), πολλαπλασιάζοντας τα υπολογισμένα λίτρα ανά κυβικό μέτρο (l/m<sup>3</sup>) με συντελεστή 2,6569 kg CO<sub>2</sub>/l.



**Σχήμα 8: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου**

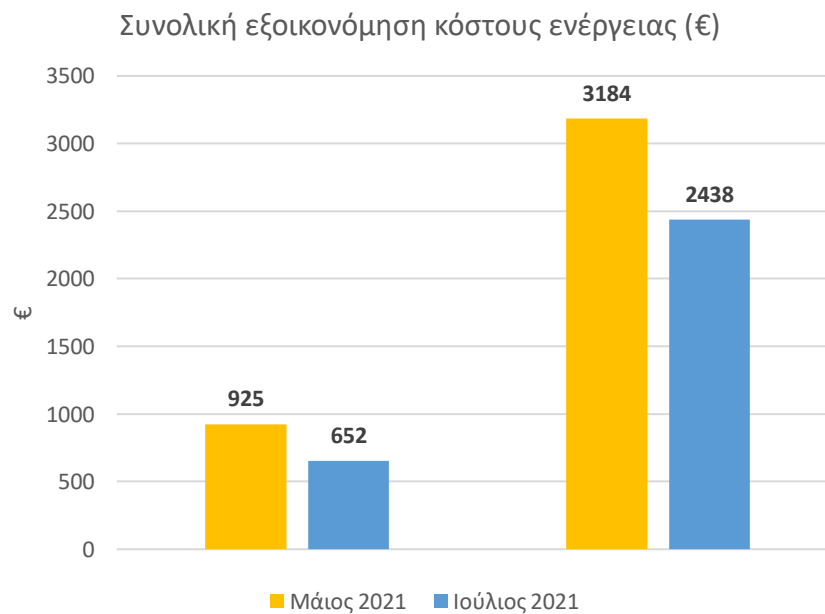
Παρατηρείται ότι η πραγματική ποσότητα της κατανάλωσης και των εκπομπών ανά μονάδα παραγόμενου έργου για τους δύο μήνες υπερβαίνει κατά λίγο τα υπολογισμένα μέσω της βιβλιογραφίας όρια (**Σχήμα 7, Σχήμα 8**).

Έτσι, προσδιορίζοντας την απόκλιση της πραγματικής τιμής από το άνω και κάτω όριο υπολογίστηκε το εύρος εξοικονόμησης κόστους ενέργειας ανά κυβικό μέτρο για την εταιρεία της μελέτης περίπτωσης, το οποίο προέκυψε για τιμή αγοράς του καυσίμου ντίζελ ίση με 1,89 €/l και φαίνεται στο **Σχήμα 9**.



**Σχήμα 9: Εξοικονόμηση κόστους ενέργειας ως προς το παραγόμενο έργο**

Καθώς επίσης και το εύρος συνολικής εξοικονόμησης κόστους, για το συνολικό παραγόμενο έργο τους μήνες Μάιο και Ιούλιο (**Σχήμα 10**).



**Σχήμα 10: Συνολική εξοικονόμηση κόστους ενέργειας**

Σημαντικό είναι να αναφερθεί, ότι τα παραπάνω όρια τιμών προκύπτουν από το εύρος της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου και συνεπώς από το εύρος του χρόνου κύκλου του μηχανήματος. Ο χρόνος κύκλου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία (Jassim, Lu and Olofsson, 2018b), επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό την κατανάλωση, συνεπώς η όσο το δυνατόν κατά μέσο όρο ελαχιστοποίηση του μπορεί να αποφέρει εξοικονόμηση χρημάτων στις εταιρείες. Σε περίπτωση που η εταιρεία καταφέρει να μειώσει την κατανάλωση ανά μονάδα παραγόμενου έργου στο κατώτατο όριο της βιβλιογραφίας, μπορεί να έχει μέγιστη εξοικονόμηση ίση με 3184€ και 2438€ τους μήνες Μάιο και Ιούλιο αντίστοιχα (**Σχήμα 10**). Ενώ σε περίπτωση που καταφέρει να μειώσει την κατανάλωση στο ανώτατο όριο, τότε θα μπορεί να έχει εξοικονόμηση ίση με 925€ και 652€ για τις εργασίες που πραγματοποιήθηκαν τους αντίστοιχους μήνες (**Σχήμα 10**).

### 4.3 Εργοτάξιο Β

Λόγω έλλειψης δεδομένων για το συγκεκριμένο εργοτάξιο, τα οποία αφορούν τις μεταβλητές θεωρητικού υπολογισμού της κατανάλωσης ανά μονάδα παραγόμενου έργου, τα θεωρητικά όρια υπολογίστηκαν για ένα εύρος τιμών του συντελεστή φόρτισης, για τις μέσες (medium) συνθήκες που δίνει ο κατασκευαστής του εκάστοτε μηχανήματος και με ντετερμινιστική τιμή της παραγωγικότητας (χωρίς δηλαδή εύρος τιμών χρόνου κύκλου). Η τιμή της παραγωγικότητας προσδιορίστηκε αφού μορφοποιήθηκε η **Εξίσωση 2** στην **Εξίσωση 6**, όπου απαιτούμενες μεταβλητές εισόδου είναι το συνολικό παραγόμενο έργο σε m<sup>3</sup> και ο συνολικός χρόνος λειτουργίας σε ώρες. Στα μηχανήματα για τα οποία ήταν εφικτό, έγινε ξεχωριστή σύγκριση της θεωρητικά υπολογισμένης παραγωγικότητας με την πραγματική.

#### Εξίσωση 6: Παραγωγικότητα εργοταξίου Β

$$Epr = \left( \frac{Bp \times Eur}{Tc} \right) = \left( \frac{Bp \times Eur \times N}{Tc \times N} \right) = \left( \frac{Bp \times Eur \times N}{Tt \times Eur} \right) = \left( \frac{Bp \times N}{Tt} \right) = \frac{W}{Tt}$$

Όπου:

- N: Συνολικός αριθμός κύκλων
- Tt: Συνολικός χρόνος λειτουργίας
- W: Συνολικό παραγόμενο έργο

Όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για τους μήνες Νοέμβριο 2021 μέχρι Φεβρουάριο του 2022. Στα παρακάτω διαγράμματα ο μήνας 1 αντιστοιχεί στον μήνα Νοέμβριο κ.ο.κ., ενώ τα πραγματικά μεγέθη αποτυπώνονται στα διαγράμματα ως Actual.



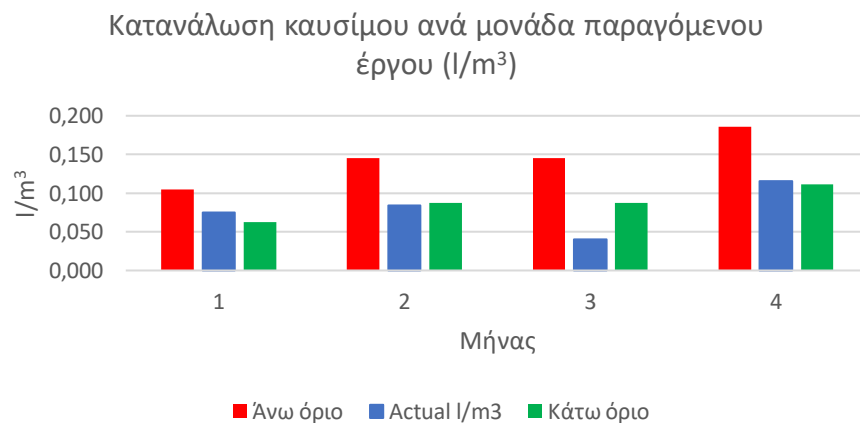
### 4.3.1 Ισοπεδωτής Γαίων Ι1

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μηχανήματος προσδιορίστηκαν από το εγχειρίδιο της Caterpillar (Caterpillar, 2016) και φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4).

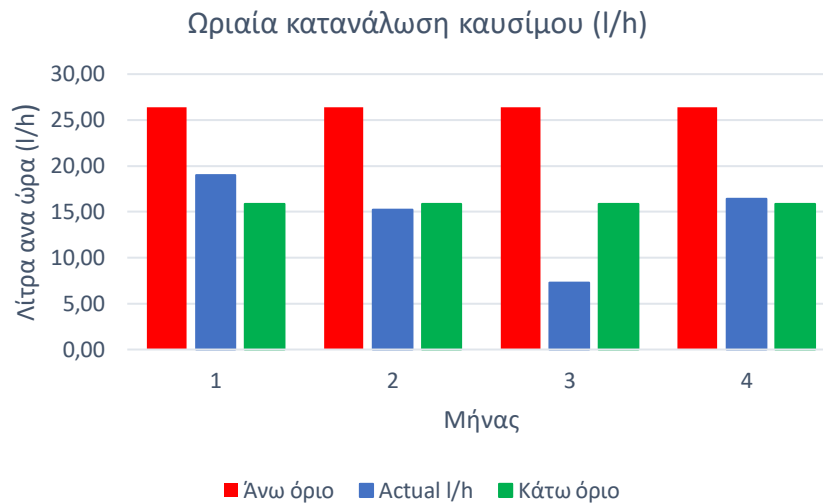
**Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά Ισοπεδωτή Γαίων Ι1**

Κατασκευαστής	Caterpillar
Μοντέλο	14M
Συντελεστής φόρτισης κατασκευαστή	Μέση φόρτιση: 30%-50%
Συνθήκες μέσης φόρτισης	Μέση συντήρηση δρόμων, διάνοιξη τάφρων, διάστρωση χαλαρών επιχωμάτων, διαμόρφωση εδάφους κ.λπ.
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kg/kWh)	0,22
Ιπποδύναμη (kW)	204
Ειδικό βάρος καυσίμου (kg/l)	0,85

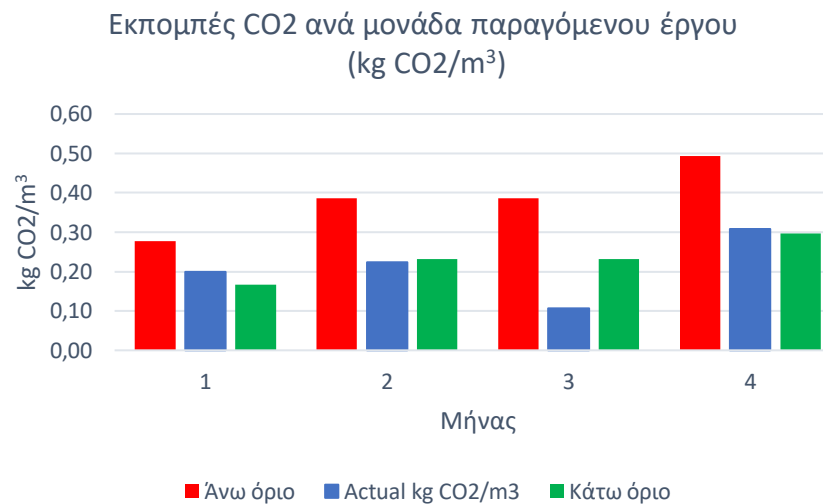
Για το εν λόγω μηχάνημα, προσδιορίστηκαν τα μεγέθη της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου, καθώς και η ωριαία κατανάλωση καυσίμου όπου υπολογίστηκαν τα άνω και κάτω όρια μέσω βιβλιογραφίας, και κατόπιν έγινε σύγκριση αυτών με τις πραγματικές τιμές των μεγεθών. Τα αποτελέσματα φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα (Σχήμα 11, Σχήμα 12, Σχήμα 13).



**Σχήμα 11: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Ι1**



**Σχήμα 12: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος I1**



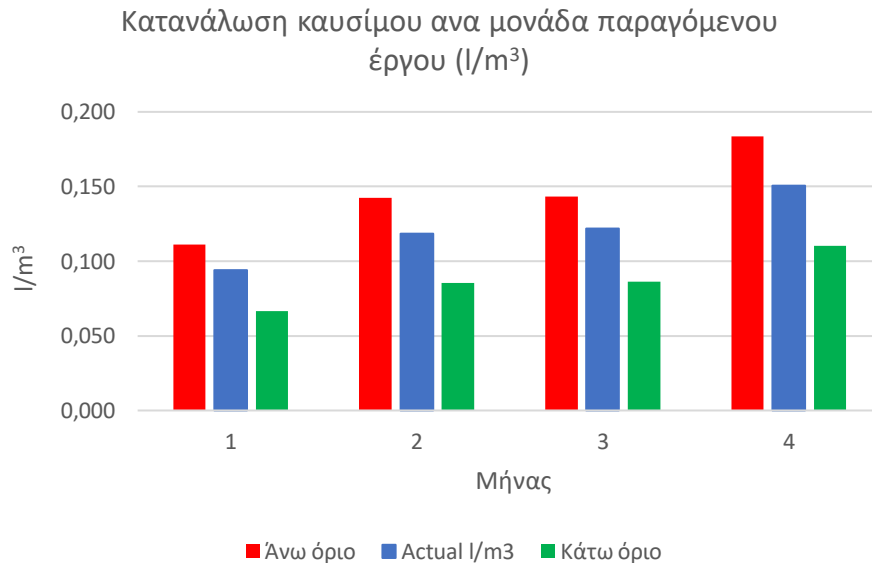
**Σχήμα 13: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος I1**

Τα μεγέθη της πραγματικής κατανάλωσης παρουσιάζονται εντός των υπολογισμένων ορίων για τρεις από τους τέσσερις μήνες λειτουργίας, ωστόσο αξιοσημείωτη παρατήρηση είναι η μειωμένη κατανάλωση του μηχανήματος τον 3<sup>ο</sup> μήνα της λειτουργίας του, συγκριτικά τόσο με τα υπολογισμένα όρια όσο και με τους υπόλοιπους μήνες.

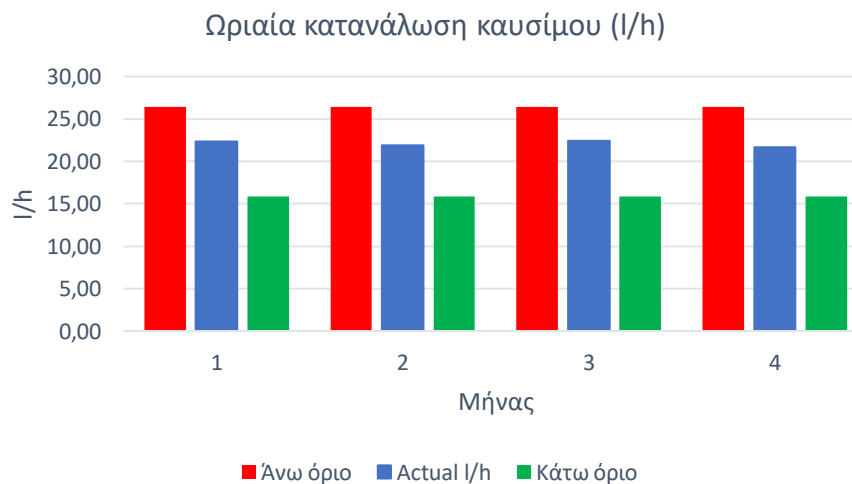
### 4.3.2 Ισοπεδωτής Γαιών I2

Το συγκεκριμένο μηχάνημα είναι ίδιου μοντέλου με αυτό του ισοπεδωτή γαιών I1, συνεπώς διακρίνεται από τα ίδια χαρακτηριστικά τα οποία φαίνονται αναλυτικά στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 4).

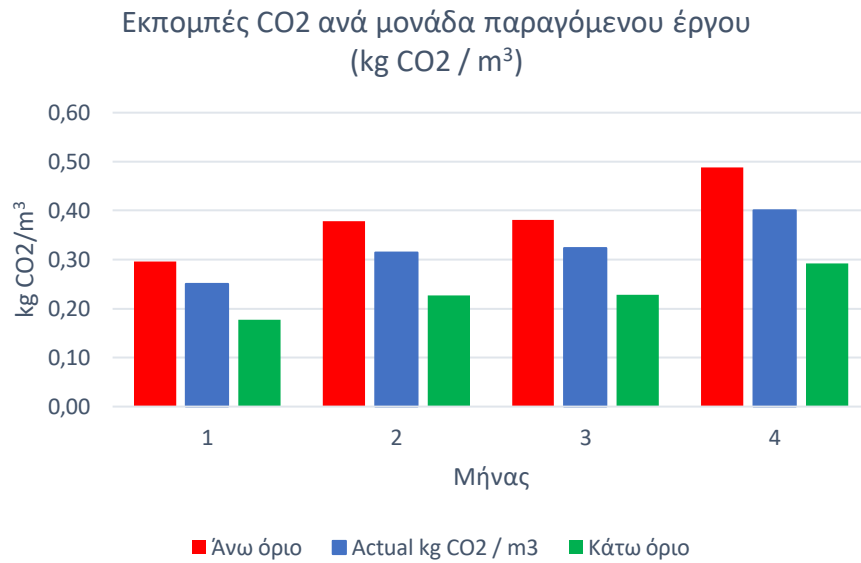
Τα μεγέθη που υπολογίστηκαν είναι όμοια με αυτά του ισοπεδωτή τυπολογίας I1, και φαίνονται αναλυτικά στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 14, Σχήμα 15, Σχήμα 16).



**Σχήμα 14: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος I2**



**Σχήμα 15: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος I2**

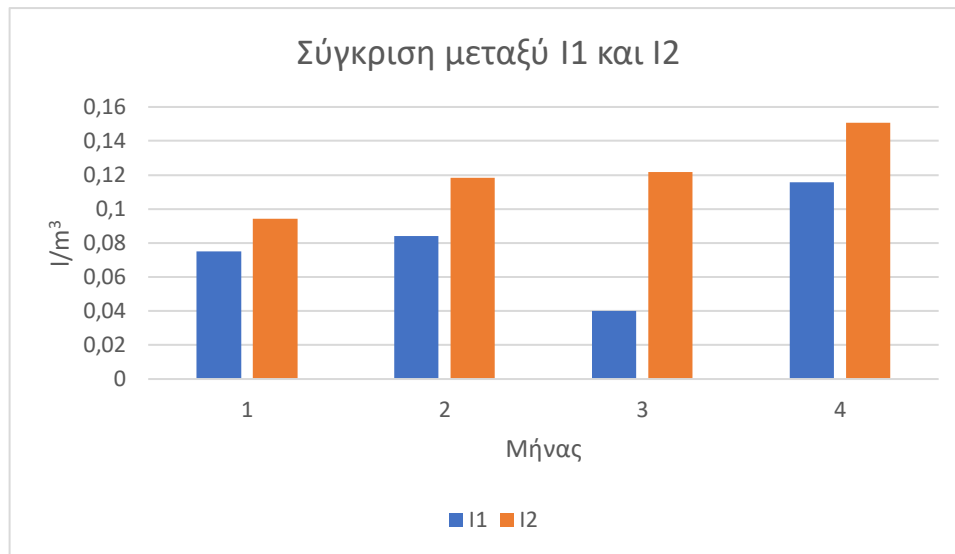


**Σχήμα 16: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος I2**

Από τα παραπάνω διαγράμματα παρατηρήθηκε ότι τα πραγματικά μεγέθη της κατανάλωσης βρίσκονται εντός των θεωρητικά υπολογισμένων ορίων για μέσες συνθήκες φόρτισης, κατά τη διάρκεια και των τεσσάρων μηνών λειτουργίας του μηχανήματος.

#### 4.3.3 Σύγκριση μεταξύ Ισοπεδωτών Γαιών I1 και I2

Δεδομένου ότι τα μηχανήματα είναι του ίδιου μοντέλου και εργάζονταν σύμφωνα με τα δεδομένα της μελέτης περίπτωσης κατά τους ίδιους μήνες σε παρόμοιες εργασίες, κρίθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθεί σύγκριση του μεγέθους της κατανάλωσης ανά μονάδα παραγόμενου έργου των δύο (**Σχήμα 17**).



**Σχήμα 17: Σύγκριση μεταξύ Ισοπεδωτή Γαιών I1 και I2**

Σημαντική παρατήρηση αποτελεί η μειωμένη κατανάλωση ανά μονάδα παραγόμενου έργου του μηχανήματος I1 σε σχέση με το I2 κατά τη διάρκεια και των τεσσάρων μηνών λειτουργίας, με την πιο σημαντική διαφορά να παρουσιάζεται στον 3<sup>ο</sup> μήνα.

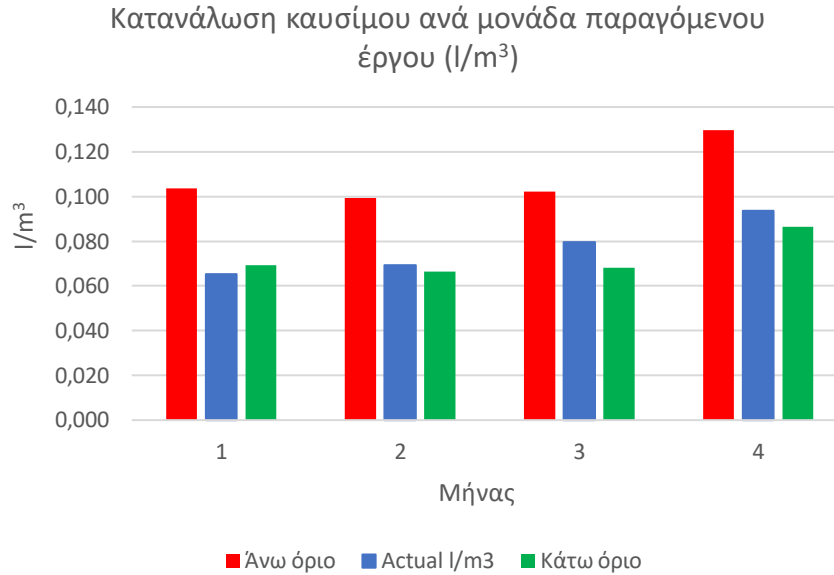
#### 4.3.4 Προωθητήρας Γαιών Π1

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μηχανήματος προσδιορίστηκαν από το εγχειρίδιο της Komatsu (Komatsu,2009) και φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 5**).

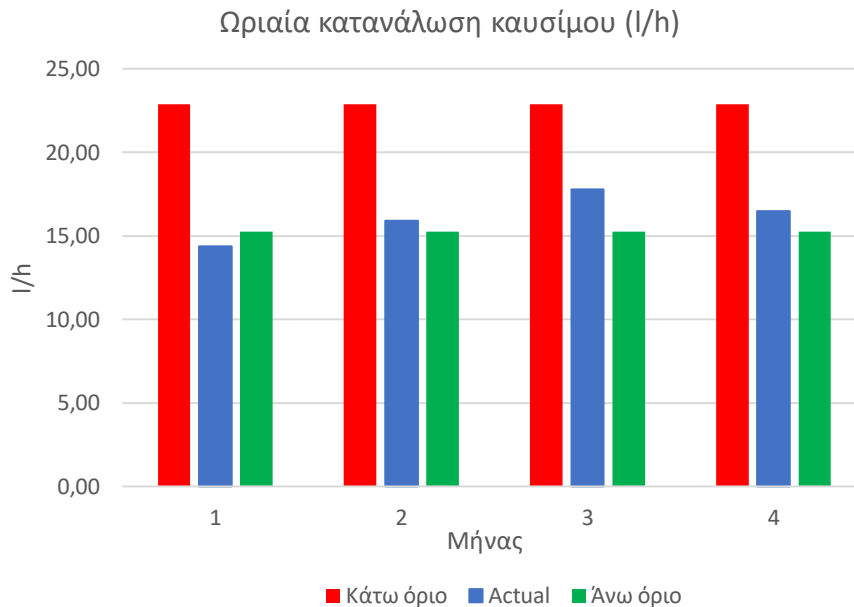
**Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά Προωθητήρα Γαιών Π1**

Κατασκευαστής	Komatsu
Μοντέλο	D65EX-15
Συντελεστής φόρτισης κατασκευαστή	Μέση: 38% - 57%
Συνθήκες μέσης φόρτισης	Μέση μετακίνηση γαιών, μεταφορά με ξύστρα (scraper), εύκολη ώθηση, μεσαίες συνθήκες πρόσκρουσης
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kg/kWh)	0,22
Ιπποδύναμη (kW)	155
Ειδικό βάρος καυσίμου (kg/l)	0,85

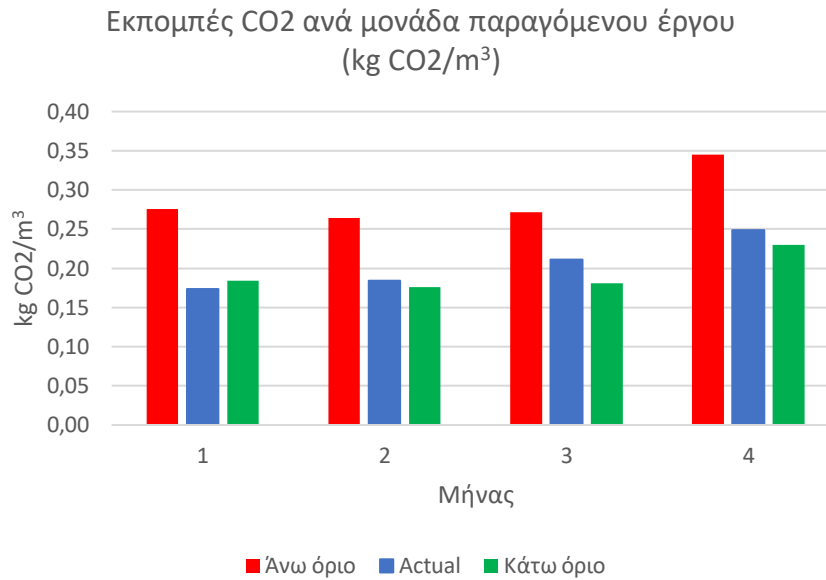
Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα για τα μεγέθη της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου, καθώς και της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου του προωθητήρα γαιών τυπολογίας Π1 (Σχήμα 18, Σχήμα 19, Σχήμα 20).



**Σχήμα 18: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Π1**



**Σχήμα 19: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος Π1**



**Σχήμα 20: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Π1**

Στα παραπάνω διαγράμματα παρατηρείται ότι η κατανάλωση βρίσκεται εντός των θεωρητικά υπολογισμένων ορίων, με εξαίρεση τον πρώτο μήνα λειτουργίας του μηχανήματος όπου εντοπίζεται κατανάλωση μικρότερη από το κατώτατο όριο της βιβλιογραφίας.

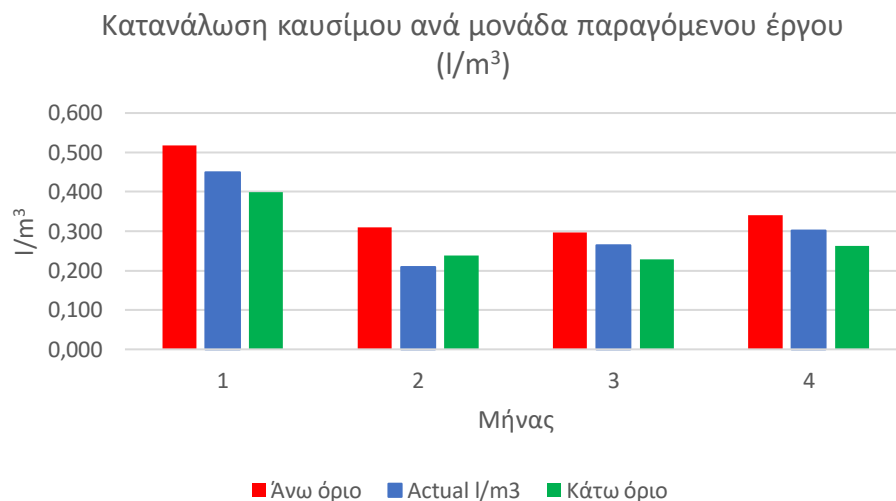
#### 4.3.5 Προωθητήρας Γαιών Π2

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μηχανήματος προσδιορίστηκαν από το εγχειρίδιο της Caterpillar (Caterpillar, 2007) και φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 6).

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά Προωθητήρα Γαιών Π2

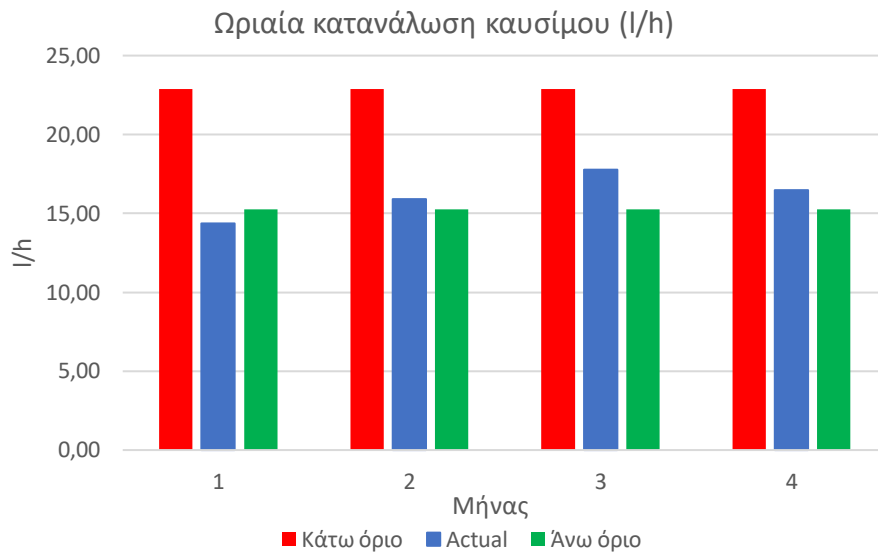
Κατασκευαστής	Caterpillar
Μοντέλο	D9T
Συντελεστής φόρτισης κατασκευαστή	Μέση: 50% - 65%
Συνθήκες μέσης φόρτισης	Παραγωγή μπουλντόζας σε αργίλους, άμμο, χαλίκια. Διάνοιξη δανειοθαλάμων, μεσαίες συνθήκες πρόσκρουσης
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kg/kWh)	0,22
Ιπποδύναμη (kW)	346
Ειδικό βάρος καυσίμου (kg/l)	0,85

Στη συνέχεια, ακολουθούν τα διαγράμματα για τα μεγέθη της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου, καθώς και της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου του προωθητήρα γαιών τυπολογίας Π2 (Σχήμα 21, Σχήμα 22, Σχήμα 23).

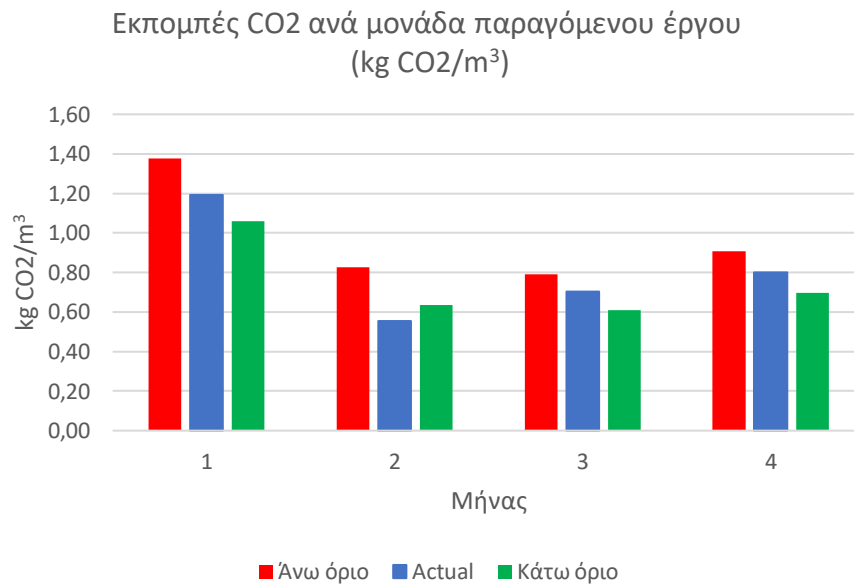


Σχήμα 21: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Π2





**Σχήμα 22: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος Π2**



**Σχήμα 23: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Π2**

Από τα παραπάνω διαγράμματα των καταναλώσεων παρατηρείται ότι η πραγματική κατανάλωση βρίσκεται εντός των θεωρητικά υπολογισμένων ορίων, με εξαίρεση τον δεύτερο μήνα λειτουργίας του μηχανήματος όπου διαφαίνεται κατανάλωση μικρότερη από το κατώτατο όριο της βιβλιογραφίας.

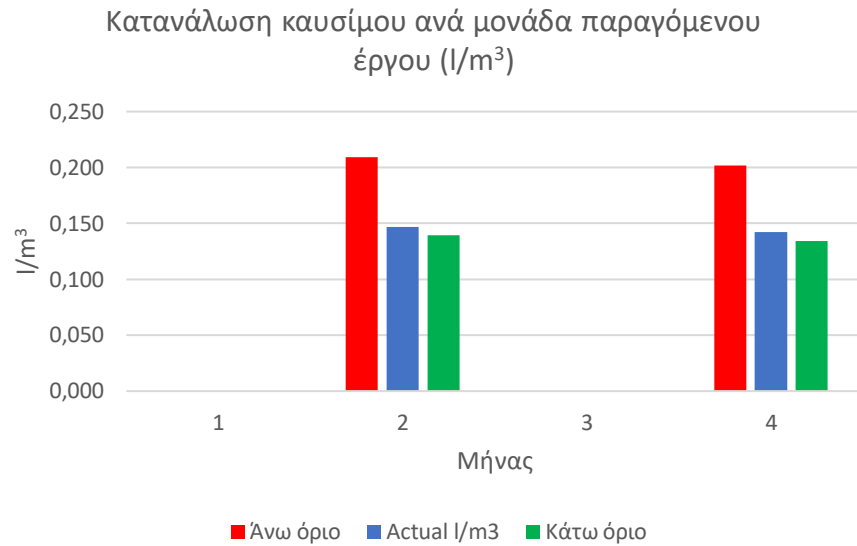
#### 4.3.6 Εκσκαφέας Ερπυστριοφόρος Ε1

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μηχανήματος προσδιορίστηκαν από το εγχειρίδιο της Hyundai το οποίο ελήφθη από την επίσημη αντιπροσωπία της εταιρείας στην Ελλάδα, και φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 7).

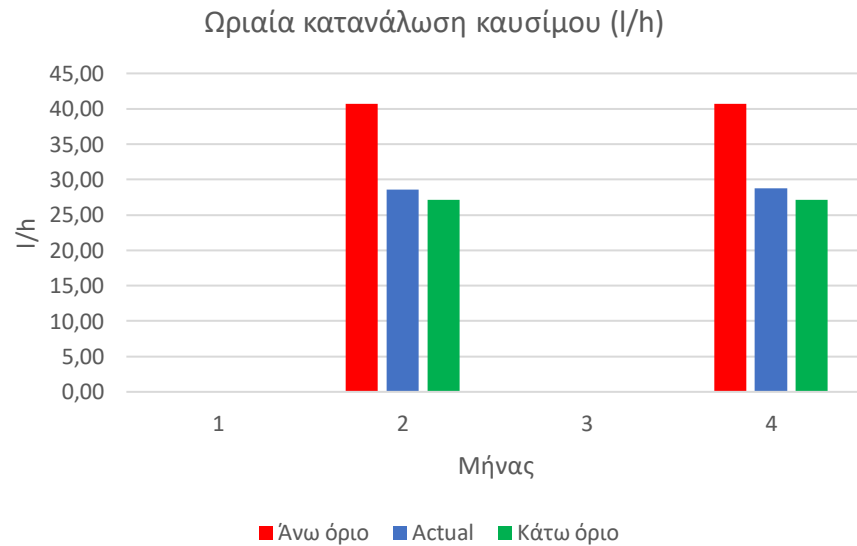
**Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά Ερπυστριοφόρου Εκσκαφέα Ε1**

Κατασκευαστής	Hyundai
Μοντέλο	R500LC – 7A
Συντελεστής φόρτισης κατασκευαστή	Μέση: 40% - 60%
Συνθήκες μέσης φόρτισης	Αργλικό έδαφος και υλικό μέσης πυκνότητας, σκάψιμο 60-85% του ημερήσιου προγράμματος εργασίας
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kg/kWh)	0,217
Ιπποδύναμη (kW)	266
Χωρητικότητα κουβά (m <sup>3</sup> )	2,15
Ειδικό βάρος καυσίμου (kg/l)	0,85

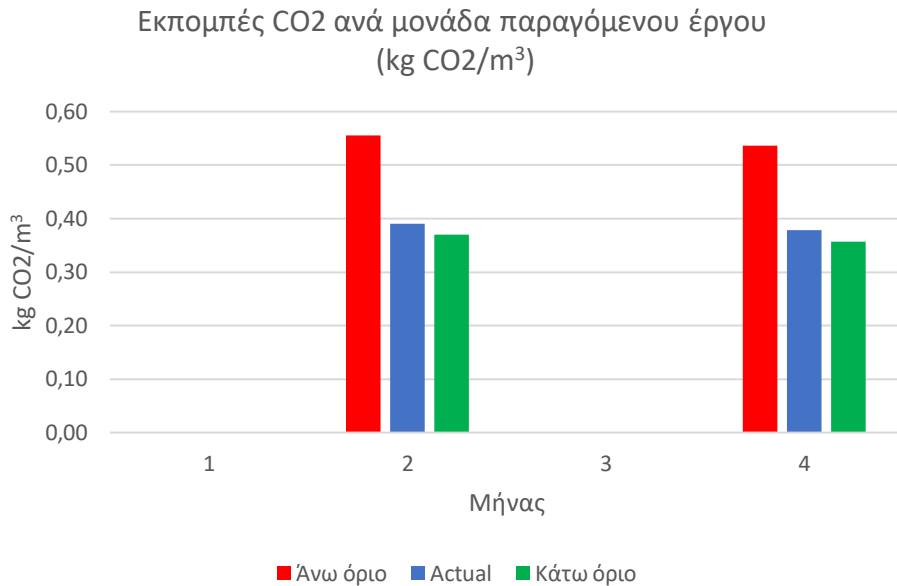
Στη συνέχεια ακολουθούν τα διαγράμματα για τα μεγέθη της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου, της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου, καθώς και της παραγωγικότητας του ερπυστριοφόρου εκσκαφέα τυπολογίας Ε1 (**Σχήμα 24, Σχήμα 25, Σχήμα 26, Σχήμα 27**). Δεδομένου ότι ο συγκεκριμένος εκσκαφέας αποτελεί το ίδιο μοντέλο με αυτόν του εργοταξίου Α, πραγματοποιήθηκε η παραδοχή ότι ο χρόνος κύκλου βρίσκεται στο εύρος μεταξύ 22 και 28 δευτερολέπτων. Έτσι, υπολογίστηκαν τα αντίστοιχα όρια της παραγωγικότητας τα οποία ταυτίζονται με αυτά του εργοταξίου Α.



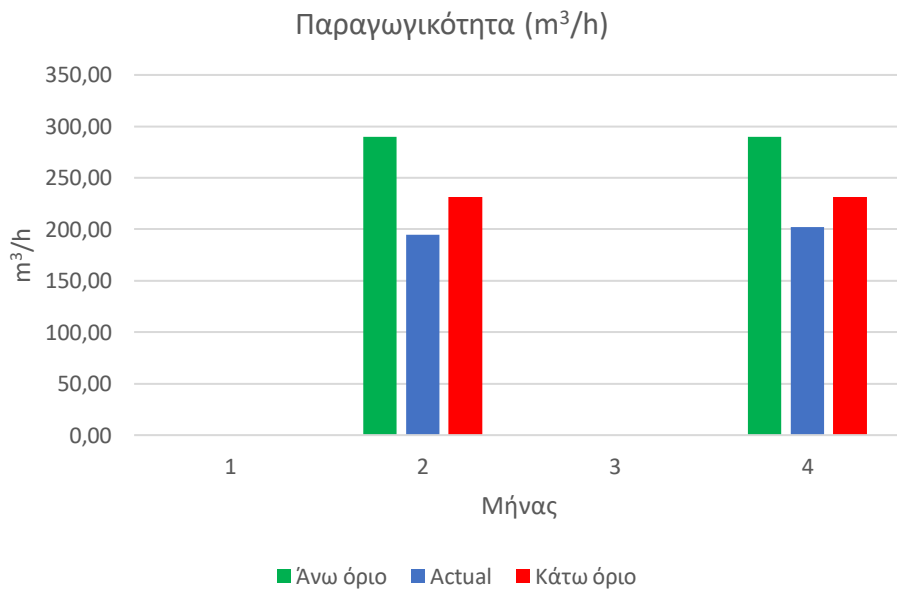
**Σχήμα 24: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E1**



**Σχήμα 25: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος E1**



**Σχήμα 26: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E1**



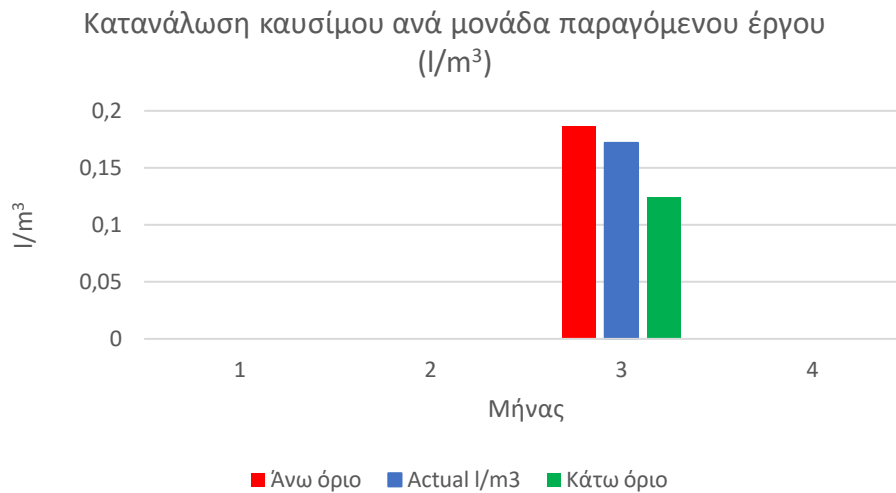
**Σχήμα 27: Παραγωγικότητα μηχανήματος E1**

Παρατηρείται ότι τα μεγέθη της κατανάλωσης του εκσκαφέα βρίσκονται εντός των υπολογισμένων ορίων, ωστόσο το μέγεθος της παραγωγικότητας παρουσιάζεται μειωμένο σε σχέση με το κατώτατο όριο της βιβλιογραφίας.

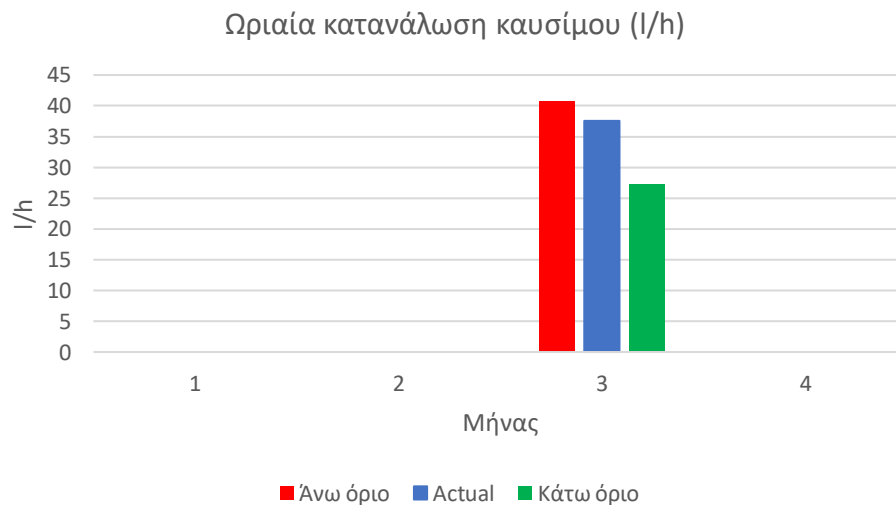
### 4.3.7 Εκσκαφέας Ερπυστριοφόρος Ε2

Ο συγκεκριμένος εκσκαφέας είναι ίδιου μοντέλου με τον εκσκαφέα τυπολογίας Ε1, συνεπώς διακρίνονται από τα ίδια χαρακτηριστικά τα οποία φαίνονται στον αντίστοιχο πίνακα (Πίνακας 7).

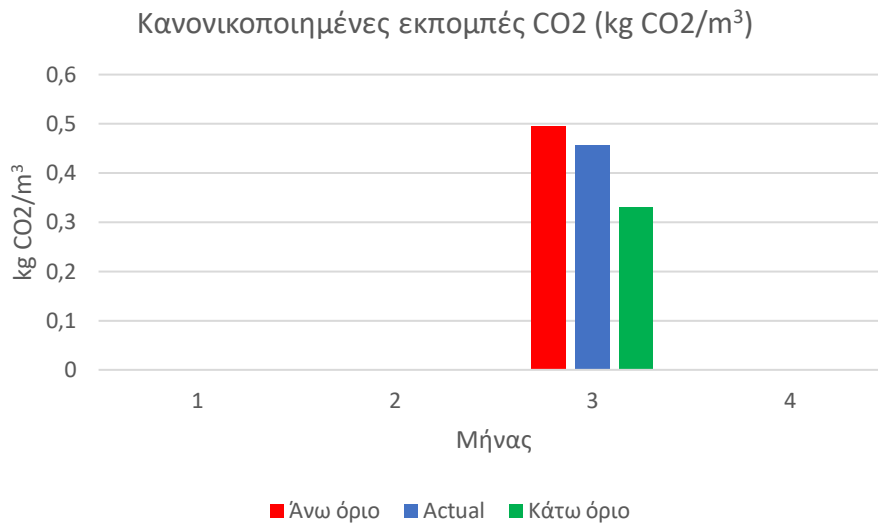
Τα μεγέθη που υπολογίστηκαν είναι όμοια με αυτά του εκσκαφέα τυπολογίας Ε1, και φαίνονται αναλυτικά στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 28, Σχήμα 29, Σχήμα 30, Σχήμα 31).



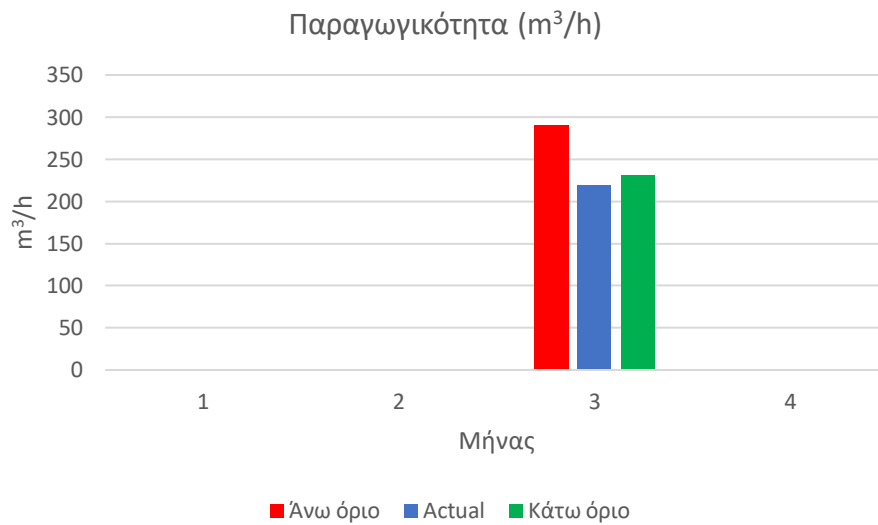
**Σχήμα 28: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Ε2**



**Σχήμα 29: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος Ε2**



**Σχήμα 30: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E2**



**Σχήμα 31: Παραγωγικότητα μηχανήματος E2**

Ομοίως με την περίπτωση του εκσκαφέα E1, τα μεγέθη της κατανάλωσης παρατηρούνται εντός των θεωρητικά υπολογισμένων ορίων, ωστόσο η παραγωγικότητα του μηχανήματος είναι κατά μικρό ποσοστό μειωμένη από το κατώτατο όριο της βιβλιογραφίας.

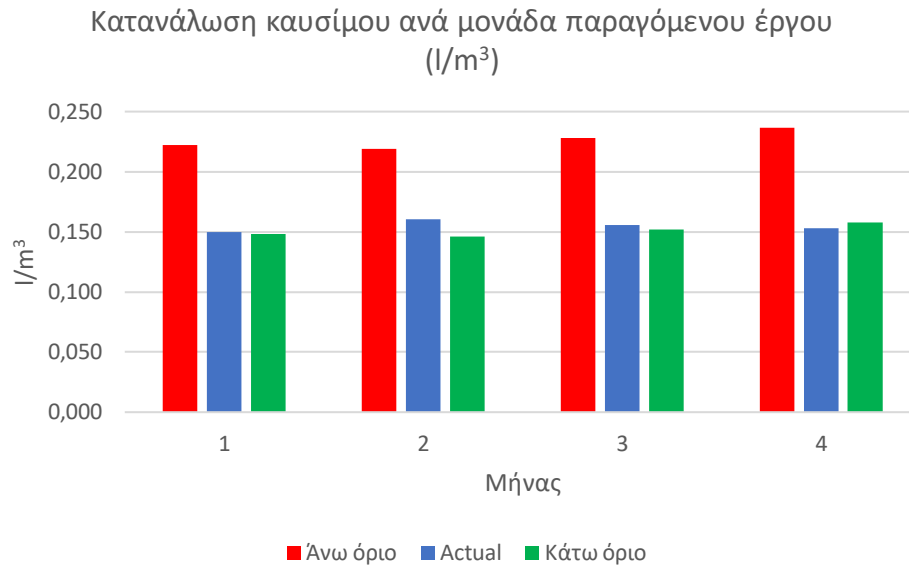
### 4.3.8 Εκσκαφέας Ελαστικοφόρος E3

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μηχανήματος προσδιορίστηκαν από το εγχειρίδιο της Hyundai το οποίο ελήφθη από την επίσημη αντιπροσωπία της εταιρείας στην Ελλάδα, και φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 8).

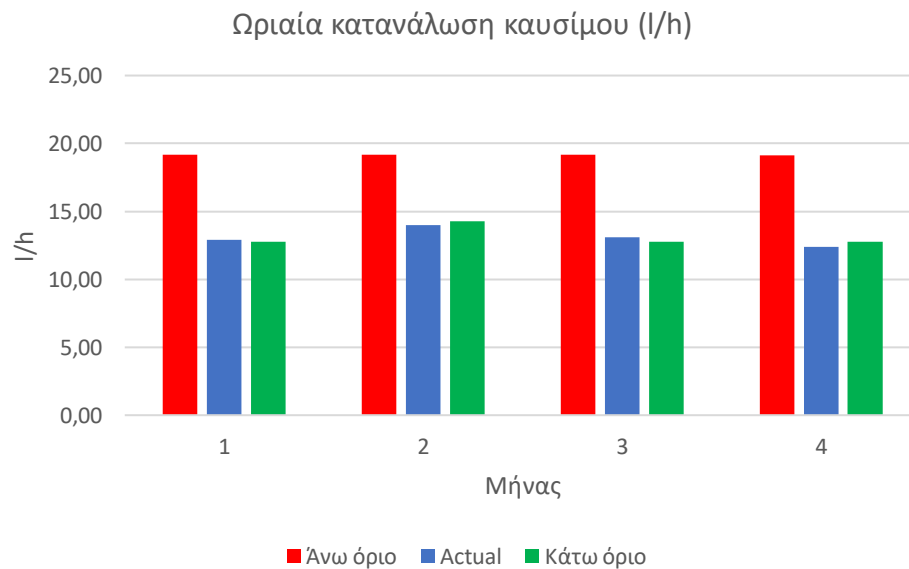
**Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά Ελαστικοφόρου Εκσκαφέα E3**

Κατασκευαστής	Hyundai
Μοντέλο	R200W – 7A
Συντελεστής φόρτισης κατασκευαστή	Μέση: 40% - 60%
Συνθήκες μέσης φόρτισης	Αργλικό έδαφος και υλικό μέσης πυκνότητας, σκάψιμο 60-85% του ημερήσιου προγράμματος εργασίας
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kg/kWh)	0,222
Ιπποδύναμη (kW)	122
Χωρητικότητα κουβά (m <sup>3</sup> )	0,80
Ειδικό βάρος καυσίμου (kg/l)	0,85

Ακολουθούν τα διαγράμματα για τα μεγέθη της κατανάλωσης και εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου, της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου, καθώς και της παραγωγικότητας του ερπυστριοφόρου εκσκαφέα τυπολογίας E3 (Σχήμα 32, Σχήμα 33, Σχήμα 34, Σχήμα 35). Τα όρια της παραγωγικότητας υπολογίστηκαν για το ίδιο εύρος χρόνου κύκλου και ποσοστού χρήσης με τα προαναφερόμενα μηχανήματα, με διαφορετικό ωστόσο ωφέλιμο φορτίο κουβά, καθώς το συγκεκριμένο μοντέλο εκσκαφέα διακρίνεται από διαφορετική χωρητικότητα κουβά σε σχέση με τα μοντέλα τυπολογίας E1 και E2.

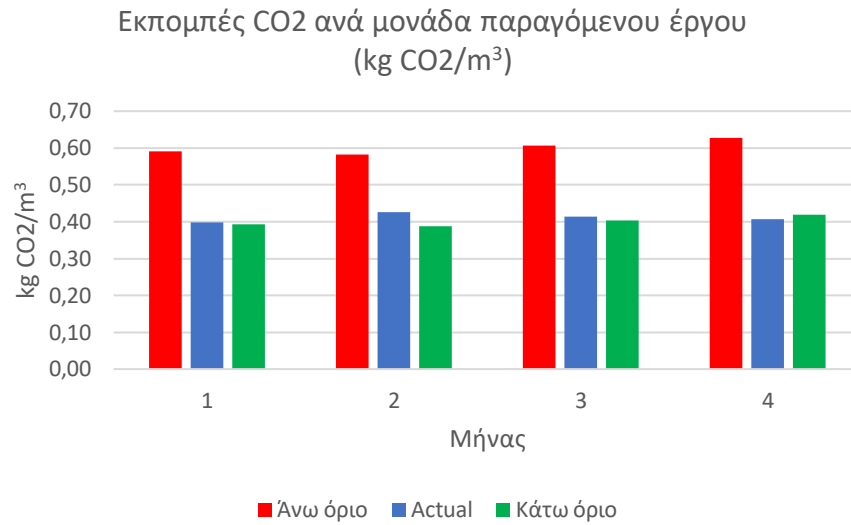


**Σχήμα 32: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E3**

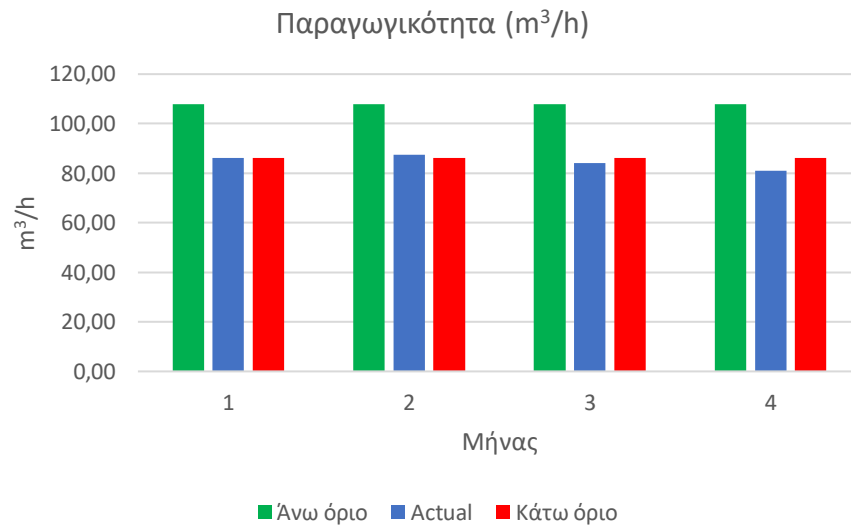


**Σχήμα 33: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος E3**





**Σχήμα 34: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Ε3**



**Σχήμα 35: Παραγωγικότητας μηχανήματος Ε3**

Στην περίπτωση του εκσκαφέα Ε3 παρατηρείται πραγματική κατανάλωση που έχει πολύ μικρή απόκλιση από το κατώτατο όριο της βιβλιογραφίας, ενώ το ίδιο ισχύει και για την παραγωγικότητα του μηχανήματος.

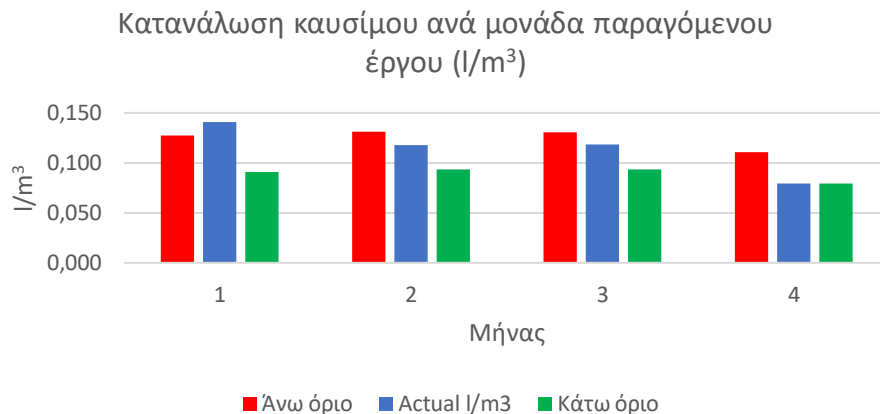
#### 4.3.9 Φορτωτής Ελαστικοφόρος Φ1

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου μηχανήματος προσδιορίστηκαν από το εγχειρίδιο της Hyundai το οποίο ε από την επίσημη αντιπροσωπία της εταιρείας στην Ελλάδα, και φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9).

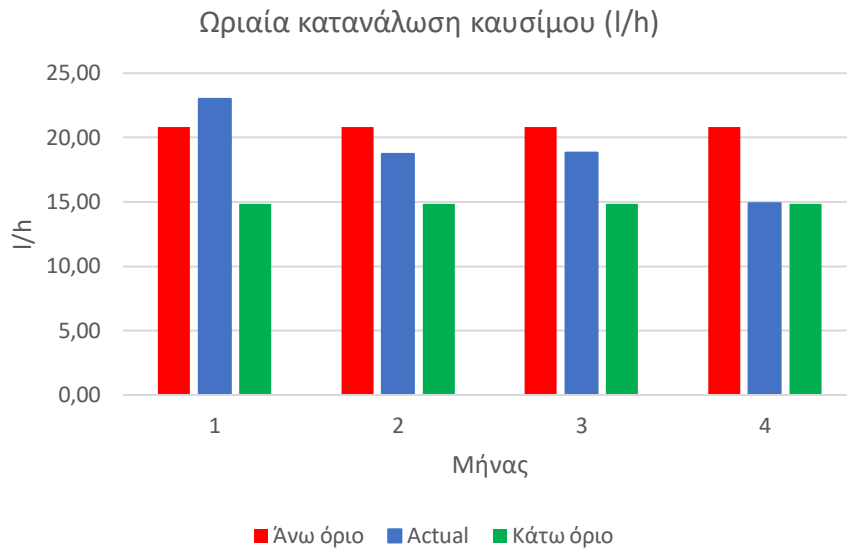
**Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά Ελαστικοφόρου Φορτωτή Φ1**

Κατασκευαστής	Hyundai
Μοντέλο	HL 770 – 7A
Συντελεστής φόρτισης κατασκευαστή	Μέση: 25% - 35%
Συνθήκες μέσης φόρτισης	Σταθερός ρυθμός φόρτωσης, λείες επιφάνειες, μικρές αποστάσεις κίνησης και ελάχιστη κλίση, υλικό χαμηλής έως μεσαίας πυκνότητας σε κουβά κατάλληλου μεγέθους
Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kg/kWh)	0,242
Ιπποδύναμη (kW)	209
Χωρητικότητα κουβά (m <sup>3</sup> )	4
Ειδικό βάρος καυσίμου (kg/l)	0,85

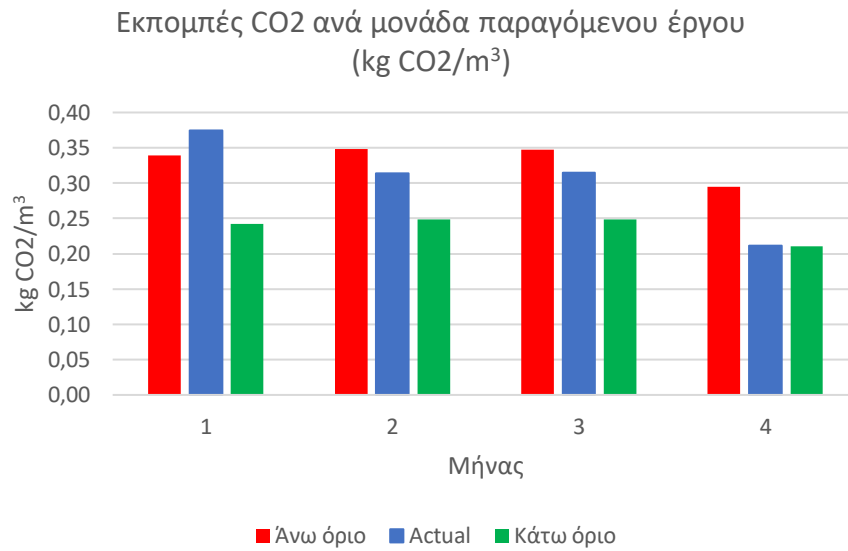
Ακολουθούν τα διαγράμματα των μεγεθών υπολογισμού ομοίως με τις προηγούμενες κατηγορίες μηχανολογικού εξοπλισμού (Σχήμα 36, Σχήμα 37, Σχήμα 38, Σχήμα 39).



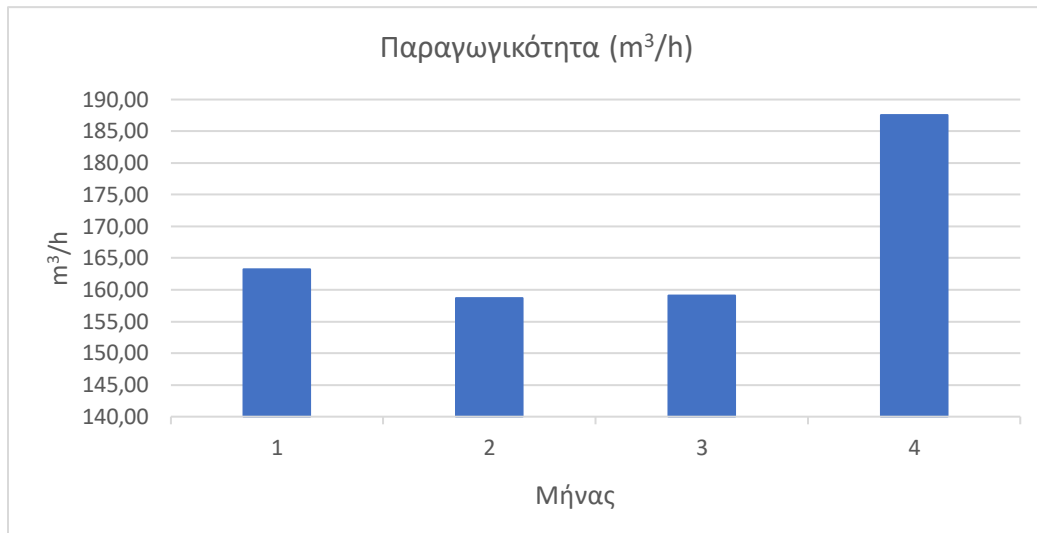
**Σχήμα 36: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Φ1**



**Σχήμα 37: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος Φ1**



**Σχήμα 38: Εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Φ1**

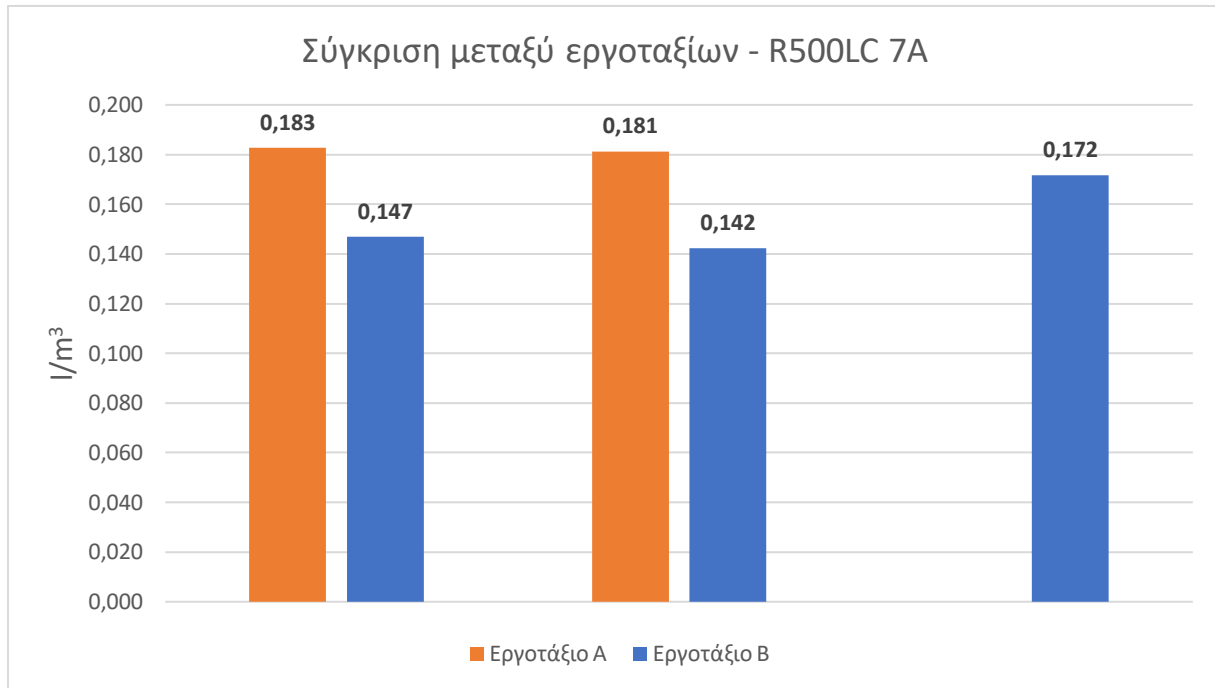


**Σχήμα 39: Παραγωγικότητα μηχανήματος Φ1**

Η κατανάλωση καυσίμου του φορτωτή Φ1 παρουσιάζεται αυξημένη κατά τον πρώτο μήνα λειτουργίας σε σχέση με τα υπολογισμένα όρια, σε αντίθεση με τους υπόλοιπους τρεις μήνες όπου βρίσκεται εντός των ορίων (**Σχήμα 36, Σχήμα 37**). Επιπλέον, αξιοσημείωτη παρατήρηση στο **Σχήμα 39** αποτελεί η αυξημένη τιμή της παραγωγικότητας στον μήνα Φεβρουάριο, συγκριτικά με τους προηγούμενους τρεις, κατά τους οποίους παρατηρούνται μικρές μεταβολές στην τιμή. Επίσης, πραγματοποιήθηκε θεωρητικός υπολογισμός της παραγωγικότητας, για χρόνο κύκλου ίσο με 20-30 δευτερόλεπτα (ο κατασκευαστής του μηχανήματος ορίζει χρόνο κύκλου ίσο με 10 δευτερόλεπτα), ποσοστό χρήσης του μηχανήματος ίσο με 85% και ωφέλιμο φορτίο κουβά 4m<sup>2</sup>, όπου υπολογίστηκε εύρος παραγωγικότητας ίσο με 408 m<sup>3</sup>/h έως 612 m<sup>3</sup>/h.

#### 4.4 Σύγκριση μεταξύ των δύο εργοταξίων για τον εκσκαφέα R500LC – 7A

Δεδομένου ότι οι εκσκαφείς του εργοταξίου Α και οι εκσκαφείς τυπολογίας E1,E2 του εργοταξίου Β αποτελούν το ίδιο μοντέλο μηχανήματος (R500LC-7A), πραγματοποιήθηκε σύγκριση για τον συγκεκριμένο τύπο εκσκαφέα μεταξύ των δύο εργοταξίων, η οποία φαίνεται στο **Σχήμα 40**. Ωστόσο, δεδομένου ότι η σύγκριση αυτή αφορά διαφορετικούς μήνες καθώς και διαφορετικές συνθήκες εκσκαφής, οποιαδήποτε διαφορά στις καταναλώσεις πιθανόν να οφείλεται στους παραπάνω λόγους.



**Σχήμα 40: Σύγκριση μεταξύ εργοταξίων του εκσκαφέα μοντέλου R500LC-7A**

Σημείωση: Για το εργοτάξιο Β η πρώτη και η τρίτη κατανάλωση αναφέρονται στον εκσκαφέα E1 για τους μήνες Δεκέμβριο 2021 και Φεβρουάριο 2022 αντίστοιχα, ενώ η δεύτερη κατανάλωση αναφέρεται στον εκσκαφέα E2 τον μήνα Ιανουάριο 2022. Όσον αφορά το εργοτάξιο Α, οι δύο καταναλώσεις αναφέρονται στον χρησιμοποιούμενο ερπυστριοφόρο εκσκαφέα για τους μήνες Μάιο και Ιούλιο του 2021 αντίστοιχα.

## 4.5 Παραδοχές και πιθανά σφάλματα

Στο σημείο αυτό, απαραίτητο είναι να αναφερθούν συγκεντρωτικά οι παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν για να υλοποιηθεί η έρευνα που προηγήθηκε, καθώς και τα σφάλματα τα οποία ενδέχεται να περιέχονται στους υπολογισμούς.

1. Πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω παραδοχές για τους εκσκαφείς, οι οποίες προέκυψαν κατόπιν συζήτησης με τους υπεύθυνους του εργοταξίου:
  - Χρόνος Κύκλου: 22-28 δευτερόλεπτα
  - Ποσοστό Χρήσης: 85%
  - Συντελεστής Πλήρωσης Κουβά: 100%
2. Πραγματοποιήθηκε η παραδοχή ότι τα μηχανήματα του εργοταξίου Β βρίσκονται στη μέση ζώνη λειτουργίας που αναφέρουν τα εγχειρίδια των κατασκευαστών.
3. Στα μηχανήματα στα οποία δεν ήταν εφικτό να προσδιοριστεί η ειδική κατανάλωση καυσίμου μέσω των εγχειρίδιων κατασκευαστών, αποδόθηκε η τιμή των 0,22 kg/kWh, η οποία προέκυψε από τη βιβλιογραφία για ένα συγκεκριμένο εύρος της ιπποδύναμης των μηχανημάτων.
4. Η ενεργειακή κατανάλωση των μηχανημάτων εκσκαφής δεν μεταβάλλεται σημαντικά από την αύξηση του βάθους.
5. Για μηχανήματα που δεν περιέχουν δεδομένα στα εγχειρίδια (π.χ. Hyundai) σχετικά με τον συντελεστή φόρτισης, προσδιορίστηκε προσεγγιστικά μέσω εγχειρίδιων άλλων κατασκευαστών, για μηχανήματα παρόμοιων χαρακτηριστικών.
6. Θεωρήθηκε διάλειμμα των χειριστών ίσο με 30 λεπτά σε 10 ώρες εργασίας.

Όσον αφορά τα πιθανά σφάλματα, αν και οι θεωρητικά υπολογισμένες τιμές συγκλίνουν στο μεγαλύτερο ποσοστό με τις πραγματικές, ενδέχεται να εντοπιστούν σφάλματα τα οποία οφείλονται στους παρακάτω παράγοντες:

- Σφάλματα παραδοχών
- Σφάλματα καταγραφής πραγματικών δεδομένων
- Σφάλματα που εξαρτώνται από εξωγενείς παράγοντες όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες
- Σφάλματα που εξαρτώνται από τον ανθρώπινο παράγοντα

## 4.6 Πορίσματα συγκρίσεων

### 4.6.1 Πορίσματα εργοταξίου Α

Ύστερα από την επεξεργασία δύο μηνών λειτουργίας του ερπυστριοφόρου εκσκαφέα στο εργοτάξιο Α, προέκυψε ένα σύνολο αξιοσημείωτων πορισμάτων. Αρχικά, η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου βρίσκονται κατά προσέγγιση στην ίδια τιμή και για τους δύο μήνες λειτουργίας, τιμή η οποία είναι κατά μικρό ποσοστό αυξημένη από το άνω όριο το οποίο υπολογίστηκε μέσω της βιβλιογραφίας (**Σχήμα 7**). Συμπληρωματικά, παρατηρήθηκε ότι το μηχάνημα στον μήνα Ιούλιο χαρακτηρίζεται από υψηλότερη παραγωγικότητα από τον Μάιο, με ωριαία κατανάλωση καυσίμου που ωστόσο ξεπερνά αυτή που ορίζει ο κατασκευαστής του μηχανήματος για μέγιστη τιμή του συντελεστή φόρτισης. Αυτό το φαινόμενο εξηγείται από την τιμή του συντελεστή R<sup>2</sup> για τον μήνα Ιούλιο, η οποία υποδηλώνει είτε ότι οι εργασίες ενδεχομένως να γίνονται σε διαφορετικές συνθήκες ανά ημέρα, είτε ότι απουσιάζουν κάποιες ώρες λειτουργίες από τις καταγραφές των δεδομένων.

Η απόκλιση μεταξύ της θεωρητικής και πραγματικής τιμής της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου έδωσε τη δυνατότητα για την αναγωγή της σε εξοικονόμηση κόστους ενέργειας για την εταιρεία. Πιο συγκεκριμένα, σε περίπτωση που οι παραδοχές που προαναφέρθηκαν είναι σωστές και τα πιθανά σφάλματα είναι ελαχιστοποιημένα, η εταιρεία έχει τη δυνατότητα να εξοικονομεί 0,03 – 0,09 € ανά κυβικό μέτρο που επεξεργάζεται. Αυτό σε μηνιαίο επίπεδο για τους μήνες που επεξεργάστηκαν, σημαίνει ότι η εταιρεία ύστερα από βελτιστοποίηση των μεταβλητών που επηρεάζουν την κατανάλωση, θα μπορούσε να έχει μέγιστη εξοικονόμηση κόστους ενέργειας περίπου ίση με 3200€ τον μήνα Μάιο και 2500€ τον μήνα Ιούλιο (**Σχήμα 10**). Αυτή η εξοικονόμηση αναφέρεται σε ένα μηχάνημα εργοταξίου για ένα μήνα λειτουργίας του, συνεπώς αναλογίζοντας τον αριθμό των μηχανημάτων που πραγματοποιούν εργασίες σε ένα εργοτάξιο, καθώς και τον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός έργου, είναι αντιληπτό ότι μπορεί να προκύψει ένας σημαντικός αριθμός χρημάτων που εξοικονομούνται. Τέλος, η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου οδηγεί και στη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> προς το περιβάλλον, κάτι το οποίο αποτελεί ένα σημαντικό και απαραίτητο εγχείρημα των τεχνικών εταιρειών, με σκοπό την καταπολέμηση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής.

#### 4.6.2 Πορίσματα εργοταξίου Β

Στην περίπτωση του εργοταξίου Β η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε ήταν διαφορετικής μορφής από αυτή του εργοταξίου Α, λόγω της έλλειψης δεδομένων που αφορούν τις μεταβλητές θεωρητικού υπολογισμού της κατανάλωσης και των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου. Έτσι, τα μεγέθη υπολογίστηκαν με βάση την **Εξίσωση 5** και την **Εξίσωση 6**, ενώ πραγματοποιήθηκε ξεχωριστός υπολογισμός της θεωρητικής παραγωγικότητας για τα μηχανήματα στα οποία ήταν εφικτό. Με τη θεώρηση ότι οι συνθήκες που πραγματοποιούνται οι εργασίες βρίσκονται στη μέση ζώνη που ορίζει ο κατασκευαστής του κάθε μηχανήματος και εφαρμόζοντας το αντίστοιχο εύρος του συντελεστή φόρτισης των μηχανημάτων στους υπολογισμούς, προέκυψε ένας αριθμός αξιοσημείωτων πορισμάτων. Αρχικά, στο μεγαλύτερο σύνολο του μηχανολογικού εξοπλισμού παρατηρήθηκε ότι η πραγματική κατανάλωση και εκπομπές CO<sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου βρίσκεται εντός των θεωρητικά υπολογισμένων ορίων. Σε κάποιες περιπτώσεις (π.χ. εκσκαφέας E1) παρατηρήθηκε ότι ενώ η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου βρίσκεται εντός των ορίων, η παραγωγικότητα του εξοπλισμού είναι μικρότερη από το κάτω θεωρητικά υπολογισμένο όριο. Αυτό ενδεχομένως να εξηγείται από τη μείωση της ταχύτητας των εργασιών με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης του καυσίμου από τα μηχανήματα. Ωστόσο, δεδομένου ότι η ενδεχόμενη μείωση του χρόνου κύκλου των εργασιών συμβάλει στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου (Jassim, Lu and Olofsson, 2017), σημαντικό πόρισμα είναι ότι υπάρχει περιθώριο μείωσης της κατανάλωσης μέσω αύξησης της παραγωγικότητας του μηχανήματος. Όπως έχει αναφερθεί, η αύξηση της παραγωγικότητας μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση του χρόνου κύκλου ή/και την αύξηση του ποσοστού χρήσης του εξοπλισμού.

Άξιες αναφοράς είναι οι περιπτώσεις στις οποίες παρατηρήθηκε σημαντική απόκλιση από τα θεωρητικά υπολογισμένα όρια της κατανάλωσης. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση του ισοπεδωτή γαιών I1 παρατηρήθηκε ιδιαίτερα μειωμένη κατανάλωση ανά μονάδα παραγόμενου έργου τόσο σε σχέση με το κάτω όριο της βιβλιογραφίας, όσο και σε σχέση με τον ισοπεδωτή γαιών I2 κατά τον 3<sup>ο</sup> μήνα λειτουργίας. Η εν λόγω μείωση ενδεχομένως να οφείλεται στις συνθήκες των εργασιών που πραγματοποίησε το συγκεκριμένο μηχάνημα στον αντίστοιχο μήνα, ωστόσο θα ήταν σημαντικό να διερευνηθεί περαιτέρω η αιτία για την οποία παρουσιάζεται αυτή η απόκλιση. Επιπλέον, στην περίπτωση του Φορτωτή Φ1 ενώ παρατηρήθηκε συμμόρφωση με τα υπολογισμένα όρια, η παραγωγικότητα του μηχανήματος παρουσιάζεται σημαντικά αυξημένη κατά τον 4<sup>ο</sup> μήνα λειτουργίας. Αυτό, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 37** συνδυάζεται με μειωμένη τιμή της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου σε σχέση με τους προηγούμενους μήνες, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι η εταιρεία στον συγκεκριμένο μήνα πραγματοποίησε τη ζητούμενη αύξηση της παραγωγικότητας με ταυτόχρονη μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου. Τέλος, τα θεωρητικά όρια της παραγωγικότητας του φορτωτή Φ1 που υπολογίστηκαν με βάση εύρος χρόνου κύκλου δύο με τρεις φορές μεγαλύτερο από αυτό που προτείνει ο κατασκευαστής, υποδηλώνουν ότι σε πραγματικές συνθήκες ενός εργοταξίου είναι πολλές φορές αδύνατο να επιτευχθούν.



## 4.7 Προτάσεις

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε οδήγησε στο συμπέρασμα ότι ενδεχομένως να μην είναι απαραίτητη η εγκατάσταση τηλεματικής στα μηχανήματα του εργοταξίου, προκειμένου να υπάρχει άμεση πληροφόρηση σχετικά με την κατανάλωση και τις ώρες λειτουργίας. Το σημαντικότερο βήμα για την όσο το δυνατόν πιο ακριβή αλλά και μικρού κόστους προσέγγιση των μεγεθών της κατανάλωσης είναι η συστηματική καταγραφή δεδομένων. Η καταγραφή αυτή είναι σημαντικό να περιλαμβάνει τόσο πραγματικά δεδομένα που προκύπτουν από το εργοτάξιο, όσο και δεδομένα που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μηχανημάτων του εργοταξίου, καθώς και τις γεωτεχνικές μελέτες που πραγματοποιούνται πριν από την έναρξη ενός έργου. Αναλυτικότερα, προτείνεται η σαφής καταγραφή της ποσότητας καυσίμου που εισέρχεται στο ντεπόζιτο ενός μηχανήματος, ούτως ώστε να είναι εφικτό να προσδιοριστεί με απόλυτη ακρίβεια η κατανάλωσή του, η καταγραφή του παραγόμενου έργου των μηχανημάτων, καθώς και η καταγραφή των ωρών λειτουργίας του εξοπλισμού συμπεριλαμβάνοντας οποιονδήποτε χρόνο διαλείμματος του χειριστή. Επομένως, θα είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί μια πιο συστηματική προσέγγιση με πιο ακριβείς υπολογισμούς, τόσο για τη σύγκριση πραγματικών και θεωρητικών μεγεθών, όσο και για την πρόβλεψη των μεγεθών της κατανάλωσης πριν από την έναρξη ενός έργου.

Η ανάπτυξη μιας βάσης δεδομένων, η οποία περιλαμβάνει τα στοιχεία που προαναφέρθηκαν, μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή του καταλληλότερου μηχανολογικού εξοπλισμού για τις απαιτήσεις μίας εργασίας, σε συνδυασμό με την εμπειρία του ανθρώπινου δυναμικού, όσο και στην εκ των προτέρων πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμου που θα έχουν τα μηχανήματα του εργοταξίου. Μεταβλητές που έχουν υψηλή επίδραση στην ενεργειακή κατανάλωση, όπως ο χρόνος κύκλου και το ποσοστό χρήσης των μηχανημάτων, είναι εφικτό να εκτιμηθούν είτε πειραματικά είτε με χρήση του εγχειριδίου των κατασκευαστών, ενώ ο συντελεστής φόρτισης μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά, με χρήση των δεδομένων που προκύπτουν από τις γεωτεχνικές μελέτες (βλ. Εργοτάξιο Α), αλλά και προσεγγιστικά με χρήση των εγχειριδίων κατασκευαστών (βλ. Εργοτάξιο Β). Έτσι, η βάση δεδομένων σε συνδυασμό με τη χρήση προγράμματος αυτοματοποίησης που θα εξάγει αναφορές θα βοηθήσει τις εταιρείες στην κατά προσέγγιση ενεργειακή αποτίμηση των μηχανημάτων και εργασιών καθώς και στην εκ των προτέρων πρόβλεψη της ενεργειακής κατανάλωσης και άρα του κόστους και της ρύπανσης προς το περιβάλλον.

Τέλος, δεδομένου ότι η ενεργειακή κατανάλωση ανά μονάδα παραγόμενου έργου εξαρτάται από ένα μεγάλο σύνολο μεταβλητών, η βελτιστοποίηση της γραμμής παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η χωροθέτηση των μηχανημάτων στο εργοτάξιο, αποτελεί ένα ερευνητικά ενδιαφέρον και σημαντικό εγχείρημα. Επομένως, με την ελαχιστοποίηση μεταβλητών όπως οι νεκροί χρόνοι μεταξύ των εργασιών καθώς και οι χρόνοι μεταφοράς των υλικών εντός του εργοταξίου, είναι εφικτή η περαιτέρω μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης, η μικρότερη καταπόνηση του μηχανολογικού εξοπλισμού και τελικά η μείωση του κόστους των εργασιών και της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

## 5. Συζήτηση

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται συσχέτιση των αποτελεσμάτων της έρευνας που προηγήθηκε με αυτά που υπάρχουν στην υφιστάμενη επιστημονική βιβλιογραφία. Αρχικά, οι παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν για τον χρόνο κύκλου, το ποσοστό χρήσης και το ποσοστό πλήρωσης του κουβά των εκσκαφών συμφωνούν με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Trani *et al.* (2016). Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα έρευνα πραγματοποιήθηκε για εύρος χρόνου κύκλου 22 με 28 δευτερόλεπτα, ποσοστό χρήσης ίσο με 85% και ποσοστό πλήρωσης του κουβά ίσο με 100% σε αντίθεση με τη μελέτη των Trani *et al.* (2016) η οποία πραγματοποιήθηκε σε δύο εκσκαφείς με χρόνο κύκλου 22 και 25 δευτερόλεπτα, ποσοστό χρήσης ίσο με 83% και ποσοστό πλήρωσης του κουβά ίσο με 100% αντίστοιχα. Η παραδοχή για τις μεταβλητές του χρόνου κύκλου έρχεται αντικρουόμενη με τη μελέτη των Jassim, Lu and Olofsson (2018b) οι οποίοι θεώρησαν χρόνο κύκλου μεταξύ 10 και 19 δευτερολέπτων και ποσοστό χρήσης ίσο με 60%. Η συγκεκριμένη διαφοροποίηση ενδεχομένως να οφείλεται στο μικρό μέγεθος των εκσκαφών που μελέτησαν οι εν λόγω ερευνητές καθώς και στις συνθήκες του εργοταξίου που μελετήθηκε, στο οποίο θεωρήθηκε πως υπάρχουν αρκετοί νεκροί χρόνοι και αναμονές σε ένα πλήρες ωράριο λειτουργίας των μηχανημάτων. Επιπλέον, οι Devi και Palaniappan, (2017) παρατήρησαν σε ένα από τα εργοτάξια που εξέτασαν ότι η αυξημένη παραγωγικότητα του εξοπλισμού οδήγησε σε μειωμένη κατανάλωση ενέργειας ανά μονάδα παραγόμενου έργου, κάτι το οποίο εντοπίστηκε και στην παρούσα έρευνα για τον φορτωτή Φ1 του εργοταξίου Β.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας εστιάζουν στη σύγκριση της θεωρητικής προσέγγισης των μεγεθών της κατανάλωσης με τις πραγματικές μετρήσεις που προκύπτουν από τα εργοτάξια της μελέτης περίπτωσης. Αντίθετα, στη διεθνή βιβλιογραφία με εξαίρεση τη μελέτη των Trani *et al.* (2016) εξετάζεται η πρόβλεψη των μεγεθών της κατανάλωσης στο στάδιο μελέτης ενός έργου. Πιο συγκεκριμένα, οι Jassim, Lu and Olofsson (2018b) εξέτασαν τρία τμήματα εργοταξίου σε μελέτη περίπτωσης και τρία διαφορετικά βάθη εκσκαφής για κάθε τμήμα. Έτσι, για δεδομένα λειτουργικά χαρακτηριστικά τριών διαφορετικών μοντέλων εκσκαφών υπολόγισαν τη συνολική κατανάλωση του κάθε εκσκαφέα σε μονάδα μέτρησης MJ/m<sup>3</sup> για κάθε αντίστοιχο τμήμα του εργοταξίου με σκοπό την εύρεση του μοντέλου με τη μικρότερη κατανάλωση για τις απαιτήσεις του αντίστοιχου τμήματος. Εν αντιθέσει, η παρούσα έρευνα διαφέρει, καθότι με δεδομένη την πραγματική κατανάλωση και το παραγόμενο έργο της μελέτης περίπτωσης, πραγματοποιήθηκε σύγκριση των θεωρητικών και πραγματικών μεγεθών της κατανάλωσης καυσίμου σε μονάδα l/m<sup>3</sup>. Τέλος, αξιοσημείωτη παρατήρηση των αποτελεσμάτων της παρούσας έρευνας που πραγματοποιήθηκε και στην έρευνα των Jassim, Lu and Olofsson (2018b) είναι ότι οι εκσκαφείς συνιστούν μηχανήματα τα οποία σε σχέση με τον υπόλοιπο μηχανολογικό εξοπλισμό ενός εργοταξίου, καταναλώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας παράγοντας έτσι μεγάλες ποσότητες CO<sub>2</sub>.

Εν συνεχεία, οι μελέτες των (Jassim, Lu and Olofsson, 2017, 2018a, 2019; Jassim *et al.*, 2020) εντάσσονται στην ίδια κατηγορία, δεδομένου ότι η έρευνα που πραγματοποιήσαν εστιάζει

στην πρόβλεψη των μεγεθών της κατανάλωσης και των εκπομπών CO<sub>2</sub> στο στάδιο μελέτης ενός έργου, με σκοπό την υποστήριξη του σχεδιασμού περιβαλλοντικά βιώσιμων χωματοουργικών εργασιών. Τα ευρήματα των εν λόγω ερευνών είναι αδύνατο να συσχετισθούν με την παρούσα διπλωματική εργασία, καθότι όπως προαναφέρθηκε, δεν εστιάζουν στη σύγκριση με πραγματικές μετρήσεις που προκύπτουν από τα εργοτάξια. Ωστόσο, η έρευνα Trani *et al.* (2016) χρησιμοποίησε πραγματικά δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου και παραγόμενου έργου από μελέτη περίπτωσης, έτσι ώστε να εξετάσει την προβλεπτική ικανότητα του υπολογιστικού μοντέλου που πρότεινε. Σημαντικό σε αυτό το σημείο είναι να επισημανθεί ότι το μοντέλο που πρότειναν οι εν λόγω ερευνητές είναι ταυτόσημο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση της παρούσας έρευνας. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές συνέκριναν τη συνολική προβλεπόμενη κατανάλωση ανά κυβικό μέτρο τεσσάρων μηχανημάτων εργοταξίου με τα πραγματικά δεδομένα από μελέτη περίπτωσης, όπου και διαπίστωσαν υποεκτίμηση της τάξης του 15% (η πραγματική κατανάλωση είναι μεγαλύτερη).

Αντίστοιχη υποεκτίμηση παρατηρήθηκε και στην παρούσα έρευνα στην περίπτωση του εργοταξίου Α, όπου η πραγματική κατανάλωση (ανά κυβικό μέτρο εκσκαφής) παρουσιάστηκε κατά 17% μεγαλύτερη από τη μέση θεωρητικά υπολογισμένη ποσότητα. Οι ερευνητές απέδωσαν την εν λόγω απόκλιση σε τυπικό σφάλμα του μοντέλου που προέρχεται από τις υποθέσεις ή τις μαθηματικές τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν, σε σφάλμα που αποδίδεται στις μεθόδους καταγραφής των δεδομένων, καθώς και σε εξωγενές σφάλμα που αποδίδεται στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ειδικότερα, υπέθεσαν ότι το σφάλμα οφείλεται κυρίως στη μέθοδο καταγραφής των δεδομένων, καθώς οι τεχνικές εταιρείες δεν συνηθίζουν να αναφέρουν τις ώρες λειτουργίας των μηχανημάτων σε ένα εργοτάξιο. Ως εκ τούτου ο χρόνος που χρησιμοποίησαν για των υπολογισμό των πραγματικών μετρήσεων της κατανάλωσης πιθανόν να είναι πιο υψηλός από τον πραγματικό χρόνο λειτουργίας. Άξιο αναφοράς είναι ότι οι ερευνητές έλαβαν δεδομένα σχετικά με τις πραγματικές καταναλώσεις των μηχανημάτων ύστερα από την πραγματοποίηση έρευνας, κάνοντας απευθείας ερωτήσεις στους χειριστές των μηχανημάτων και τους υπεύθυνους των εργοταξίων.

Αντίθετα, η συγκεκριμένη απόκλιση στην παρούσα διπλωματική αποδίδεται σε ενδεχόμενη αυξημένη κατανάλωση σε σχέση με τις προδιαγραφές των μηχανημάτων. Δεδομένου ότι μετρήσεις των πραγματικών καταναλώσεων καθώς και των ωρών λειτουργίας πάρθηκαν ύστερα από καταγραφές της εταιρείας οι οποίες παρουσιάζονται έγκυρες τουλάχιστον για την περίπτωση του Μαΐου, η υπό κρίση απόκλιση είναι εφικτό να αποδοθεί πέρα από το τυπικό σφάλμα του μοντέλου και το εξωγενές σφάλμα των περιβαλλοντικών συνθηκών, στην ενεργειακή απόδοση του εξοπλισμού που μπορεί να οφείλεται τόσο στον ανθρώπινο παράγοντα όσο και στη συντήρηση του μηχανήματος. Κατά συνέπεια, τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας δημιούργησαν ένα πεδίο έρευνας το οποίο εστιάζει στην ενεργειακή αξιολόγηση των μηχανημάτων του εργοταξίου με γνώμονα το μέγεθος της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου. Αυτό δίνει τη δυνατότητα αναγωγής τυχόν αποκλίσεων των πραγματικών από τα θεωρητικά μεγέθη σε εξοικονόμηση κόστους για τις εταιρείες, κάτι το οποίο δεν συναντάται στις μελέτες που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί γύρω

από το συγκεκριμένο ερευνητικό αντικείμενο. Επομένως, καθίσταται εύληπτο ότι η ελαχιστοποίηση των υπολογιστικών σφαλμάτων μπορεί να δώσει τη δυνατότητα για αξιολόγηση της ενεργειακής απόδοσης των μηχανημάτων με ικανοποιητική ακρίβεια.

## 6. Συμπεράσματα

Από την ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας σχετικά με το αντικείμενο της συσχέτισης κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο, προέκυψε ότι δεν έχει πραγματοποιηθεί σημαντικός αριθμός μελετών που να προσεγγίζει το μέγεθος της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και κατά το στάδιο μελέτη ενός έργου. Ως εκ τούτου, πραγματοποιήθηκε μια μελέτη η οποία με τη βοήθεια των εξισώσεων που πρότειναν οι Jassim, Lu και Olofsson (2017,2018b) και Trani *et al.* (2016) προσεγγίζει το μέγεθος της κανονικοποιημένης κατανάλωσης καυσίμου στο πλαίσιο ενός πραγματικού έργου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η δημιουργία ενός πλαισίου διαχείρισης ενέργειας των μηχανημάτων του εργοταξίου, τόσο κατά τη διάρκεια όσο και κατά το στάδιο μελέτης ενός έργου, που στοχεύει στη μείωση του κόστους ενέργειας για τις εταιρείες και των εκπομπών CO<sub>2</sub> για το περιβάλλον. Οι στόχοι που τέθηκαν για την επίτευξη του συγκεκριμένου σκοπού, αποτέλεσαν την:

1. Συσχέτιση της κατανάλωσης καυσίμου με το παραγόμενο έργο στα μηχανήματα του εργοταξίου.
2. Εύρεση δεδομένων που αφορούν την αντιμετώπιση των τεχνικών εταιρειών της βιομηχανίας σχετικά με το αντικείμενο της συσχέτισης της ενεργειακής κατανάλωσης με το παραγόμενο έργο.
3. Δημιουργία πλαισίου που μέσω προτάσεων, θα βοηθήσει τις τεχνικές εταιρείες του χώρου.

Ο πρώτος στόχος, ο οποίος αποτελεί και κύριο στόχο του προτύπου ISO 50001, επιτεύχθηκε ύστερα από διερεύνηση της διεθνούς βιβλιογραφίας με σκοπό τον εντοπισμό μελετών που εξετάζουν το ερευνητικό αντικείμενο της εργασίας. Ύστερα από τη συλλογή του απαραίτητου υλικού, θεωρήθηκε σκόπιμο να πραγματοποιηθούν υπολογισμοί στο πλαίσιο μελέτης περίπτωσης τεχνικής εταιρείας, ώστε να γίνει εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου στην πράξη. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν κατόπιν συλλογής των απαραίτητων λειτουργικών χαρακτηριστικών των μηχανημάτων του εργοταξίου από τα εγχειρίδια των κατασκευαστών, καθώς και από συνεντεύξεις που διεξήχθησαν με τους υπεύθυνους των εργοταξίων. Ο δεύτερος στόχος επιτεύχθηκε ύστερα από συνεντεύξεις που πραγματοποιήθηκαν με εργαζόμενους τεχνικών εταιρειών του χώρου. Αναλυτικότερα, διερευνήθηκε η προσέγγιση των εν λόγω εταιρειών σχετικά με το ερευνητικό αντικείμενο αλλά και ενδεχόμενοι περιορισμοί που το χαρακτηρίζουν. Τέλος, με την πραγματοποίηση των υπολογισμών στο πλαίσιο της μελέτης περίπτωσης καθώς και τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές μετρήσεις που πάρθηκαν από αυτή, δόθηκε η δυνατότητα υλοποίησης του τρίτου στόχου που τέθηκε για την εργασία. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκε η υποβολή ενός πλαισίου προτάσεων το οποίο δύναται να βοηθήσει τόσο την εταιρεία της μελέτης περίπτωσης όσο και τις υπόλοιπες τεχνικές εταιρείες της βιομηχανίας στην καλύτερη ενεργειακή διαχείριση των μηχανημάτων έργου.

Η ανάλυση έγινε με δύο διαφορετικές προσεγγίσεις ανάλογα με το υπό εξέταση εργοτάξιο. Πρώτον, στην περίπτωση του εργοταξίου Α, λόγω επάρκειας δεδομένων σχετικά με τις συνθήκες του εργοταξίου και τον χρόνο κύκλου των εκσκαφών, πραγματοποιήθηκε αριθμητικός υπολογισμός του συντελεστή φόρτισης των εκσκαφών και χρησιμοποιήθηκε εύρος του χρόνου κύκλου, ώστε να προσεγγιστεί το εύρος των μεγεθών κατανάλωσης και των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Από τα αποτελέσματα προέκυψε το συμπέρασμα ότι η πραγματική κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου και κατ' επέκταση οι εκπομπές CO<sub>2</sub> παρουσιάζουν σταθερότητα τους μήνες Μάιο και Ιούλιο του 2021. Συνακόλουθα, η πραγματική τιμή των μεγεθών παρουσιάστηκε κατά μικρό ποσοστό αυξημένη από το άνω όριο που υπολογίστηκε με τη βοήθεια των εξισώσεων της βιβλιογραφίας. Η εν λόγω απόκλιση από τα άνω και κάτω όρια ανάχθηκε σε ενδεχόμενη εξοικονόμηση κόστους για την εταιρεία της μελέτης περίπτωσης η οποία υπολογίστηκε κατά προσέγγιση ίση με 3200€ ανά μηχάνημα στην περίπτωση του Ιουλίου και 2500€ ανά μηχάνημα στην περίπτωση του Μαΐου. Η αυξημένη εξοικονόμηση κόστους στον μήνα Ιούλιο σε σχέση με τον μήνα Μάιο οφείλεται στην παραγωγή μεγαλύτερης ποσότητας έργου κατά τη διάρκεια του Ιουλίου. Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι σε περίπτωση που οι παραδοχές που έχουν σημειωθεί είναι σωστές, η υπό εξέταση εξοικονόμηση μπορεί να επιτευχθεί εάν οι εκσκαφείς πραγματοποιούν τις εργασίες σε χρόνο κύκλου κατά μέσο όρο ίσο με 22 δευτερόλεπτα. Τέλος, η παραπάνω εξοικονόμηση κρίνεται ιδιαίτερα αξιόλογη στην περίπτωση που αναχθεί στο σύνολο του μηχανολογικού εξοπλισμού της εταιρείας, για το συνολικό παραγόμενο έργο που απαιτείται για την ολοκλήρωση ενός έργου.

Στην περίπτωση του εργοταξίου Β, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για μεγαλύτερο σύνολο μηχανημάτων τα οποία αποτελούνταν από διαφορετικά μοντέλα ισοπεδωτών γαιών, προωθητήρων γαιών, ερπυστριοφόρων και ελαστικοφόρων εκσκαφών καθώς και μοντέλο ελαστικοφόρου φορτωτή. Η θεωρητική προσέγγιση των μεγεθών της κατανάλωσης υλοποιήθηκε για εύρος του συντελεστή φόρτισης των μηχανημάτων, το οποίο προέκυψε από τα εγχειρίδια των κατασκευαστών για συνθήκες μέσης φόρτισης. Στην περίπτωση των εκσκαφών έγινε ξεχωριστή σύγκριση της θεωρητικής με την πραγματική παραγωγικότητα, για τα δεδομένα του χρόνου κύκλου που είχαν παρθεί από την εταιρεία για το ίδιο μοντέλο εκσκαφέα στην περίπτωση του εργοταξίου Α. Από τα αποτελέσματα προέκυψε το συμπέρασμα ότι σε περίπτωση που ο εξοπλισμός πραγματοποίησε εργασίες σε μέσες συνθήκες φόρτισης, η πραγματική κατανάλωση που είχε βρίσκεται στις περισσότερες περιπτώσεις εντός των θεωρητικών ορίων που υπολογίστηκαν για το εκάστοτε μηχάνημα. Αξιοσημείωτη απόκλιση παρατηρήθηκε στην περίπτωση του ισοπεδωτή γαιών I1 τον 3<sup>ο</sup> μήνα λειτουργίας καθώς και στον φορτωτή Φ1 τον 1<sup>ο</sup> μήνα λειτουργίας. Σημαντικό συμπέρασμα επίσης αποτελεί ότι μόνο στην περίπτωση του εκσκαφέα Ε3 σημειώνεται συμμόρφωση με τα όρια της παραγωγικότητας, σε αντίθεση με τους εκσκαφείς Ε1 και Ε2 για τους οποίους παρατηρήθηκε παραγωγικότητα μικρότερη από το κάτω υπολογισμένο όριο. Τέλος, είναι αξιοσημείωτο ότι οι εκσκαφείς παρουσιάζουν αυξημένη κατανάλωση σε σχέση με τα υπόλοιπα μηχανήματα που



μελετήθηκαν, κάτι το οποίο τους θέτει σε προτεραιότητα στην προσπάθεια μείωσης της κατανάλωσης και των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται απαραίτητο να επισημανθεί η πρακτική εφαρμογή της μελέτης που εκπονήθηκε, καθώς και οι περιορισμοί που τη χαρακτηρίζουν. Αρχικά, με σκοπό την αξιοποίηση της παρούσας έρευνας είναι απαραίτητη η συστηματική καταγραφή σε βάση δεδομένων των απαιτούμενων μεταβλητών για τη θεωρητική προσέγγιση της κατανάλωσης, καθώς και των πραγματικών μετρήσεων από το εργοτάξιο για την πραγματοποίηση της αντίστοιχης σύγκρισης. Πιο συγκεκριμένα, σημαντική είναι η καταγραφή των λειτουργικών χαρακτηριστικών των μηχανημάτων που χρησιμοποιούνται στο εργοτάξιο, των δεδομένων που αφορούν τον τύπο του εδάφους και το είδος των εργασιών, και τέλος των πραγματικών μετρήσεων της κατανάλωσης, του παραγόμενου έργου και των ωρών λειτουργίας που προκύπτουν από το εργοτάξιο. Έτσι, με τη βοήθεια υπολογιστικού προγράμματος θα μπορεί να γίνεται εξαγωγή αναφορών προκειμένου να ελέγχεται η απόδοση των μηχανημάτων κατά τη διάρκεια ενός έργου, αλλά και η θεωρητική εκτίμηση των μεγεθών στο στάδιο μελέτης ενός έργου. Επιπλέον, θα είναι εφικτή η σύγκριση διαφορετικών μοντέλων μηχανημάτων για την πραγματοποίηση μιας συγκεκριμένης εργασίας, με κριτήριο την ενεργειακή τους κατανάλωση και το περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο. Σε συνδυασμό λοιπόν, με την εμπειρία του ανθρώπινου δυναμικού μπορεί να πραγματοποιηθεί η βέλτιστη επιλογή εξοπλισμού και η καλύτερη διαχείριση του «στόλου» μηχανημάτων των εταιρειών. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι με την καθημερινή καταγραφή της ποσότητας πλήρωσης του ντεπόζιτου των μηχανημάτων με καύσιμα είναι εφικτός ο προσδιορισμός της κατανάλωσης των μηχανημάτων, δεδομένου ότι η ποσότητα καυσίμων που εισέρχεται στο ντεπόζιτο ισούται με την ποσότητα που καταναλώθηκε κατά τη διάρκεια της αντίστοιχης ημέρας λειτουργίας. Συμπερασματικά, με την εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου οι εταιρείες θα έχουν την ευκαιρία να αποκτήσουν ένα μέτρο σύγκρισης της κατανάλωσης των μηχανημάτων τους, καθώς και έναν τρόπο για την εκ των προτέρων προσέγγιση αυτής.

Περιορισμός της παρούσας έρευνας αποτελεί αρχικά η εξαίρεση της ικανότητας του χειριστή από την υπολογιστική διαδικασία. Όπως επιβεβαιώθηκε από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση αλλά και από τις συνεντεύξεις που έλαβαν χώρα, η επίδραση του ανθρώπινου παράγοντα στην κατανάλωση καυσίμου και στο παραγόμενο έργο είναι μείζονος σημασίας. Έτσι, τα συμπεράσματα που προέκυψαν ενδεχομένως να περιέχουν σφάλματα λόγω του παραπάνω παράγοντα, ο οποίος είναι δύσκολο να εκτιμηθεί στην πράξη. Συνακόλουθα, μη αμελητέα είναι και η επίδραση των περιβαλλοντικών συνθηκών, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία στο εξεταζόμενο μέγεθος της κατανάλωσης, κάτι το οποίο δεν λήφθηκε υπόψη στους υπολογισμούς. Ακόμα, περιορισμός είναι και το γεγονός ότι η ανάλυση του εργοταξίου Α πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με την υπόθεση ότι το βάθος εκσκαφής είναι αμελητέο στην ενεργειακή κατανάλωση. Δεδομένου ότι η αύξηση του βάθους οδηγεί σε αύξηση της πυκνότητας του υλικού, αποτέλεσμα είναι η υψηλότερη φόρτιση του μηχανήματος. Εντούτοις, όπως απέδειξαν οι Jassim, Lu και Olofsson, (2018b) αλλά και επισημάνθηκε από τους υπεύθυνους του εργοταξίου, η επίδραση του βάθους εκσκαφής δεν είναι καθοριστικής

σημασίας για το μέγεθος ενεργειακής κατανάλωσης. Τα αποτελέσματα ωστόσο, θα είχαν μεγαλύτερη ακρίβεια σε περίπτωση που εξεταζόταν η συγκεκριμένη μεταβλητή. Τέλος, περιοριστική κρίνεται και η ποσότητα των δεδομένων που επεξεργάστηκαν, καθώς αποτελούνταν από μετρήσεις συνολικά δύο μηνών λειτουργίας στην περίπτωση του εργοταξίου Α και τεσσάρων μηνών λειτουργίας στην περίπτωση του εργοταξίου Β.

Οι περιορισμοί που συναντώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία δημιούργησαν την ανάγκη καταγραφής προτάσεων για μελλοντική έρευνα που δύναται να συμβάλουν στην περαιτέρω εξερεύνηση του ερευνητικού πεδίου με μεγαλύτερη υπολογιστική ακρίβεια. Αρχικά, δεδομένου ότι οι δραστηριότητες των εργοταξίων είναι εκτεθειμένες στις περιβαλλοντικές συνθήκες, υπάρχουν παράμετροι που επηρεάζουν την κατανάλωση του καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου. Παράμετροι όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και οι καιρικές συνθήκες πρέπει να διερευνηθούν και τελικά να συμπεριληφθούν στους υπολογισμούς. Επιπλέον, παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν την κατανάλωση σχετίζονται με τη συντήρηση του μηχανολογικού εξοπλισμού, αλλά και την ικανότητα των χειριστών. Σύμφωνα με τους *Trani et al.* (2016), η τακτική συντήρηση των μηχανημάτων μπορεί να βοηθήσει στην εξοικονόμηση του καυσίμου και να αυξήσει τη διάρκεια ζωής του εξοπλισμού. Αντίστοιχα, οι ερευνητές αναφέρουν ότι η πραγματοποίηση ταυτόσημων εργασιών του ίδιου μηχανήματος από δύο χειριστές με διαφορετικές συνήθειες και ικανότητα μπορεί να οδηγήσει σε διαφορά της τάξης του 10-12% στην κατανάλωση. Επομένως είναι σημαντικό να εξεταστούν οι παραπάνω παράμετροι και να συμπεριληφθούν στο προτεινόμενο μοντέλο.

Επιπροσθέτως, θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να ερευνηθεί περαιτέρω η μέθοδος σαν εργαλείο αξιολόγησης των μηχανημάτων κατά τη διάρκεια του έργου. Πιο συγκεκριμένα, κρίνεται σκόπιμο να εξεταστούν δεδομένα περισσότερων μηνών λειτουργίας, ούτως ώστε να εντοπιστούν ενδεχόμενα μοτίβα (*patterns*) σε σχέση με τις καταναλώσεις συγκεκριμένων μηχανημάτων αλλά και την πραγματοποίηση συγκεκριμένων εργασιών. Έτσι, θα δοθεί η ευκαιρία στις τεχνικές εταιρείες να έχουν πρόσβαση σε ένα περισσότερο δοκιμασμένο μοντέλο που θα τις βοηθήσει στον εύκολο και με μικρό κόστος προσδιορισμό των μηχανημάτων, που παρουσιάζουν πιο αυξημένη κατανάλωση από την προβλεπόμενη. Τέλος, ενδιαφέρον εγχείρημα θα αποτελούσε η πλήρης εξέταση της γραμμής παραγωγής ενός εργοταξίου, λαμβάνοντας υπόψη μεταβλητές όπως οι αποστάσεις που διανύουν τα οχήματα μεταφοράς υλικού εντός του εργοταξίου, αλλά και οι αποστάσεις των συνεργαζόμενων οχημάτων (π.χ. εκσκαφείς-φορτηγά), έχοντας ως σκοπό την ελαχιστοποίηση των χρόνων και του κόστους, καθώς και τη μεγιστοποίηση της παραγωγής. Συμπερασματικά, η μελλοντική έρευνα στον τομέα της κατανάλωσης καυσίμου σε σχέση με το παραγόμενο έργο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά οφέλη τόσο για την κατασκευαστική βιομηχανία, όσο και για το περιβάλλον.



## Κατάλογος Αναφορών

BML (1983), Handbuch BML: Daten für die Berechnung von Baumaschinen-Leistungen, Zeittechnik, Neu-Isenburg.

Caterpillar (2007). *Caterpillar D8T, D9T, D10T WH Track-Type Tractors / Bulldozers*: Caterpillar Inc.

Caterpillar (2016). *Caterpillar Performance Handbook*. Peoria, Ill.: Caterpillar Inc.

Crowe, S. et al. (2011) 'The case study approach', *BMC Medical Research Methodology*, 11. Available at: <https://doi.org/10.1186/1471-2288-11-100>.

*Detailed D65EX-15 Komatsu - EN technical specification in 1 pdf | Lectura Specs* (2009). Available at: <https://www.lectura-specs.com/en/bulldozers-d65ex-15-komatsu/datasheet/18704/1013599>

Devi, L. and Palaniappan, S., (2017). A study on energy use for excavation and transport of soil during building construction. *Journal of Cleaner Production*, 164, pp.543-556. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.208>.

Duncan, V. and Holtslander, L. (2012) 'Utilizing grounded theory to explore the information-seeking behavior of senior nursing students', *Journal of the Medical Library Association*, 100(1), pp. 20–27. Available at: <https://doi.org/10.3163/1536-5050.100.1.005>.

Filas, F.J. (2002) 'Excavation, loading, and material transport', *SME Mining Reference Handbook*; Lowrie, R.L., Ed.; Society for Mining, Metallurgy and Exploration: Littleton, CO, USA,; pp. 215–241.

George, T., (2022). *Types of Interviews in Research | Guide & Examples*. [online] Scribbr. Available at: < <https://www.scribbr.com/methodology/interviews-research/> >

Guides.lib.vt.edu. (2022). *Research Guides: Research Methods Guide: Interview Research*. [online] Available at: < <https://guides.lib.vt.edu/researchmethods/interviews> >

Hajji, A.M. and Lewis, M.P. (2013) 'Development of Productivity-based Estimating Tool for Fuel Use and Emissions from Earthwork Construction Activities', *Journal of Construction Engineering and Project Management*, 3(2), pp. 58–65. Available at: <https://doi.org/10.6106/jcep.m.2013.3.2.058>.

Herrera, S., Cruz, C., Ramírez, Y. and Cisternas, L., (2016) 'Conceptual process design for Boric Acid: A case study for engineering education'. *Computer Aided Chemical Engineering*, pp.1437-1442.

Hill, N. *et al.* (2011) *2011 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emission Factors 2011 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting: Methodology Paper for Emission Factors Contents.*

ISO. (2018). *ISO 50001 - Energy management systems.* [online] Available at: <<https://www.iso.org/publication/PUB100400.html>>

Jassim, H.S.H. *et al.* (2020) 'A model to reduce earthmoving impacts', *Journal of Civil Engineering and Management*, 26(6), pp. 490–512. Available at: <https://doi.org/10.3846/jcem.2020.12641> .

Jassim, H.S.H., Lu, W. and Olofsson, T. (2017) 'Predicting energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of excavators in earthwork operations: An artificial neural network model', *Sustainability (Switzerland)*, 9(7). Available at: <https://doi.org/10.3390/su9071257>.

Jassim, H.S.H., Lu, W. and Olofsson, T. (2018a) 'Assessing energy consumption and carbon dioxide emissions of off-highway trucks in earthwork operations: An artificial neural network model', *Journal of Cleaner Production*, 198, pp. 364–380. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.002>.

Jassim, H.S.H., Lu, W. and Olofsson, T. (2018b) 'Quantification of energy consumption and carbon dioxide emissions during excavator operations', in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. Springer Verlag, pp. 431–453. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-91635-4\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-319-91635-4_22).

Jassim, H.S.H., Lu, W. and Olofsson, T. (2019) 'Determining the environmental impact of material hauling with wheel loaders during earthmoving operations', *Journal of the Air and Waste Management Association*, 69(10), pp. 1195–1214. Available at: <https://doi.org/10.1080/10962247.2019.1640805>.

Kecojevic, V. and Komljenovic, D. (2011) *Impact of Bulldozer's Engine Load Factor on Fuel Consumption, CO<sub>2</sub> Emission and Cost, American Journal of Environmental Sciences.*

Klanfar, M., Korman, T. and Kujundžić, T. (2016) 'Fuel consumption and engine load factors of equipment in quarrying of crushed stone', *Tehnicki Vjesnik*, 23(1), pp. 163–169. Available at: <https://doi.org/10.17559/TV-20141027115647>.

Komatsu (2006), *Specifications and Application Handbook, 27th ed., Komatsu, Japan*

Ng, F., Harding, J.A. and Glass, J. (2016) 'An eco-approach to optimise efficiency and productivity of a hydraulic excavator', *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 3966–3976. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.110>.

Panas, A. and Pantouvakis, J.P. (2010) 'Comparative analysis of operational coefficients' impact on excavation operations', *Engineering, Construction and Architectural Management*, 17(5), pp. 461–475. Available at: <https://doi.org/10.1108/09699981011074565>.

Park, H. (2006) "Conceptual framework of construction productivity estimation", *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10(5), pp. 311-317. doi: 10.1007/bf02830084.

Resnik, D., (2020). *What Is Ethics in Research & Why Is It Important? - by David B. Resnik, J.D., Ph.D.* [online] National Institute of Environmental Health Sciences. Available at: <<https://www.niehs.nih.gov/research/resources/bioethics/whatis/index.cfm> >

Šopić, M. *et al.* (2021) 'Estimation of the excavator actual productivity at the construction site using video analysis', *Organization, Technology and Management in Construction*, 13(1), pp. 2341–2352. Available at: <https://doi.org/10.2478/otmcj-2021-0003>.

Trani, M.L. *et al.* (2016) 'Predicting fuel energy consumption during earthworks', *Journal of Cleaner Production*, 112, pp. 3798–3809. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.027>.

Vukovic, M., Leifeld, R. and Murrenhoff, H. (2017) 'Reducing fuel consumption in hydraulic excavators-a comprehensive analysis', *Energies*, 10(5). Available at: <https://doi.org/10.3390/en10050687>.

Yin, R., (2009). *Case study research, design and method*. 4th ed. London: Sage Publications Ltd.

Zhang, S. *et al.* (2014) 'Real-world fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions of urban public buses in Beijing', *Applied Energy*, 113, pp. 1645–1655. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.017>.

## 7. Παράρτημα Α: Γενικοί Ορισμοί

**Κανονικοποιημένη κατανάλωση καυσίμου:** Είναι η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου και μετριέται σε λίτρα ανά κυβικό μέτρο ( $l/m^3$ ).

**Ωριαία κατανάλωση καυσίμου:** Είναι η κατανάλωση καυσίμου ανά ώρα λειτουργίας του μηχανήματος και μετριέται σε λίτρα ανά ώρα ( $l/h$ ).

**Παραγωγικότητα:** Ορίζεται ως ο λόγος μεταξύ του παραγόμενου έργου και της χρονικής διάρκειας μιας εργασίας (Hajji and Lewis, 2013) και εκφράζεται σε κυβικά μέτρα ανά ώρα ( $m^3/h$ ).

**Χρόνος κύκλου:** Είναι ο χρόνος που απαιτείται για την εκσκαφή του υλικού, τη στροφή του μηχανήματος προς το φορτηγό, την εκφόρτωση του περιεχομένου του κουβά στο φορτηγό και την επιστροφή στο σημείο εκσκαφής, ώστε να ξεκινήσει ο επόμενος κύκλος. Η μονάδα μέτρησης είναι τα λεπτά (Jassim, Lu and Olofsson, 2018b).

**Συντελεστής φόρτισης (%):** Είναι η στιγμιαία φόρτιση του κινητήρα σε σχέση με τη μέγιστη ισχύ του και επηρεάζεται από παράγοντες, όπως το είδος του εδάφους και ο χρόνος χρήσης του μηχανήματος (Trani *et al.*, 2016).

**Ποσοστό χρήσης (%):** Το ποσοστό χρήσης είναι ο χρόνος που δαπανάται σε μη αδράνεια ως ποσοστό του συνολικού χρόνου εργασίας (Jassim *et al.*, 2020).

**Ωφέλιμο φορτίο κουβά:** Αντιπροσωπεύει τον πραγματικό όγκο ( $m^3$ ) του υλικού που μεταφέρει ο κουβάς του εκσκαφέα ή του φορτωτή (Jassim, Lu and Olofsson, 2017).

**Ιπποδύναμη:** Ορίζεται ως η μέγιστη ιπποδύναμη σχεδιασμού του κινητήρα του μηχανήματος και μετριέται σε kW (Jassim, Lu and Olofsson, 2018b).

**Ειδική κατανάλωση καυσίμου:** Η μάζα καυσίμου που καταναλώνεται ανά μονάδα χρόνου και μονάδα ισχύος, στη λειτουργία ενός κινητήρα υπό μέγιστη ονομαστική ισχύ. Εκφράζεται σε μονάδα ( $kg/kWh$ ) και εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του κινητήρα και τον βαθμό απόδοσης (Klanfar, Korman and Kujundžić, 2016).

## Παράρτημα Β: Ανάλυση ευαισθησίας εργοταξίου Α

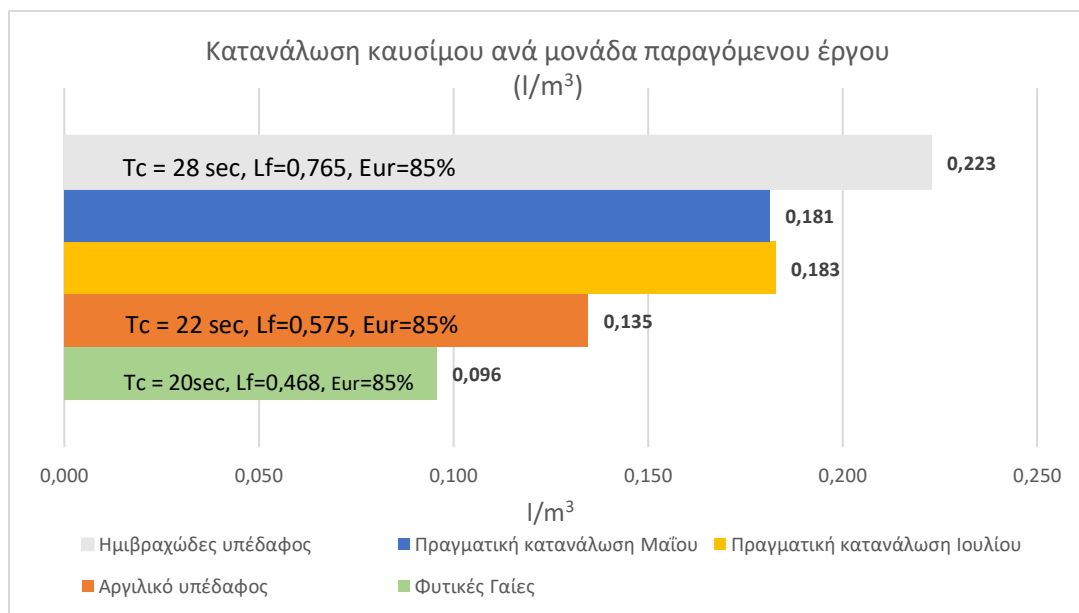
Με σκοπό την εύρεση του ποσοστού που έγιναν οι εργασίες σε αργιλικό περιβάλλον για το οποίο η εταιρεία εξακολουθεί να έχει εξοικονόμηση χρημάτων, πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας που ακολουθεί.

Συγκεκριμένα, προσδιορίστηκε η κατανάλωση ανά μονάδα παραγόμενου έργου για τις συνθήκες που περιλαμβάνει ο Πίνακας 10.

**Πίνακας 10: Μεταβλητές υπολογισμού ανάλογα με το περιβάλλον εργασιών**

Περιβάλλον	Συντελεστής φόρτισης (%)	Χρόνος κύκλου (sec)	Ποσοστό χρήσης (%)
Καθαρά ημιβραχώδες	76,5	28	85
Καθαρά αργιλικό	57,5	22	85
Φυτικών γαιών	46,8	20	85

Οι τιμές της κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου για κάθε μία από τις παραπάνω περιπτώσεις παρουσιάζονται στο Σχήμα 41.



**Σχήμα 41: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου για την ανάλυση ευαισθησίας**

Από τα δεδομένα της εταιρείας, είναι γνωστό ότι οι εργασίες αφαίρεσης φυτικών γαιών αποτέλεσαν το 20% του συνολικού προγράμματος εργασίας. Έστω ποσοστό  $X_1\%$  οι εργασίες που έγιναν σε αργιλικό περιβάλλον και  $X_2\%$  οι εργασίες που έγιναν σε ημιβραχώδες περιβάλλον.

Έτσι ώστε να έχουμε εξοικονόμηση θα πρέπει:

**Για την περίπτωση του Μαΐου:**

$$20\% * 0,096 + X_1\% * 0,135 + X_2\% * 0,223 \leq 0,181 \Rightarrow$$

$$X_1\% * 0,135 + X_2\% * 0,223 \leq 0,1618 \Rightarrow$$

$$\text{Όμως ισχύει ότι } X_2 = (0,8 - X_1), \text{ αφού } X_1 + X_2 + 0,2 = 1$$

$$0,088 * X_1 \geq 0,0166 \Rightarrow$$

$$X_1 \geq 0,189$$

**Για την περίπτωση του Ιουλίου:**

$$20\% * 0,096 + X_1\% * 0,135 + X_2\% * 0,223 \leq 0,183 \Rightarrow$$

$$X_1\% * 0,135 + X_2\% * 0,223 \leq 0,1638 \Rightarrow$$

$$\text{Όμως ισχύει ότι } X_2 = (0,8 - X_1), \text{ αφού } X_1 + X_2 + 0,2 = 1$$

Συνεπώς ισχύει ότι:

$$0,088 * X_1 \geq 0,0146 \Rightarrow$$

$$X_1 \geq 0,166$$

Έτσι, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η εταιρεία μπορεί να έχει εξοικονόμηση χρημάτων στην περίπτωση όπου οι εργασίες πραγματοποιούνται κατά ποσοστό  $X_1 \geq 18,9\%$  σε αργιλικό περιβάλλον τον μήνα Μάιο και κατά ποσοστό  $X_1 \geq 16,6\%$  σε αργιλικό περιβάλλον τον μήνα Ιούλιο. Σύμφωνα με τη συνέντευξη που έλαβε χώρα με τους υπεύθυνους του εργοταξίου, οι εργασίες πραγματοποιήθηκαν κυρίως σε αργιλικό περιβάλλον, συνεπώς είναι δεδομένο από την παρούσα ανάλυση ότι υπάρχει περιθώριο εξοικονόμησης χρημάτων για την εταιρεία της μελέτης περίπτωσης. Στο **Σχήμα 10** εξετάζεται το εύρος εξοικονόμησης χρημάτων για την εταιρεία με βάση εκτιμήσεις για τα ποσοστά  $X_1$  και  $X_2$ , δεδομένου ότι οι εργασίες έγιναν ως επί το πλείστον σε αργιλικό περιβάλλον.

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Μελέτες κατανεμημένες με βάση το μέγεθος υπολογισμού και το είδος μηχανήματος .....	14
Πίνακας 2: Μέση τιμή πυκνότητας υλικού .....	37
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά Ερπυστριοφόρου Εκσκαφέα εργοταξίου Α .....	39
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά Ισοπεδωτή Γαίων Ι1 .....	49
Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά Προωθητήρα Γαίων Π1 .....	53
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά Προωθητήρα Γαίων Π2 .....	56
Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά Ερπυστριοφόρου Εκσκαφέα Ε1 .....	58
Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά Ελαστικοφόρου Εκσκαφέα Ε3 .....	63
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά Ελαστικοφόρου Φορτωτή Φ1 .....	66
Πίνακας 10: Μεταβλητές υπολογισμού ανάλογα με το περιβάλλον εργασιών .....	85

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής μεθόδου ανάπτυξης εργασίας.....	27
Σχήμα 2: Ανάλυση παλινδρόμησης .....	40
Σχήμα 3: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα χρόνου .....	41
Σχήμα 4: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου Μαΐου 2021.....	42
Σχήμα 5: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου Ιουλίου 2021 .....	43
Σχήμα 6: Παραγωγικότητα Μαΐου & Ιουλίου 2021.....	44
Σχήμα 7: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου .....	45
Σχήμα 8: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου .....	46
Σχήμα 9: Εξοικονόμηση κόστους ενέργειας ως προς το παραγόμενο έργο .....	47
Σχήμα 10: Συνολική εξοικονόμηση κόστους ενέργειας.....	47
Σχήμα 11: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος I1 .....	49
Σχήμα 12: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος I1 .....	50
Σχήμα 13: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος I1 .....	50
Σχήμα 14: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος I2 .....	51
Σχήμα 15: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος I2 .....	51
Σχήμα 16: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος I2 .....	52
Σχήμα 17: Σύγκριση μεταξύ Ισοπεδωτή Γαιών I1 και I2 .....	53
Σχήμα 18: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Π1 .....	54
Σχήμα 19: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος Π1.....	54
Σχήμα 20: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Π1.....	55
Σχήμα 21: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Π2 .....	56
Σχήμα 22: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος Π2.....	57
Σχήμα 23: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Π2.....	57
Σχήμα 24: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E1 .....	59
Σχήμα 25: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος E1 .....	59
Σχήμα 26: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E1 .....	60
Σχήμα 27: Παραγωγικότητα μηχανήματος E1 .....	60
Σχήμα 28: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E2 .....	61
Σχήμα 29: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος E2 .....	61
Σχήμα 30: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E2 .....	62
Σχήμα 31: Παραγωγικότητα μηχανήματος E2 .....	62
Σχήμα 32: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E3.....	64
Σχήμα 33: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος E3 .....	64
Σχήμα 34: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος E3 .....	65
Σχήμα 35: Παραγωγικότητας μηχανήματος E3 .....	65
Σχήμα 36: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Φ1.....	66
Σχήμα 37: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου μηχανήματος Φ1 .....	67
Σχήμα 38: Εκπομπές CO2 ανά μονάδα παραγόμενου έργου μηχανήματος Φ1 .....	67
Σχήμα 39: Παραγωγικότητα μηχανήματος Φ1 .....	68



Σχήμα 40: Σύγκριση μεταξύ εργοταξίων του εκσκαφέα μοντέλου R500LC-7A..... 69  
Σχήμα 41: Κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενου έργου για την ανάλυση ευαισθησίας.....85

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Επίδραση μεταβλητών εισόδου στην κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας..	19
Εικόνα 2: Επίδραση μεταβλητών εισόδου στις κανονικοποιημένες εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	19
Εικόνα 3: Εκπομπές CO <sub>2</sub> τριών διαφορετικών μοντέλων εκσκαφών .....	19
Εικόνα 4: Επίδραση μεταβλητών εισόδου στην κατανάλωση και τις εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά κυβικό μέτρο μεταφερόμενων υλικών.....	20
Εικόνα 5: Επίδραση μεταβλητών εισόδου στην κατανάλωση και τις εκπομπές CO <sub>2</sub> ανά μονάδα παραγόμενου έργου των φορτωτών .....	21
Εικόνα 6: Χάρτης παραγωγικότητας ProductivE+ .....	24
Εικόνα 7: Περιβάλλον αναζήτησης Scopus .....	29
Εικόνα 8: Περιβάλλον αναζήτησης Google Scholar .....	29
Εικόνα 9: Εντοπισμός αναφορών και παραπομπών επιστημονικού άρθρου μέσω του ResearchGate.....	30
Εικόνα 10: Πυκνότητα υλικού ανάλογα με τον τύπο του εδάφους.....	36

## Κατάλογος Εξισώσεων

Εξίσωση 1: Κανονικοποιημένη κατανάλωση ενέργειας.....	35
Εξίσωση 2: Παραγωγικότητα.....	35
Εξίσωση 3: Ωφέλιμο φορτίο κουβά.....	35
Εξίσωση 4: Συντελεστής φόρτισης.....	35
Εξίσωση 5: Κανονικοποιημένη κατανάλωση καυσίμου.....	36
Εξίσωση 6: Παραγωγικότητα εργοταξίου Β.....	48