



Σχολή Θετικών επιστημών & τεχνολογίας

Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Διπλωματική Εργασία

Η καμπύλη μάθησης στην κατασκευή αποθηκών μεταλλικών ραφιών logistics σε εργοστάσια διέλασης αλουμινίου.

Νικόλαος Τσιμπρικήδης

Επιβλέπουσα Μπακατσάκη Μαρία

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2026

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

Διαχείριση Τεχνικών Έργων

Η καμπύλη μάθησης στην κατασκευή αποθηκών μεταλλικών ραφιών logistics σε
εργοστάσια διέλασης αλουμινίου.

Νικόλαος Τσιμπρικήδης

Επιβλέποντες καθηγητές

Μπακατσάκη Μαρία

Λιόλιος Άγγελος

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΕΜΠ

Καθηγητής Πανεπιστήμιου Θεσσαλίας

Μέλος ΣΕΠ

ΔΧΤ/ΣΘΕΤ ΕΑΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2026

*«Ευχαριστώ την οικογένειά μου για το χρόνο που της στέρησα και την επιβλέπουσα κυρία
Μπακατσάκη. Ευχαριστώ επίσης την εταιρεία στην οποία εργάζομαι για την παροχή των
δεδομένων που χρειάστηκαν για την εκπόνηση της εργασίας»*

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη μελέτη του φαινομένου της μάθησης συνεργείων σε τεχνικά έργα σχετικά με τη συναρμολόγηση και ανέγερση μεταλλικών ραφιών (κελιών) για ρομποτικές αποθήκες σε εργοστάσια διέλασης αλουμινίου. Μελετήθηκε ο χρόνος που χρειάζεται το συνεργείο για την κατασκευή του έργου. Από τη μελέτη προκύπτει ότι για την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων εργασιών για την παραγωγή ίδιων μονάδων, ο χρόνος που απαιτείται συνεχώς μειώνεται στα πρώτα στάδια του έργου μέχρις ότου σταθεροποιηθεί σε μία τιμή από την οποία οι αποκλίσεις πλέον είναι μικρές.

Τα δεδομένα εξετάστηκαν με τη χρήση διαφορετικών μοντέλων της καμπύλης μάθησης. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η ανέγερση των ραφιών δεν είναι μια τυποποιημένη εργασία και ότι τα συνεργεία προχωρούν γρηγορότερα με την πάροδο του χρόνου. Μάλιστα φτάνουν στη σταθεροποίηση, δηλαδή σε ένα σημείο πέρα από το οποίο δεν φαίνεται να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη παραγωγικότητα.

Επόμενη μελέτη που θα είχε ερευνητικό ενδιαφέρον θα ήταν η πρόβλεψη του χρόνου εκτέλεσης των εργασιών ανάλογα με τη διαφοροποίηση της αποθήκης όσον αφορά το ύψος και τις διαστάσεις των ραφιών.

Λέξεις – Κλειδιά

Παραγωγικότητα, Επαναλαμβανόμενες εργασίες σε τεχνικά έργα, Καμπύλες μάθησης, αποθήκες μεταλλικών ραφιών.

Abstract

This thesis deals with the study of the phenomenon of learning of a crew in technical projects regarding the assembly and erection of metal shelves (cells) for robotic warehouses in aluminum extrusion factories. The time required by the crew to complete the project was studied. The study shows that for the execution of repetitive tasks for the production of the same units, the time required is constantly reduced in the early stages of the project until it stabilizes at a value from which the deviations will now be small.

The data were examined using different learning curve models. The results show that the erection of shelves is not a standardized task and that the teams progress faster over time. In fact, they reach plateauing, that is, a point beyond which no greater productivity is achieved.

A next study that would be of research interest would be the prediction of the execution time of the tasks depending on the differentiation of the warehouse in terms of the height and dimensions of the shelves.

Keywords

Productivity, Repetitive tasks in technical projects, Learning curves, metal shelving warehouses.

Περιεχόμενα

Περίληψη	iv
Abstract	v
Περιεχόμενα	vi
Κατάλογος Εικόνων	x
Κατάλογος Σχημάτων	x
Κατάλογος Πινάκων	xi
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια	xii
1 Εισαγωγή	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	1
1.2 Περιγραφή του προβλήματος και αναγκαιότητα της έρευνας.....	2
1.3 Πρωτοτυπία.....	2
1.4 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας	3
1.5 Ερευνητικά ερωτήματα.....	4
1.6 Μεθοδολογική προσέγγιση της έρευνας.....	4
1.7 Δομή της διπλωματικής εργασίας.....	5
1.8 Περιορισμοί και παραδοχές της έρευνας	5
2 Ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας	7
2.1 Αντικείμενο του κεφαλαίου	7
2.2 Ο όρος παραγωγικότητα στον κλάδο των κατασκευών.....	7
2.3 Το φαινόμενο της μάθησης	9
2.4 Το φαινόμενο του πλατό (plateauing) (Thomas et. al., 1986).....	11
2.5 Κυριότερα μαθηματικά μοντέλα καμπυλών μάθησης.....	12

2.5.1	Μοντέλο του Wright.	13
2.5.2	Το μοντέλο του Crawford (Unit Model)	14
2.5.3	Το μοντέλο Stanford "B"	15
2.5.4	Το κυβικό μοντέλο	16
2.5.5	Το Βαθμωτό μοντέλο	17
2.5.6	Εκθετικό Μοντέλο (Νορβηγικό Ινστιτούτο).....	19
2.6	Άλλα μοντέλα καμπύλων μάθησης.....	19
2.6.1	Plateau Model	19
2.6.2	Το μοντέλο Dejong	20
2.6.3	Το μοντέλο S curve	20
2.6.4	Το μοντέλο του Knecht	21
2.7	Τύποι δεδομένων της καμπύλης μάθησης	21
2.7.1	Δεδομένα μονάδας (Unit data).....	22
2.7.2	Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου (Cumulative average data)	23
2.7.3	Δεδομένα κινητού μέσου όρου (Moving average data).....	23
2.7.4	Δεδομένα σταθμισμένου κινητού μέσου όρου (Weighted Moving Average)	23
2.7.5	Δεδομένα εκθετικού μέσου όρου (Exponential Weighted Moving Average).....	24
2.8	Συμπεράσματα του κεφαλαίου	25
3	Η ερευνητική μεθοδολογία.....	26
3.1	Αντικείμενο του κεφαλαίου	26
3.2	Βήματα της έρευνας.....	26
3.2.1	Προσδιορισμός ερευνητικού προβλήματος	26
3.2.2	Σκοπός της έρευνας.....	27

3.2.3	Ανασκόπηση σχετικής βιβλιογραφίας.....	27
3.2.4	Ερευνητικός σχεδιασμός μελέτης περίπτωσης (case study) και μέθοδος συλλογής δεδομένων	28
3.2.5	Καθορισμός κατασκευαστικών δραστηριοτήτων	28
3.2.6	Επιλογή των μοντέλων καμπύλης μάθησης.....	28
3.3	Σύνοψη κεφαλαίου.....	30
4	Η διαδικασία συναρμολόγησης και ανέγερσης των μεταλλικών ραφιών και ο υπολογισμός της καμπύλης μάθησης	32
4.1	Αντικείμενο του κεφαλαίου	32
4.2	Περιγραφή των εργασιών ανέγερσης.....	32
4.2.1	Παραλαβή και προετοιμασία υλικών στο χώρο.....	34
4.2.2	Τοποθέτηση κολώνων και αποστατών	35
4.2.3	Τοποθέτηση οριζόντιων αποστατών	36
4.2.4	Τοποθέτηση διαγώνιων αποστατών	36
4.2.5	Τοποθέτηση πελμάτων και πλαστικών πλακιδίων	36
4.2.6	Έλεγχος Κατακορυφότητας και τετραγωνισμού.....	36
4.2.7	Τελικό σφίξιμο μπουλονιών	37
4.2.8	Έλεγχοι Ποιότητας και Ασφάλειας.....	37
4.2.9	Ανύψωση.....	37
4.2.10	Συναρμολόγηση και σύσφιξη	37
4.2.11	Χωροβάτηση και έλεγχος καθετότητας με την αξονική του αυτόματου γερανού	37
4.2.12	Τοποθέτηση ραγών (γερανοτροχιές) αυτόματου γερανού	37
4.2.13	Τοποθέτηση αυτόματου γερανού	38
4.2.14	Ηλεκτρολογική σύνδεση.....	40

4.3	Ανάλυση των αριθμητικών δεδομένων των έργων	40
4.3.1	Έργο 1	41
4.3.2	Έργο 2	48
4.4	Ανάλυση μοντέλων καμπύλης μάθησης	57
4.5	Σύνοψη κεφαλαίου.....	58
5	Συμπεράσματα.....	59
5.1	Αντικείμενο του κεφαλαίου	59
5.2	Ανασκόπηση της διπλωματικής εργασίας.....	59
5.3	Συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας	59
5.4	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	61
Βιβλιογραφικές Αναφορές		63
Ξενόγλωσσες		63
Ελληνικές.....		65

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Αποθήκη από μεταλλικά ράφια σε εργοστάσιο διέλασης αλουμινίου	27
Εικόνα 2. Στάδιο συναρμολόγησης και ανέγερσης των ραφιών.....	33
Εικόνα 3. Ο αυτόματος γερανός	39
Εικόνα 4. Έργο 1. Συναρμολόγηση των πλαισίων.....	41
Εικόνα 5. Έργο 1. Ανύψωση και σύσφιξη νέου πλαισίου.....	42
Εικόνα 6. Έργο 1. Λίγο πριν την ολοκλήρωση.	42
Εικόνα 7. Έργο 2. Συναρμολόγηση πλαισίων.....	49
Εικόνα 8. Έργο 2. Ανύψωση πλαισίων.	50
Εικόνα 9. Έργο 2. Πριν την ανύψωση του αυτόματου γερανού. Ολοκλήρωση μεταλλικών κελιών.	50

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1. Τυπικές καμπύλες μάθησης (από Yelle 1979).....	9
Σχήμα 2. Γραφική απεικόνιση των φάσεων μιας καμπύλης μάθησης (από Yelle 1979)...11	
Σχήμα 3. Μορφές μοντέλων μάθησης (από Thomas et al., 1986).....	13
Σχήμα 4. Έργο 1. Δεδομένα μονάδας γραμμικό μοντέλο	45
Σχήμα 5. Έργο 1. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου	45
Σχήμα 6. Έργο 1. Σύγκριση γραμμικών μοντέλων	46
Σχήμα 7. Έργο 1.Κυβικό μοντέλο. Δεδομένα μονάδας	47
Σχήμα 8. Έργο 1. Κυβικό μοντέλο. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου	47
Σχήμα 9. Έργο 1. Σύγκριση δεδομένων μονάδας και αθροιστικού μέσου όρου για το κυβικό μοντέλο	48
Σχήμα 10. Έργο 2. Γραμμικό μοντέλο. Δεδομένα μονάδας.....	53
Σχήμα 11. Έργο 2. Γραμμικό μοντέλο. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου.....	54
Σχήμα 12. Έργο 2.Σύγκριση μοντέλων δεδομένων μονάδας και αθροιστικού μέσου όρου	54
Σχήμα 13. Έργο 2. Κυβικό μοντέλο. Δεδομένα μονάδας	55

Σχήμα 14. Έργο 2.Κυβικό μοντέλο. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου	56
Σχήμα 15. Έργο 2.Σύγκριση κυβικών μοντέλων	56

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Ρυθμοί μάθησης σε σχέση με το ποσοστό εκτέλεσης της εργασίας από μηχανές (από Yelle)	10
Πίνακας 2. Οι εργασίες για κάθε έργο	34
Πίνακας 3. Αριθμός κελιών ανά ημέρα και ωρών ανά πλαίσιο για το έργο 1. Δεδομένα μονάδας	43
Πίνακας 4. Αριθμός κελιών ανά ημέρα και ωρών ανά πλαίσιο για το έργο 1. Δεδομένα αθροιστικού μέσου.....	44
Πίνακας 5. Αριθμός κελιών ανά ημέρα και ωρών ανά πλαίσιο για το έργο 2. Δεδομένα μονάδας	51
Πίνακας 6. Αριθμός κελιών ανά ημέρα και ωρών ανά πλαίσιο για το έργο 2. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου.....	52
Πίνακας 7 Έργο 1. Συντελεστής προσδιορισμού για τα 2 μοντέλα.....	57
Πίνακας 8. Έργο2. Συντελεστής προσδιορισμού για τα 2 μοντέλα.....	58

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΔΜ	Δεδομένα μονάδας
ΑΜ	Δεδομένα Αθροιστικού Μέσου Όρου (Cumulative Average data)
ΚΜΟ	Δεδομένα κινητού μέσου Όρου (Moving Average)
ΣΚΜΟ	Δεδομένα Σταθμισμένου Κινητού Μέσου Όρου (Weighted Moving Average)
ΕΣΜΟ	Δεδομένα Εκθετικά Σταθμισμένου Μέσου Όρου (Exponentially Weighted Moving Average)

1 Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Για τη μέτρηση της απόδοσης σε ένα τεχνικό έργο χρησιμοποιείται η έννοια της παραγωγικότητας. Ένας γενικός ορισμός της παραγωγικότητας είναι ο λόγος του τελικού αποτελέσματος προς τις εργατοώρες που απαιτούνται για να παραχθεί αυτό το αποτέλεσμα.

Το τελικό αποτέλεσμα μπορεί να μετριέται σε τετραγωνικά μέτρα μιας κατασκευής, κυβικά μέτρα σκυροδέματος, τόνοι μεταλλικής κατασκευής κ.τ.λ.

Στην κατασκευή τεχνικών έργων η παραγωγικότητα εξαρτάται από διάφορους παράγοντες που αφορούν το ίδιο το έργο (πολυπλοκότητα του σχεδιασμού, μέγεθος), παράγοντες που αφορούν το εργατικό δυναμικό (εμπειρία, κούραση, κίνητρα και καμπύλη μάθησης) και τέλος παράγοντες που αφορούν τη διοίκηση του έργου (διαθεσιμότητα πόρων, πρώτων υλών, εργαλείων).

Στην εργασία θα εστιάσουμε στο πώς το εργατικό δυναμικό επηρεάζει την παραγωγικότητα μέσω της καμπύλης μάθησης, δηλαδή της αύξησης της παραγωγικότητας όταν εκτελούνται επαναλαμβανόμενες εργασίες τις οποίες τα συνεργεία μαθαίνουν να εκτελούν ταχύτερα και αποτελεσματικότερα (Anzanello & Fogliatto, 2011).

Στην περίπτωση επαναλαμβανόμενου όμοιου σχεδιασμού μπορεί να υπάρξει βελτίωση ως και 30% (Thomas & Sanders, 1991).

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η μεταβολή της καμπύλης μάθησης σε δύο έργα κατασκευής μεταλλικών ραφιών σε αποθήκες εργοστασίων διέλασης αλουμινίου. Οι κατασκευές αυτές αποτελούνται από μεταλλικά ράφια που απαιτούν επαναλαμβανόμενες εργασίες συναρμογής και ανέγερσης πλαισίων προσφέροντας ένα κατάλληλο πεδίο εφαρμογής της θεωρίας. Η πράξη δείχνει ότι το συνεργείο ξεκινά τις εργασίες και βελτιώνει συνεχώς την παραγωγικότητά του με την πάροδο του χρόνου, ενώ μετά από ένα χρονικό διάστημα δεν εμφανίζεται περαιτέρω πρόοδος.

1.2 Περιγραφή του προβλήματος και αναγκαιότητα της έρευνας

Κατά την κατασκευή τεχνικών έργων που περιλαμβάνουν επαναλαμβανόμενες εργασίες, παρατηρούνται συχνά διαφοροποιήσεις στο χρόνο εκτέλεσης, ιδιαίτερα στα αρχικά στάδια του έργου. Στη συναρμολόγηση μεταλλικών ραφιών, το συνεργείο καλείται να εκτελέσει όμοιες εργασίες που με την πάροδο του χρόνου εκτελούνται ταχύτερα.

Κατά το χρονικό και οικονομικό προγραμματισμό τέτοιων έργων πολλές φορές δε λαμβάνεται υπόψη η πιθανή βελτίωση της απόδοσης των συνεργείων με την πάροδο του χρόνου (Salman & Sodangi, 2025). Η μη ενσωμάτωση της καμπύλης μάθησης μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπερεκτίμηση είτε σε υποεκτίμηση του απαιτούμενου χρόνου ολοκλήρωσης του έργου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα από έργα κατασκευής δύο αποθηκών και θα γίνει προσπάθεια να εκτιμήσουμε αν εμφανίζεται το φαινόμενο της μάθησης στο έργο και κατά πόσον μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα που να είναι χρήσιμα και για μεταγενέστερα έργα.

Ιδιαίτερα στα έργα κατασκευής αποθηκών σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές δεν υπάρχει δυνατότητα χρήσης εξειδικευμένων συνεργείων. Επιπλέον για οικονομικούς λόγους επιλέγονται τοπικά συνεργεία που όμως δεν έχουν προηγούμενη εμπειρία.

1.3 Πρωτοτυπία

Η εργασία αυτή εξετάζει ένα αντικείμενο που δεν έχει απασχολήσει την υπάρχουσα βιβλιογραφία: την εφαρμογή της καμπύλης μάθησης στην κατασκευή αποθηκών μεταλλικών ραφιών logistics σε εργοστάσια διέλασης αλουμινίου. Τα δεδομένα προέρχονται από δύο πραγματικά έργα με διαφορετικό μέγεθος συνεργείου και διαφορετικές διαστάσεις αποθήκης, γεγονός που επιτρέπει μια σύγκριση στην εξέλιξη της παραγωγικότητας υπό διαφορετικές συνθήκες. Στόχος δεν είναι μόνο η επιβεβαίωση του φαινομένου της μάθησης, αλλά και το κατά πόσο τα αποτελέσματα μπορούν να αξιοποιηθούν για πιο ακριβή εκτίμηση χρόνου και κόστους σε μελλοντικά έργα του ίδιου τύπου.

1.4 Σκοπός και στόχοι της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των δεδομένων από έργα κατασκευής αποθήκης μεταλλικών ραφιών και η προσπάθεια εφαρμογής των θεωρητικών μοντέλων μάθησης.

Οι επιμέρους στόχοι της εργασίας είναι:

- η καταγραφή και ανάλυση των χρόνων εκτέλεσης επαναλαμβανόμενων εργασιών,
- η ποσοτικοποίηση του φαινομένου της μάθησης,
- η εφαρμογή και σύγκριση θεωρητικών μοντέλων καμπύλης μάθησης με πραγματικά δεδομένα,
- η εξαγωγή συμπερασμάτων που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στον προγραμματισμό και τη διαχείριση παρόμοιων τεχνικών έργων.

Η κατασκευή αποθηκών Logistics παρουσιάζει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα, καθώς η χώρα αποτελεί διαμετακομιστικό κέντρο (Kati & Thomaidou, 2021). Στο ίδιο πλαίσιο, σε ένα εργοστάσιο αλουμινίου η κατασκευή μεμονωμένων αποθηκών ετοιμού ή άβαφου προϊόντος προσδίδει ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα όσον αφορά το απόθεμα των προϊόντων αλλά και την ταχύτητα εξυπηρέτησης των παραγγελιών.

Το τελευταίο διάστημα οι μεγάλες εταιρείες διέλασης αλουμινίου έχουν κατασκευάσει ή θα κατασκευάσουν αποθήκες ετοιμού ή άβαφου προϊόντος. Στο πλαίσιο αυτό υπάρχει η ανάγκη μελέτης τέτοιων έργων με στόχο τον καλύτερο και οικονομικότερο προγραμματισμό των εργασιών. Ενδεικτικό παράδειγμα της αυξανόμενης σημασίας των αποθηκευτικών υποδομών αποτελεί η επένδυση της ALUMIL σε νέα ρομποτική αποθήκη, με στόχο την ενίσχυση της παραγωγικής και διαμετακομιστικής της ικανότητας (Οικονομικός Ταχυδρόμος, 2025). Η κατασκευή μιας τέτοιας αποθήκης ανάλογα με το μέγεθος μπορεί να διαρκέσει ως και 6 μήνες με σωστό προγραμματισμό.

Έχει παρατηρηθεί εμπειρικά η αύξηση της παραγωγικότητας του εκάστοτε συνεργείου συναρμολόγησης και ανέγερσης των μεταλλικών ραφιών με την πάροδο του χρόνου, γεγονός που σημαίνει ότι μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη η θεωρία της καμπύλης μάθησης βοηθώντας έτσι να γίνεται καλύτερος χρονικός και οικονομικός προγραμματισμός

1.5 Ερευνητικά ερωτήματα

Στη μελέτη περίπτωσης που πραγματοποιήθηκε για δύο έργα, από την ανάλυση των δεδομένων ελέγχθηκε κατά πόσο μειώνεται ο χρόνος συναρμολόγησης με την επανάληψη της εργασίας.

Εξετάστηκε αν τα θεωρητικά μοντέλα μπόρεσαν να περιγράψουν την εξέλιξη της μάθησης για το συγκεκριμένο έργο ενώ θα μελετηθεί αν μπορεί κάποιο θεωρητικό μοντέλο να προσεγγίσει καλύτερα τα δεδομένα ώστε να επιλεγεί το καταλληλότερο για μελλοντική χρήση.

1.6 Μεθοδολογική προσέγγιση της έρευνας

Η παρούσα έρευνα υλοποιήθηκε ως μελέτη σε δύο περιπτώσεις κατασκευής αποθήκης. Η επιλογή της μεθοδολογίας αυτής επιτρέπει την ανάλυση της καμπύλης μάθησης σε συγκεκριμένο πλαίσιο εργασίας, παρέχοντας πραγματικά δεδομένα. Με τη μελέτη πραγματικών υλοποιημένων έργων είναι δυνατή η παρατήρηση και καταγραφή της μεταβολής της παραγωγικότητας των εργαζομένων σε πραγματικές συνθήκες σε κάθε κατασκευαστικό έργο που μελετήθηκε, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς και τις ιδιαιτερότητες του συγκεκριμένου έργου. Θα εξεταστεί κατά πόσο τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να αξιοποιηθούν για την εφαρμογή των μοντέλων και σε άλλα παρόμοια κατασκευαστικά έργα.

Το αντικείμενο της μελέτης αφορά την κατασκευή και εγκατάσταση συστημάτων μεταλλικών ραφιών σε αποθηκευτικούς χώρους logistics εργοστασίων διέλασης αλουμινίου. Η έρευνα πραγματοποιήθηκε σε δύο έργα, με στόχο την αξιολόγηση και σύγκριση της καμπύλης μάθησης υπό διαφορετικές συνθήκες. Στο πρώτο έργο απασχολήθηκε συνεργείο δέκα (10) ατόμων, ενώ στο δεύτερο έργο το συνεργείο αποτελούνταν από πέντε (5) εργαζόμενους. Οι κύριες εργασίες που πραγματοποιήθηκαν περιλάμβαναν τη συναρμολόγηση των μεταλλικών στοιχείων των ραφιών και την ανέγερσή τους στους προκαθορισμένους χώρους της αποθήκης.

Η συλλογή δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω της αξιοποίησης των διαθέσιμων καταγραφών που έγιναν από τους προϊστάμενους και υπεύθυνους κατά τη διάρκεια των δύο έργων. Για κάθε ημέρα καταγραφόταν ο αριθμός των θέσεων που μονταρίστηκαν. Τα δεδομένα δεν

ήταν στη ζητούμενη μορφή εργατοωρών ανά πλαίσιο, οπότε έγιναν οι απαραίτητες αναγωγές με βάση τον αριθμό ατόμων του συνεργείου και τις ώρες εργασίας ανά ημέρα. Επιπλέον από τη μελέτη των δεδομένων προέκυψαν διαφορές, καθώς τα δύο έργα παρουσίαζαν διαφορετικό βαθμό δυσκολίας λόγω του διαφορετικού ύψους των δύο αποθηκών.

Για την ανάλυση επιλέχθηκαν δύο μοντέλα μάθησης από αυτά που μελετήθηκαν στη βιβλιογραφία για κατασκευαστικά έργα: το μοντέλο του Wright και το κυβικό μοντέλο. Τα δεδομένα εξετάστηκαν και ως δεδομένα μονάδας και ως δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου. Για τη σύγκριση της απόδοσης των μοντέλων χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσω πινάκων και διαγραμμάτων στο Κεφάλαιο 4.

1.7 Δομή της διπλωματικής εργασίας

- Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή
- Κεφάλαιο 2: Θεωρητικό πλαίσιο και καμπύλη μάθησης
- Κεφάλαιο 3: Μεθοδολογία και περιγραφή μελέτης περίπτωσης
- Κεφάλαιο 4: Ανάλυση αποτελεσμάτων
- Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και προτάσεις

1.8 Περιορισμοί και παραδοχές της έρευνας

Παρότι καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια για την υλοποίησή της, η εργασία παρουσιάζει περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Ένα σημαντικό θέμα που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι ο περιορισμένος αριθμός έργων που μελετήθηκαν (δύο έργα συνολικά) πράγμα που αποτελεί έναν σημαντικό περιορισμό της γενίκευσης των συμπερασμάτων. Ενώ τα δεδομένα που συλλέχθηκαν παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τις συγκεκριμένες περιπτώσεις, ο μικρός αριθμός παρατηρήσεων δεν επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν ευρέως σε όλο το φάσμα των παρόμοιων βιομηχανικών έργων. Μια ευρύτερη μελέτη με περισσότερα έργα θα μπορούσε να επιβεβαιώσει ή να διαφοροποιήσει τα ευρήματα αυτής της εργασίας.

Επιπλέον, τα δύο έργα κατασκευάστηκαν κάτω από διαφορετικές συνθήκες δύο διαφορετικών εργοστασίων διέλασης αλουμινίου, γεγονός που επηρεάζει άμεσα την εφαρμογή των αποτελεσμάτων σε άλλα βιομηχανικά περιβάλλοντα. Κάθε εργοστάσιο, ειδικά όταν μιλάμε για έργα που γίνονται όχι μόνο στον ελληνικό χώρο αλλά και στο εξωτερικό, έχει τις ιδιαιτερότητες του όπως ο χώρος εργασίας, οι διαστάσεις της αποθήκης, η διάταξη των υπάρχοντων εγκαταστάσεων, οι περιβαλλοντικές συνθήκες (θερμοκρασία, φωτισμός, θόρυβος). Όλα τα παραπάνω μαζί με τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του εργοστασίου για την τοποθέτηση των ραφιών, δημιουργούν ένα μοναδικό πλαίσιο εργασίας. Αυτό σημαίνει ότι τα αποτελέσματα της έρευνας ενδέχεται να διαφοροποιούνται σε διαφορετικά εργοστάσια ή σε άλλους κλάδους της βιομηχανίας, όπου οι συνθήκες εργασίας και οι τεχνικές απαιτήσεις μπορεί να είναι διαφορετικές. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας σχετικά με τη διαδικασία μάθησης και την εξέλιξη της απόδοσης μπορούν να προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες σε παρεμφερή έργα.

Τέλος, μια βασική παραδοχή που έγινε είναι ότι τα συνεργεία παρέμειναν σταθερά σε σύνθεση καθ' όλη τη διάρκεια των έργων. Στην πράξη αυτό δεν είναι πάντα εφικτό. Οι λόγοι που αλλάζουν τη σύνθεση του συνεργείου μπορεί να είναι ασθένειες, άδειες των εργαζομένων, αντικαταστάσεις ή ακόμη και κάποιο εργατικό ατύχημα. Κάτι άλλο που είναι συνηθισμένο σε εργοτάξια είναι η χρήση ανειδίκευτων εργατών για διαφορετικές χρονικές περιόδους του έργου για οικονομικούς λόγους. Η αλλαγή ενός μέλους του συνεργείου, ιδιαίτερα στα πρώτα στάδια της μάθησης, μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τα δεδομένα. Στα έργα που μελετήθηκαν δεν υπήρξαν σημαντικές αλλαγές στη σύνθεση διότι υπήρχε οδηγία από τον κατασκευαστή να προσπαθήσει να κρατάει σταθερή τη σύσταση του συνεργείου με σκοπό να αποφευχθούν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αυτό όμως δεν είναι κάτι που μπορεί να εξασφαλιστεί σε όλα τα έργα.

2 Ανασκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας

2.1 Αντικείμενο του κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει η παρουσίαση της θεωρίας που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία. Θα αναφερθεί η βιβλιογραφία η οποία μελετήθηκε πριν γίνει η εφαρμογή της θεωρίας.

Θα αναφερθεί η έννοια της παραγωγικότητας στην κατασκευή. Θα εξεταστεί το πώς η διαδικασία της μάθησης έχει εφαρμογή στην κατασκευή. Θα παρουσιαστούν τα πιο διαδεδομένα μοντέλα μάθησης που έχουν αναπτυχθεί καθώς και οι τύποι των δεδομένων που χρησιμοποιούν τα μοντέλα.

2.2 Ο όρος παραγωγικότητα στον κλάδο των κατασκευών

Η παραγωγικότητα σε ένα τεχνικό έργο εκφράζεται από τη σχέση μεταξύ του αποτελέσματος που παράγεται και των πόρων που καταναλώνονται. Οι πόροι σε ένα τεχνικό έργο είναι το ανθρώπινο δυναμικό, ο εξοπλισμός, τα υλικά και ο χρόνος εκτέλεσης του έργου. Η παραγωγικότητα επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η τεχνική κατάρτιση των εργαζομένων, η ποιότητα του σχεδιασμού, η διαθεσιμότητα μηχανημάτων και υλικών, καθώς και από εξωτερικούς παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες για μεγάλα τεχνικά έργα. Η παρακολούθηση της παραγωγικότητας και ο έλεγχος πάνω στους πόρους του έργου βοηθά στην επιτήρηση του χρόνου και του κόστους του έργου.

Η παραγωγικότητα αποτελεί έναν από τους κεντρικούς παράγοντες ανταγωνιστικότητας και βιωσιμότητας στον κατασκευαστικό κλάδο. Σε αντίθεση με τη μεταποιητική βιομηχανία, όπου οι παραγωγικές διαδικασίες χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό τυποποίησης και αυτοματισμού, ο κατασκευαστικός τομέας παρουσιάζει έντονη εξάρτηση από το ανθρώπινο δυναμικό, τις συνθήκες του εργοταξίου και την πολυπλοκότητα των επιμέρους εργασιών (Thomas et al., 1986). Κατά συνέπεια, η μέτρηση και η διαχείριση της παραγωγικότητας αποκτά ιδιαίτερη σημασία τόσο για τον προγραμματισμό όσο και για τον έλεγχο του κόστους και του χρόνου υλοποίησης των έργων.

Ένα φαινόμενο που έχει παρατηρηθεί και επηρεάζει θετικά την παραγωγικότητα στις κατασκευές είναι το φαινόμενο της μάθησης μέσω εμπειρίας, το οποίο περιγράφεται μαθηματικά μέσω της καμπύλης μάθησης. Η βασική αρχή του φαινομένου αυτού συνίσταται στο ότι, καθώς ένα συνεργείο επαναλαμβάνει μια εργασία, ο χρόνος ή το κόστος που απαιτείται για κάθε επόμενη μονάδα παραγωγής μειώνεται σταδιακά, ακολουθώντας ένα προβλέψιμο και μετρήσιμο πρότυπο (Wright, 1936). Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί εμπειρικά σε πληθώρα κατασκευαστικών δραστηριοτήτων (Oglesby et al. 1989).

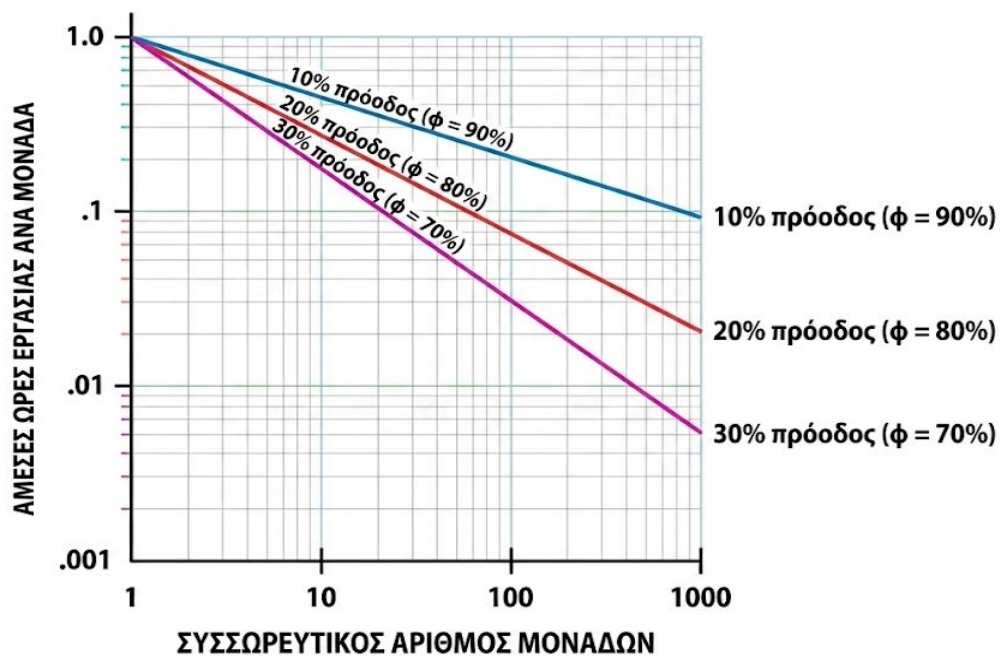
Η θεωρία της καμπύλης μάθησης διατυπώθηκε από τον Wright (1936), ο οποίος παρατήρησε ότι το μέσο κόστος εργασίας για την κατασκευή αεροσκαφών μειωνόταν κατά σταθερό ποσοστό κάθε φορά που ο σωρευτικός αριθμός παραγόμενων μονάδων διπλασιαζόταν. Η παρατήρηση αυτή οδήγησε στη διατύπωση του λεγόμενου νόμου της εμπειρίας, σύμφωνα με τον οποίο κάθε διπλασιασμός της παραγωγής συνεπάγεται μείωση του μέσου χρόνου κατά σταθερό ποσοστό, συνήθως μεταξύ 10% και 30% ανάλογα με τον τύπο της εργασίας (Teplitz, 1991).

Η μεταφορά της θεωρίας αυτής στον κατασκευαστικό κλάδο πραγματοποιήθηκε συστηματικά για πρώτη φορά μέσα από την έκθεση της Επιτροπής Ηνωμένων Εθνών για την Κατοικία, τα Κτίρια και το Σχεδιασμό (United Nations, 1965), η οποία τεκμηρίωσε εμπειρικά το φαινόμενο της επανάληψης σε κατασκευαστικές εργασίες εντός εργοταξίου. Η έκθεση αυτή, στη σύνταξη της οποίας συνέβαλε και το Νορβηγικό Ινστιτούτο Κτιριακής Έρευνας (Norges Byggeforsknings Institutt, NBI), αποτέλεσε το θεμέλιο για την ανάπτυξη εξειδικευμένων μοντέλων καμπύλης μάθησης για τις κατασκευές τις επόμενες δεκαετίες.

Καθοριστική συνεισφορά στο πεδίο αυτό αποτέλεσε η εργασία των Thomas et al. (1986), οι οποίοι δημοσίευσαν στο Journal of Construction Engineering and Management μια συστηματική αξιολόγηση πέντε μαθηματικών μοντέλων καμπύλης μάθησης, χρησιμοποιώντας 65 σύνολα πραγματικών κατασκευαστικών δεδομένων. Η έρευνά τους αποτέλεσε σταθμό στη βιβλιογραφία, καθώς κατέδειξε ότι κανένα μοντέλο δεν υπερτερεί σε όλες τις συνθήκες και ότι η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου εξαρτάται από το σκοπό της ανάλυσης, είτε αυτός είναι η προσαρμογή σε ιστορικά δεδομένα είτε η πρόβλεψη μελλοντικής απόδοσης.

2.3 Το φαινόμενο της μάθησης

Η μελέτη του Yelle (1979) αναφέρει ότι το φαινόμενο της καμπύλης μάθησης αναφέρθηκε για πρώτη φορά στη βιβλιογραφία από τον Wright το 1936. Το φαινόμενο που παρατήρησε ο Wright ήταν ότι καθώς ο αριθμός των παραγόμενων μονάδων διπλασιάζεται, ο αριθμός των άμεσων ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή μιας μεμονωμένης μονάδας μειώνεται με ομοιόμορφο ρυθμό. Ο ομοιόμορφος ρυθμός (π.χ., 90 τοις εκατό, 80 τοις εκατό, 70 τοις εκατό, κ.λπ.) μάθησης είναι ιδιαίτερος για τη διαδικασία παραγωγής που παρατηρείται. Ορισμένες τυπικές καμπύλες μάθησης με διαφορετικούς ρυθμούς μάθησης φαίνονται στο σχήμα 1.



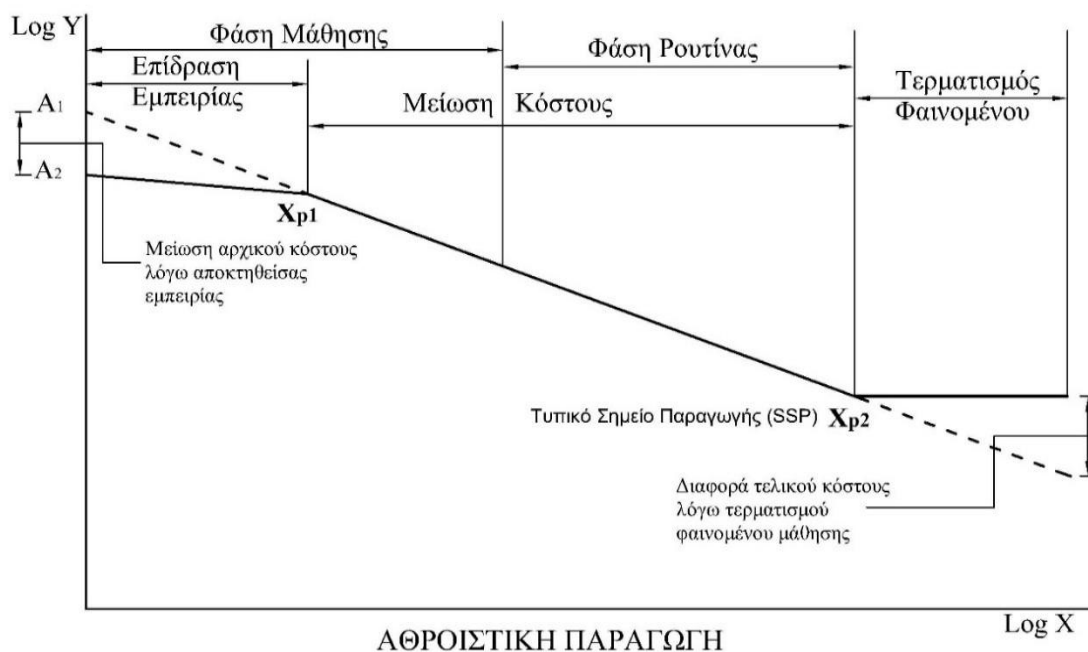
Σχήμα 1. Τυπικές καμπύλες μάθησης (από Yelle 1979)

Οι εργασίες που εκτελούνται από ανθρώπους αναμένεται ότι έχουν πολύ πιο απότομες κλίσεις από ό,τι οι λειτουργίες που ρυθμίζονται από μηχανές. Ο Hirschmann (1965) και ο Jordan (1958) εξέτασαν δεδομένα κατασκευής αεροσκαφών και εκτίμησαν ότι η αναλογία της εργασίας που ρυθμίζεται από μηχανή είχε ιστορικά επηρεάσει την κλίση της καμπύλης μάθησης κατά περίπου τον τρόπο που εμφανίζεται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Ρυθμοί μάθησης σε σχέση με το ποσοστό εκτέλεσης της εργασίας από μηχανές (από Yelle 1979)

Εργασία που εκτελείται από μηχανήματα σαν ποσοστό της συνολικής εργασίας.	Ρυθμός μάθησης	Λόγος προόδου
25%	80%	20%
50%	85%	15%
75%	90%	10%

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι σε εργασίες που εκτελούνται από ανθρώπους υπάρχει περιθώριο μεγαλύτερης βελτίωσης.



Σχήμα 2. Γραφική απεικόνιση των φάσεων μιας καμπύλης μάθησης (από Yelle 1979)

2.4 Το φαινόμενο του πλατό (plateauing) (Thomas et al., 1986)

Ένα φαινόμενο που παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τους Conway και Schultz (1959) ήταν ότι η φάση της μάθησης πολλές φορές αποτελείται από δύο φάσεις, την αρχική φάση ή φάση εκκίνησης κατά την οποία παρατηρείται ραγδαία αύξηση της μάθησης και τη δεύτερη φάση όπου η μάθηση περνάει σε μία μόνιμη κατάσταση, όπου σχεδόν παύει. Αυτό ονομάστηκε φαινόμενο πλατό. Στη συνέχεια εξερευνήθηκε λεπτομερώς από τον Baloff (1971).

Ο Baloff (1971) μελέτησε το φαινόμενο πλατό σε μηχανοποιημένες διαδικασίες παραγωγής. Η μελέτη αποτελείται από είκοσι οκτώ ξεχωριστές περιπτώσεις νέων προϊόντων και εκκινήσεων νέων διεργασιών που συνέβησαν σε πέντε ξεχωριστές εταιρείες σε τέσσερα διαφορετικά βιομηχανικά τμήματα. Ισχυρή έμφαση δόθηκε στη βιομηχανία χάλυβα. Το φαινόμενο πλατό παρατηρήθηκε σε είκοσι από τις είκοσι οκτώ περιπτώσεις.

Ο Baloff (1971) εξερεύνησε το φαινόμενο πλατό και στην εργασιακή κατασκευή. Μελετήθηκαν τρεις εργασιακές βιομηχανίες, η συναρμολόγηση αυτοκινήτων, η κατασκευή

ενδυμάτων και η παραγωγή μεγάλων μουσικών οργάνων. Στη βιομηχανία μουσικών οργάνων, μόνο το ένα έκτο των προϊόντων που μελετήθηκαν είχε μια φάση μόνιμης κατάστασης. Δεν παρατηρήθηκε καμία ένδειξη σταθεροποίησης στην κατασκευή ενδυμάτων για τις τρεις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η συναρμολόγηση αυτοκινήτων είχε σταθεροποίηση στο 75 τοις εκατό των περιπτώσεων που μελετήθηκαν.

Το γενικό συμπέρασμα από τις δύο μελέτες του Baloff είναι ότι το φαινόμενο του πλατό είναι πολύ πιο πιθανό να συμβεί σε βιομηχανίες με μηχανοποιημένες διαδικασίες παραγωγής παρά σε βιομηχανίες με εργασιακή παραγωγή. Μια πιθανή εξήγηση για αυτό είναι ότι το πλατό θα μπορούσε να σχετίζεται ισχυρά με τη διακοπή της μάθησης από την εργασία. Και, στη μηχανοποιημένη κατασκευή, αυτό είναι πιθανό να συμβεί πολύ νωρίτερα επειδή η αναλογία της εργασίας που ρυθμίζεται από μηχανή προς τη συνολική εργασία είναι πολύ υψηλότερη ενώ οι λόγοι προόδου είναι μικρότεροι.

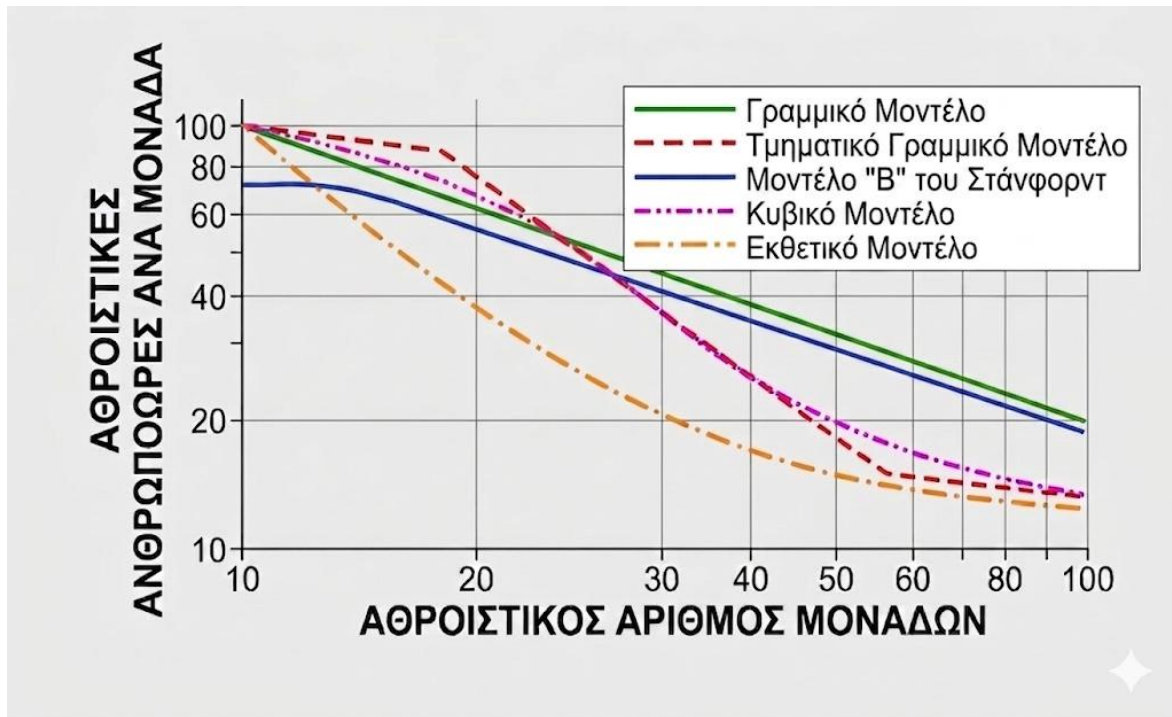
2.5 Κυριότερα μαθηματικά μοντέλα καμπυλών μάθησης

Τα μοντέλα καμπύλης μάθησης αποσκοπούν στη μέτρηση ή πρόβλεψη της βελτίωσης της παραγωγικότητας σε σύνθετες και επαναλαμβανόμενες δραστηριότητες (Jarkas, 2016).

Στη βιβλιογραφία που μελετήθηκε σχεδόν πάντα γίνεται αναφορά στο μοντέλο του Wright και το πρωτοποριακό έργο του. Οι ανάγκες της έρευνας όμως έγιναν η αιτία να αναπτυχθούν πολλά μοντέλα που το καθένα προσεγγίζει τη θεωρία και έρευνα από διαφορετική σκοπιά. Γενικά στη βιβλιογραφία αναφέρονται αρκετά μοντέλα όμως με βάση την εργασία του Thomas et al. (1986) τα βασικότερα που προτάθηκαν από τον ίδιο είναι τα παρακάτω:

- Το μοντέλο του Wright που στην εργασία του ο Thomas το αναφέρει και σαν ευθύγραμμο μοντέλο.
- Το μοντέλο Stanford B.
- Το κυβικό μοντέλο.
- Τμηματικό – βαθμωτό μοντέλο.
- Εκθετικό μοντέλο (από το Νορβηγικό Ινστιτούτο Κτιριακών Ερευνών).

Στο σχήμα 3 (Thomas et al., 1986) εμφανίζεται η μορφή που έχει η καμπύλη μάθησης ανάλογα με το μοντέλο



Σχήμα 3. Μορφές μοντέλων μάθησης (από Thomas et al., 1986)

2.5.1 Μοντέλο του Wright.

Το μοντέλο του Wright αποτελεί το πρώτο και πιο διαδεδομένο μοντέλο καμπύλης μάθησης (Wright, 1936, Yelle, 1979). Το φαινόμενο που παρατήρησε ο Wright (1936) ήταν ότι καθώς ο αριθμός των παραγόμενων μονάδων διπλασιάζεται, ο αριθμός των άμεσων ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή μιας μεμονωμένης μονάδας μειώνεται με ομοιόμορφο ρυθμό. Ο ρυθμός αυτός αποτελεί την κλίση της καμπύλης μάθησης.

Ο μαθηματικός τύπος του μοντέλου δίνεται από τη σχέση (1)

$$Y = K \times X^n \quad (1)$$

όπου

- Y = Ο αριθμός των ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή της X -οστής μονάδας.

- K = Ο αριθμός των ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή της πρώτης μονάδας.
- X = Ο αθροιστικός αριθμός μονάδας.
- $n = \frac{\log \varphi}{\log 2}$ Ο δείκτης μάθησης.
- φ ο ρυθμός μάθησης.
- $1-\varphi$, ο λόγος προόδου.

Το μοντέλο του Wright είναι ιδιαίτερα δημοφιλές λόγω της απλότητάς του και της ικανότητάς του να προσαρμόζεται σε πολλά σύνολα δεδομένων (Badiru, 1992). Όταν αναπαρίσταται σε λογαριθμική κλίμακα, η καμπύλη μετατρέπεται σε ευθεία γραμμή, για αυτό και ονομάζεται και ευθύγραμμο ή γραμμικό μοντέλο. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία αεροσκαφών, την αμυντική βιομηχανία και σε άλλους τομείς όπου υπάρχει επαναληπτική παραγωγή.

Το κύριο μειονέκτημα του μοντέλου του Wright είναι ότι θεωρεί ότι η μάθηση συνεχίζεται χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το φαινόμενο της σταθεροποίησης, κάτι που δεν είναι ρεαλιστικό στην πράξη, καθώς υπάρχει ένα ελάχιστο όριο χρόνου που απαιτείται για την εκτέλεση οποιασδήποτε εργασίας (Jaber, 2006).

Η λογαριθμική μορφή του τύπου του Wright δίνεται από τη σχέση (2)

$$\log Y = \log K + n(\log X) \quad (2)$$

2.5.2 Το μοντέλο του Crawford (Unit Model)

Ο J.R. Crawford ανέπτυξε το Unit Learning Curve Model το 1944, το οποίο εστιάζει στο χρόνο ή το κόστος κάθε επιμέρους μονάδας παραγωγής αντί για το μέσο όρο (Crawford, 1944). Ο Crawford διαπίστωσε τη δυσκολία υπολογισμού του κόστους μεμονωμένων μονάδων από το μοντέλο μέσου όρου του Wright και πρότεινε μια εναλλακτική προσέγγιση.

Ο μαθηματικός τύπος του μοντέλου δίνεται από τη σχέση (3)

$$Y = A \times X^n \quad (3)$$

Όπου

- Y = Ο αριθμός των άμεσων ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή της X -οστής μονάδας
- A = Ο αριθμός των άμεσων ωρών εργασίας ή κόστους που απαιτούνται για την παραγωγή της πρώτης μονάδας.
- X = Ο αριθμός σειράς της μονάδας στη γραμμή παραγωγής.
- $n = \frac{\log \varphi}{\log 2}$ Ο δείκτης μάθησης.
- φ ο ρυθμός μάθησης.
- $1 - \varphi$ ο λόγος προόδου.

Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων έγκειται στην ερμηνεία της μεταβλητής Y . Στο μοντέλο του Wright, το Y αναφέρεται στο μέσο χρόνο για τις πρώτες X μονάδες, ενώ στο μοντέλο του Crawford αναφέρεται στο χρόνο για τη συγκεκριμένη X -οστή μονάδα. Αυτή η διαφορά οδηγεί σε διαφορετικές προβλέψεις, ιδιαίτερα για μεγάλους αριθμούς παραγωγής (Boehmke & Freels, 2017). Το μοντέλο του Crawford χρησιμοποιείται ευρέως όταν είναι διαθέσιμα δεδομένα για μεμονωμένες μονάδες (unit data) και όταν απαιτείται ακριβής εκτίμηση του κόστους συγκεκριμένων μονάδων παραγωγής. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την κοστολόγηση και τον προγραμματισμό σε περιβάλλοντα όπου κάθε μονάδα έχει ξεχωριστή σημασία.

2.5.3 Το μοντέλο Stanford "B"

Το μοντέλο του Wright για τα κατασκευαστικά έργα παρουσιάζει τον περιορισμό ότι δεν λαμβάνει υπόψη την προηγούμενη εμπειρία του εργαζομένου. Έτσι λοιπόν από το υπουργείο άμυνας των ΗΠΑ αναπτύχθηκε ένα νέο μοντέλο που ονομάζεται Stanford B και συμπεριλαμβάνει τη σταθερά «B» στο μοντέλο Wright. Η σταθερά αυτή αναπαριστά την προηγούμενη εμπειρία του εργαζομένου. Ο μαθηματικός τύπος του μοντέλου δίνεται από τη σχέση (4)

$$Y = K \times (X + B)^n \quad (4)$$

Όπου

- Y = Ο αριθμός των ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή της X - στής μονάδας
- K = Ο αριθμός των ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή της πρώτης μονάδας.
- X = Ο αθροιστικός αριθμός μονάδας.
- B = η προηγούμενη εμπειρία που αποκτήθηκε για την παραγωγή ενός αριθμού μονάδων.
- n = Ο δείκτης μάθησης.

Το μοντέλο Stanford-B είναι ιδιαίτερα χρήσιμο σε καταστάσεις όπου οι εργαζόμενοι έχουν προηγούμενη εμπειρία σε παρόμοιες εργασίες ή όταν υπάρχει μεταφορά γνώσης από άλλα έργα. Έχει βρει εφαρμογή στην κατασκευαστική βιομηχανία και στον κατασκευαστικό τομέα, όπου η εμπειρία των εργαζομένων διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Ο παράγοντας B αναπαριστά την εμπειρία μετά από την κατασκευή μερικών μονάδων από τους εργαζόμενους. Η παράμετρος B μετατοπίζει την καμπύλη μάθησης προς τα κάτω (Badiru, 1992). Στην περίπτωση που το $B=0$ το μοντέλο παίρνει τη μορφή του βασικού μοντέλου του Wright (Badiru, 1992).

2.5.4 Το κυβικό μοντέλο

Το κυβικό μοντέλο καμπύλης μάθησης αναπτύχθηκε από τον Carlson το 1973 ως μια πιο ευέλικτη εναλλακτική των παραδοσιακών μοντέλων (Carlson, 1973). Ο Carlson παρατήρησε ότι τα μοντέλα Wright και Crawford, παρόλο που είναι απλά και χρήσιμα, δεν μπορούν πάντα να περιγράψουν με ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά της μάθησης, ιδιαίτερα όταν υπάρχουν αλλαγές στο ρυθμό μάθησης κατά τη διάρκεια της παραγωγής.

Το κυβικό μοντέλο εκφράζεται ως πολυώνυμο τρίτου βαθμού (κυβικό πολυώνυμο) από τη σχέση (5):

$$Y = a + bX + cX^2 + dX^3 \quad (5)$$

Όπου:

- Y = ο χρόνος ή το κόστος για την παραγωγή της X -οστής μονάδας
- X = ο αριθμός της μονάδας στη σειρά παραγωγής
- a, b, c, d = παράμετροι που προσδιορίζονται από τα πραγματικά δεδομένα

Οι συντελεστές a, b, c , και d μπορούν να είναι θετικοί ή αρνητικοί, ανάλογα με τη φύση της καμπύλης μάθησης που περιγράφουν.

Το κυβικό μοντέλο έχει ορισμένα σημαντικά πλεονεκτήματα όπως ευελιξία καθώς μπορεί να προσαρμοστεί σε πιο σύνθετα μοτίβα μάθησης που δεν ακολουθούν την απλή εκθετική μείωση των παραδοσιακών μοντέλων. Μπορεί να περιγράψει περιπτώσεις όπου ο ρυθμός της μάθησης δεν είναι σταθερός. Επειδή έχει περισσότερες παραμέτρους στην εξίσωσή του παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία προσαρμογής στα πραγματικά δεδομένα.

Το μοντέλο διατυπώνεται και με τον παρακάτω τύπο σε λογαριθμική μορφή

$$\log Y = \log a - n(\log X) + c(\log X)^2 + d(\log X)^3 \quad (6)$$

Όπου

- Y : Μοναδιαίος ή αθροιστικός μέσος χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή X μονάδων.
- X : Αριθμός των μονάδων που έχουν παραχθεί.
- a : Χρόνος που απαιτήθηκε για να παραχθεί το πρώτο προϊόν.
- $n1$: Αρχική λογαριθμική κλίση στην πρώτη μονάδα.
- c : Τετραγωνικός συντελεστής.
- d : Κυβικός συντελεστής.

2.5.5 Το Βαθμωτό μοντέλο

Το βαθμωτό μοντέλο αποτελεί μια γραμμική προσέγγιση του κυβικού μοντέλου (Thomas et al., 1986). Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2 κατά την εκκίνηση του έργου ο χρόνος εκτέλεσης παραμένει σταθερός. Η φάση αυτή αντιπροσωπεύει την περίοδο εξοικείωσης του εργατικού δυναμικού με τη νέα εργασία, κατά την οποία δεν παρατηρείται μετρήσιμη βελτίωση της παραγωγικότητας. Στη δεύτερη φάση, ο χρόνος εκτέλεσης μειώνεται γραμμικά με σταθερό

ρυθμό. Η γραμμική αυτή μείωση αποτελεί το κεντρικό χαρακτηριστικό του μοντέλου και διακρίνει το τμηματικό μοντέλο από τα εκθετικά και υπερβολικά μοντέλα, τα οποία προβλέπουν φθίνοντα ρυθμό βελτίωσης. Κατά τον Thomas et al. (1986), η φάση αυτή αντικατοπτρίζει την πραγματική περίοδο ενεργής μάθησης, κατά την οποία οι εργαζόμενοι αποκτούν εμπειρία, βελτιώνουν το συντονισμό τους και αναπτύσσουν αποδοτικότερες μεθόδους εργασίας. Στην τρίτη και τελευταία φάση, η απόδοση σταθεροποιείται στην τιμή Y_{ult} , η οποία εκφράζει το φυσικό ελάχιστο που μπορεί να επιτευχθεί για τη συγκεκριμένη εργασία. Η σταθεροποίηση αυτή οφείλεται στους φυσικούς περιορισμούς της ανθρώπινης απόδοσης και των κατασκευαστικών διαδικασιών, πέραν των οποίων δεν είναι δυνατή περαιτέρω βελτίωση χωρίς τεχνολογική αλλαγή ή αναδιοργάνωση της εργασίας.

Όπως αναφέρουν οι (Everett & Farghal, 1994), το τμηματικό μοντέλο χωρίζεται σε τρεις διακριτές φάσεις, με κάθε μια από αυτές να έχει ένα σταθερό ρυθμό μάθησης. Παρατηρώντας το σχήμα 2 αναγνωρίζουμε τις τρεις διαφορετικές φάσεις με βάση τα σημεία x_{p1} και x_{p2} .

Ο τύπος του βαθμωτού μοντέλου είναι από τη σχέση (7)

$$\log Y = \log A - n_1 * \log X - n_2 * J_1(\log X - \log x_{p1}) - n_3 * J_2 * (\log X - \log x_{p2}) \quad (7)$$

Όπου:

- Y : Μοναδιαίος ή αθροιστικός μέσος χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή X μονάδων. X : Αριθμός των μονάδων που έχουν παραχθεί.
- A : Χρόνος που απαιτήθηκε για να παραχθεί το πρώτο προϊόν.
- $n_{1,2,3}$: Κλίση της καμπύλης στο πρώτο, δεύτερο και τρίτο τμήμα αντίστοιχα.
- x_{p1} : Πρώτο σημείο όπου η κλίση αλλάζει δηλαδή το σημείο όπου ξεκινά η μάθηση.
- x_{p2} : Δεύτερο σημείο όπου η κλίση αλλάζει δηλαδή το σημείο όπου σταματά η ρουτίνα
- $J_{1,2}$: Δυναμικές μεταβλητές

2.5.6 Εκθετικό Μοντέλο (Νορβηγικό Ινστιτούτο)

Το Νορβηγικό Ινστιτούτο Κτιριακών Ερευνών (Norwegian Building Research Institute) διαπίστωσε ότι η διαδικασία απόκτησης εμπειρίας μπορεί να περιγραφεί μέσω μιας εκθετικής συνάρτησης. Με βάση τις μελέτες, έχει καθοριστεί ένας τύπος που αντιστοιχεί στον ακόλουθο κανόνα: Το μέρος του χρόνου λειτουργίας που μπορεί να μειωθεί με την απόκτηση εμπειρίας θα μειωθεί κατά το ήμισυ μετά την ολοκλήρωση του αριθμού των επαναλήψεων. Ο προτεινόμενος τύπος (8) έχει ως εξής:

$$Y = Y_{ult} + \frac{A - Y_{ult}}{2^{\frac{X}{H}}} \quad (8)$$

Όπου

- Y : Ο μέσος χρόνος (ή κόστος) ανά μονάδα για την παραγωγή X ποσότητας.
- Y_{ult} : Η «τελική» τιμή παραγωγικότητας. Είναι η τιμή στην οποία θα σταθεροποιηθεί η απόδοση μετά από μεγάλη εμπειρία (το πλατό).
- A : Ο χρόνος (ή το κόστος) της πρώτης μονάδας παραγωγής.
- X : Η αθροιστική ποσότητα παραγωγής μέχρι τη στιγμή της μέτρησης.
- H : Η ποσότητα παραγωγής στην οποία ο χρόνος ανά μονάδα έχει μειωθεί στο μισό της συνολικής αναμενόμενης βελτίωσης.

2.6 Άλλα μοντέλα καμπύλων μάθησης

2.6.1 Plateau Model

Τα μοντέλα του Wright καθώς και το Stanford B υποθέτουν μια συνεχόμενη μείωση του χρόνου ή κόστους παραγωγής σε επαναλαμβανόμενες δραστηριότητες κάτι που στην πραγματικότητα δεν ισχύει. Το συγκεκριμένο πρόβλημα λύθηκε από το μοντέλο που προτάθηκε από τον Baloff (1971) και ονομάστηκε μοντέλο Plateau. Ο μαθηματικός τύπος του μοντέλου δίνεται από τη σχέση (9)

$$Y = C + K \times (X)^n \quad (9)$$

Όπου

- Y = Ο αριθμός των άμεσων ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή της X -οστής μονάδας
- K = Ο αριθμός των άμεσων ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή της πρώτης μονάδας.
- X = Ο αθροιστικός αριθμός μονάδας.
- C = η σταθερά που αναπαριστά την απόδοση του εργαζομένου όταν φτάσει σε μια σταθερή απόδοση
- n = ο ρυθμός μάθησης

2.6.2 Το μοντέλο Dejong

Τα παραπάνω μοντέλα δεν ενσωματώνουν κάποια παράμετρο που να δίνει την επίδραση της βελτίωσης της διαδικασίας μάθησης εξαιτίας της μηχανοποίησης. Η διαδικασία ή η δραστηριότητα που περιλαμβάνει περισσότερη μηχανοποίηση οδηγεί σε μικρότερη ποσότητα μάθησης ή η περίοδος μάθησης θα είναι μικρότερη. Η διαδικασία ή η δραστηριότητα που περιλαμβάνει περισσότερη χειρωνακτική εργασία οδηγεί σε μεγαλύτερη ποσότητα μάθησης. Ο DeJong πρότεινε το μοντέλο με μια ασυμπίεστη παράμετρο που δεν μπορεί να συμπίεστεί χρονικά μέσω της μάθησης επειδή καθορίζεται από την ταχύτητα και τις προδιαγραφές των μηχανημάτων. Ο μαθηματικός τύπος του μοντέλου δίνεται από τη σχέση (10)

$$Y = A[M + (1 - M)X^n] \quad (10)$$

όπου τα Y , A , X , n είναι ίδια με το μοντέλο Wright, M είναι ο ασυμπίεστος συντελεστής που κυμαίνεται από 0 έως 1 (Hijazi et al. 1992). Στο παραπάνω μοντέλο, σε περίπτωση πλήρους μηχανοποίησης, η παράμετρος M γίνεται 1, γεγονός που σταματά εντελώς τη μάθηση ενώ αν δεν υπάρχει μηχανή η παράμετρος M παίρνει την τιμή 0 και ο τύπος ταυτίζεται με το μοντέλο του Wright.

2.6.3 Το μοντέλο S curve

Το μοντέλο αναφέρεται στην εργασία των SaravanaPrabhu και Vidjeapriya (2021).

Το μοντέλο δίνεται από τη σχέση (11)

$$Y = A[M + (1 - M)(X + B)^n] \quad (11)$$

όπου τα Y , A , X , n είναι ίδια με το μοντέλο Wright, M είναι ο ασυμπίεστος συντελεστής και B είναι η προηγούμενη εμπειρία του εργάτη. Το μοντέλο συνδυάζει την προηγούμενη εμπειρία του εργάτη και το ποσό της μηχανοποίησης που της εργασίας.

2.6.4 Το μοντέλο του Knecht

Για τη βελτίωση της ικανότητας πρόβλεψης του εκθετικού μοντέλου που προτάθηκε από το Νορβηγικό Ινστιτούτο Κτιριακών Ερευνών ο Knecht πρότεινε ένα μοντέλο μάθησης που ονομάζεται το συνδυασμένο εκθετικό λογαριθμικό γραμμικό μοντέλο. Το μοντέλο είναι ένας συνδυασμός του μοντέλου του Wright και των εκθετικών λειτουργιών.

Το μοντέλο δίνεται από τη σχέση (12)

$$Y = A(X)^n e^{cx} \quad (12)$$

Όπου Y , A , X , n είναι οι ίδιες παράμετροι με το μοντέλο του Wright και c είναι μια σταθερά που πρέπει να βρεθεί με βελτιστοποίηση ή να υποθεθεί.

2.7 Τύποι δεδομένων της καμπύλης μάθησης

Για την απεικόνιση των δεδομένων που έχουν καταγραφεί συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι δεδομένων.

- Τα δεδομένα μονάδας (Unit data).
- Τα δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου (Cumulative Average data).
- Δεδομένα κινητού μέσου όρου (Moving Average)
- Δεδομένα σταθμισμένου μέσου όρου (Weighted Moving Average)
- Δεδομένα εκθετικά σταθμισμένου μέσου όρου (Exponentially Weighted Moving Average)

Τα μαθηματικά μοντέλα καμπύλης μάθησης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη του χρόνου ή του κόστους που απαιτείται για την εκτέλεση μελλοντικών κύκλων

σε μια επαναλαμβανόμενη κατασκευαστική δραστηριότητα. Ο αναλυτής έχει τη δυνατότητα επιλογής μεταξύ διαφόρων μεθόδων αναπαράστασης των δεδομένων, συνήθως κάνοντας ανταλλαγή μεταξύ απόκρισης και σταθερότητας των πληροφοριών πρόβλεψης. Παραδοσιακά, τα δεδομένα καμπύλης μάθησης έχουν αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας είτε δεδομένα μονάδας είτε δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου. Στη βιβλιογραφία οι καμπύλες μάθησης έχουν μελετηθεί τόσο με δεδομένα μονάδας όσο και με δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου (Gates & Scarpa, 1972). Στην εργασία των Everett και Farghal (1997) αξιολογήθηκαν αυτές οι δύο μέθοδοι και άλλες δύο τεχνικές: ο κινητός μέσος όρος και ο εκθετικά σταθμισμένος μέσος όρος. Για 54 κατασκευαστικές δραστηριότητες που αξιολογήθηκαν, τα δεδομένα μονάδας δίνουν την πιο ακριβή πρόβλεψη του χρόνου ή του κόστους ολοκλήρωσης των υπόλοιπων κύκλων της δραστηριότητας. Τα δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου δίνουν τη λιγότερο ακριβή πρόβλεψη. Σε σύγκριση με τα δεδομένα μονάδας, ο εκθετικά σταθμισμένος μέσος όρος μπορεί να προβλέψει τη μελλοντική απόδοση με μόνο μια μικρή απώλεια ακρίβειας νωρίς στη δραστηριότητα, αλλά ίση ακρίβεια αργότερα στη δραστηριότητα. Ο εκθετικά σταθμισμένος μέσος όρος μπορεί να προσφέρει έναν βελτιωμένο συνδυασμό σταθερότητας και απόκρισης, ανάλογα με την επιλεγμένη παράμετρο εξομάλυνσης (Everett & Farghal, 1997).

2.7.1 Δεδομένα μονάδας (Unit data)

Δεδομένα μονάδας για απεικόνιση μοντέλου καμπύλης μάθησης ορίζονται οι μετρήσεις που έχουν συλλεχθεί ανά μονάδα (προϊόν, μηχάνημα, άτομο) σε διαδοχικά χρονικά σημεία ή δοκιμές. Στη συγκεκριμένη εργασία είναι ο χρόνος που απαιτείται για την εκτέλεση – παραγωγή συγκεκριμένου έργου σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Δίνουν τον πραγματικό χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση μιας μονάδας έργου. Έτσι είναι εμφανείς οι διακυμάνσεις σε σχέση με το χρόνο.

Τα δεδομένα μονάδας δίνουν την πιο ακριβή πρόβλεψη του χρόνου ή του κόστους ολοκλήρωσης των υπόλοιπων κύκλων της δραστηριότητας σύμφωνα με τους Everett & Farghal (1997) οι οποίοι μελέτησαν δραστηριότητες στον κατασκευαστικό κλάδο.

2.7.2 Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου (Cumulative average data)

Τα δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου ορίζονται ως ο μέσος χρόνος ή το κόστος που απαιτείται για την ολοκλήρωση όλων των μονάδων (ή κύκλων) μέχρι και τη δεδομένη μονάδα (ή κύκλο) προς τον αριθμό των μονάδων (ή κύκλων) που έχουν ολοκληρωθεί.

Ο μαθηματικός τύπος (13) που ορίζει τον αθροιστικό μέσο όρο είναι ο

$$CA_t = \frac{(Y_1 + Y_2 + \dots + Y_i)}{t} \quad (13)$$

- t = ο αριθμός μονάδας ή κύκλου,
- CA_t = ο αθροιστικός μέσος όρος στη μονάδα t (ή στον κύκλο t) και
- Y_1, Y_2, Y_i = τα αντίστοιχα δεδομένα μονάδας.

Τα δεδομένα του αθροιστικού μέσου όρου είναι μετασχηματισμένα δεδομένα που μειώνουν το θόρυβο και εξομαλύνουν τη μεταβλητότητα.

2.7.3 Δεδομένα κινητού μέσου όρου (Moving average data)

Ο κινητός μέσος όρος είναι ο μέσος χρόνος των τελευταίων μετρήσεων. Παρόλο που ο κινητός μέσος είναι ένας μέσος όρος όπως ο αθροιστικός μέσος όρος, ο κινητός μέσος αντιπροσωπεύει τα πιο πρόσφατα δεδομένα. Περισσότερα σημεία θα βοηθήσουν στην εξομάλυνση της καμπύλης (Malysz & Pem 2014). Ο τύπος που δίνει τα δεδομένα κινητού μέσου όρου για τις τελευταίες 3 μετρήσεις είναι ο (14)

$$MA_t = \frac{(Y_t + Y(t-1) + Y(t-2))}{3} \quad (14)$$

2.7.4 Δεδομένα σταθμισμένου κινητού μέσου όρου (Weighted Moving Average)

Σε αντίθεση με τον απλό κινητό μέσο όρο, όπου όλες οι τιμές έχουν την ίδια βαρύτητα, στο σταθμισμένο κινητό μέσο όρο δίνεται μεγαλύτερη σημασία στις πιο πρόσφατες τιμές. Αυτό γίνεται γιατί οι πρόσφατες παρατηρήσεις θεωρούνται συνήθως πιο σχετικές με τη μελλοντική εξέλιξη μιας τιμής. Ο μαθηματικός τύπος του σταθμισμένου κινητού μέσου όρου δίνεται παρακάτω (15)

$$WMA_t = \frac{(tY_t + (t-1)Y_{t-1} + (t-2)Y_{t-2} + \dots + Y_1)}{t + (t-1) + (t-2) + \dots + 2 + 1} \quad (15)$$

2.7.5 Δεδομένα εκθετικού μέσου όρου (Exponential Weighted Moving Average)

Τα δεδομένα εκθετικού μέσου όρου είναι ένας τύπος κινητού μέσου όρου που δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στα πρόσφατα δεδομένα σε σχέση με το σταθμισμένο κινητό μέσο όρο (WMA). Είναι από τα πιο δημοφιλή εργαλεία στην τεχνική ανάλυση και τις στατιστικές προβλέψεις, επειδή αντιδρούν πολύ πιο άμεσα στις νέες αλλαγές των τιμών. Ο εκθετικός μέσος όρος είναι ένας σταθμισμένος μέσος όρος των πιο πρόσφατων δεδομένων και του προηγούμενου μέσου όρου (Malyusz & Pem, 2014).

Ο τύπος για τον εκθετικό μέσο όρο είναι ο (16)

$$\begin{aligned} EA_t &= aY_t + (1-a)EA_{t-1} \\ EA_{t-1} &= aY_{t-1} + (1-a)EA_{t-2} \\ EA_{t-2} &= aY_{t-2} + (1-a)EA_{t-3} \\ EA_{t-3} &= aY_{t-3} + (1-a)EA_{t-4} \\ EA_t &= aY_t + a(1-a)Y_{t-1} + a(1-a)^2Y_{t-2} + a(1-a)^3EA_{t-3} \end{aligned} \quad (16)$$

όπου EA_t είναι ο εκθετικός μέσος όρος στον κύκλο t και EA_{t-1} στον κύκλο $t-1$, Y_t είναι τα δεδομένα μονάδας στον κύκλο t , και a είναι ένας συντελεστής. Εάν η τιμή του a είναι μεγαλύτερη από 0.5 τότε η επίδραση των νέων δεδομένων είναι μεγαλύτερη από των παλιότερων δεδομένων (Everett & Farghal 1997).

Στη μελέτη των Malyusz και Pem (2014) που μελέτησαν δεδομένα για κατασκευαστικό έργο με σκοπό τη μελέτη των καμπύλων μάθησης για πρόβλεψη της απόδοσης φάνηκε ότι τα δεδομένα εκθετικού μέσου όρου δίνουν μια καλύτερη πρόβλεψη για τη μελλοντική απόδοση του κατασκευαστικού έργου.

2.8 Συμπεράσματα του κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο περιεγράφηκε η διαδικασία της βιβλιογραφικής επισκόπησης. Αναφέρθηκε η έννοια της παραγωγικότητας, το φαινόμενο της μάθησης καθώς και της θεωρίας της καμπύλης μάθησης. Παρουσιάστηκαν τα κύρια μοντέλα που πρότεινε ο Thomas για τον κατασκευαστικό τομέα καθώς και άλλα μοντέλα με τις ιδιαιτερότητές τους. Τέλος παρουσιάστηκαν οι τύποι των δεδομένων που χρησιμοποιούν τα μοντέλα μάθησης.

3 Η ερευνητική μεθοδολογία

3.1 Αντικείμενο του κεφαλαίου

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο ερευνητικός σχεδιασμός, η μεθοδολογία συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, καθώς και το πλαίσιο εφαρμογής της έρευνας.

3.2 Βήματα της έρευνας

- Καθορισμός ερευνητικού προβλήματος
- Σκοπός της έρευνας
- Ανασκόπηση σχετικής βιβλιογραφίας
- Μελέτη περίπτωσης
- Μελέτη συλλογής δεδομένων
- Επιλογή των κατάλληλων μοντέλων μάθησης
- Επιλογή και περιγραφή ερευνητικών εργαλείων
- Διαδικασία συλλογής δεδομένων
- Μέθοδοι ανάλυσης δεδομένων
- Καταγραφή περιορισμών της έρευνας

3.2.1 Προσδιορισμός ερευνητικού προβλήματος

Το ερευνητικό πρόβλημα επικεντρώνεται στην ανάγκη ποσοτικοποίησης της εξέλιξης της απόδοσης των εργαζομένων κατά την εκτέλεση επαναλαμβανόμενων βιομηχανικών εργασιών, όπως η συναρμολόγηση και ανέγερση μεταλλικών ραφιών.

Στο βιομηχανικό περιβάλλον των logistics, όπου οι χρόνοι εκτέλεσης και το κόστος αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους, η κατανόηση της καμπύλης μάθησης δύναται να συμβάλει στη βελτιστοποίηση των παραγωγικών διαδικασιών.



Εικόνα 1. Αποθήκη από μεταλλικά ράφια σε εργοστάσιο διέλασης αλουμινίου

3.2.2 Σκοπός της έρευνας

Ο βασικός σκοπός της έρευνας είναι η εφαρμογή των μοντέλων μάθησης στα πραγματικά δεδομένα που έχουν καταγραφεί σε συγκεκριμένα έργα.

3.2.3 Ανασκόπηση σχετικής βιβλιογραφίας

Η ανασκόπηση της διεθνούς και ελληνικής βιβλιογραφίας παρείχε το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο, καλύπτοντας την έννοια της καμπύλης μάθησης, τα μαθηματικά και εμπειρικά της μοντέλα, καθώς και τις εφαρμογές της στον κατασκευαστικό κλάδο. Δεν υπάρχουν

αρκετές πληροφορίες για έργα συναρμολόγησης μεταλλικών ραφιών. Σκοπός είναι η εφαρμογή αντίστοιχων μεθοδολογιών της θεωρίας από άλλα κατασκευαστικά έργα σε έργα ανέγερσης ραφιών.

3.2.4 Ερευνητικός σχεδιασμός μελέτης περίπτωσης (case study) και μέθοδος συλλογής δεδομένων

Η έρευνα υλοποιείται μέσω μελέτης περίπτωσης σε κατασκευή αποθήκης σε εργοστάσια διέλασης αλουμινίου. Για τη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν καταγραφές δεδομένων από έργα κατασκευής (συναρμολόγησης και ανέγερσης) μεταλλικών ραφιών σε εργοστάσια αλουμινίου. Συλλέχθηκαν δεδομένα από δύο διαφορετικά έργα που έλαβαν χώρα σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και από διαφορετικά συνεργεία. Τα δεδομένα κατέγραφε ο εκάστοτε υπεύθυνος μηχανικός για την ανέγερση της αποθήκης.

3.2.5 Καθορισμός κατασκευαστικών δραστηριοτήτων

Για κάθε έργο οι δραστηριότητες-εργασίες που ακολουθούνται και εκτελούνται είναι συγκεκριμένες, όμοιες και επαναλαμβανόμενες και περιγράφονται στο κεφάλαιο 4.

3.2.6 Επιλογή των μοντέλων καμπύλης μάθησης

Για την περιγραφή του φαινομένου της μάθησης υπάρχουν πολλά μοντέλα όπως προέκυψε από τη μελέτη της βιβλιογραφίας. Για τις κατασκευές προτείνονται κυρίως 5 μοντέλα (Thomas et al., 1986). Από τα παραπάνω επιλέχτηκε το μοντέλο του Wright και το κυβικό μοντέλο. Το μοντέλο του Wright έχει το πλεονέκτημα της απλότητας ενώ το κυβικό μοντέλο είναι αυτό που μπορεί να προσεγγίσει καλύτερα τα πραγματικά δεδομένα λόγω των πολλών μεταβλητών του πολυωνύμου.

Το μοντέλο του Wright δίνεται από τη σχέση (17)

$$Y = K \times X^n \quad (17)$$

Όπου

- Y = Ο αριθμός των ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή της X -οστής μονάδας

- K = Ο αριθμός των ωρών εργασίας που απαιτούνται για την παραγωγή της πρώτης μονάδας.
- X = Ο αθροιστικός αριθμός μονάδας.
- $n = \frac{\log \varphi}{\log 2}$ Ο δείκτης μάθησης.
- φ ο ρυθμός μάθησης.
- $1-\varphi$, ο λόγος προόδου.

Σε λογαριθμική μορφή ο τύπος του είναι (18)

$$\log Y = \log K - n(\log X) \quad (18)$$

Επειδή σε λογαριθμική κλίμακα η σχέση σχεδιάζεται σαν ευθεία γραμμή ονομάζεται και γραμμικό μοντέλο. Επίσης είναι το μοντέλο που επιτρέπει την καλύτερη πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης παρά την απλότητά του (Thomas et al., 1986). Βασικό μειονέκτημα ότι δεν αναγνωρίζει το φαινόμενο πλατό, δηλαδή τη σταθεροποίηση της μάθησης ή το μηδενισμό του ρυθμού μάθησης.

Το δεύτερο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί είναι το κυβικό μοντέλο που περιγράφεται από τη σχέση (19)

$$Y = a + bX + cX^2 + dX^3 \quad (19)$$

Όπου:

- Y = ο χρόνος ή το κόστος για την παραγωγή της X -οστής μονάδας
- X = ο αριθμός της μονάδας στη σειρά παραγωγής
- a, b, c, d = παράμετροι που προσδιορίζονται από τα πραγματικά δεδομένα

Οι συντελεστές a, b, c , και d μπορούν να είναι θετικοί ή αρνητικοί, ανάλογα με τη φύση της καμπύλης μάθησης που περιγράφουν.

Το κυβικό μοντέλο παρουσιάζει την καλύτερη στατιστική προσαρμογή στα ιστορικά δεδομένα από όλα τα μοντέλα του Thomas (υψηλότερος συντελεστής R^2) ενώ είναι ευέλικτο και μπορεί να αποτυπώσει και μη γραμμικές τάσεις.

Και για τα δύο μοντέλα θα χρησιμοποιηθούν δεδομένα μονάδας και δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου για τη γραφική απεικόνιση των μοντέλων μάθησης.

3.3 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο πλαίσιο του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάστηκε η μελέτη περίπτωσης μέσω της οποίας διερευνήθηκε η επιρροή του φαινομένου της μάθησης στην παραγωγικότητα κατά τη συναρμολόγηση και ανέγερση μεταλλικών ραφιών για την κατασκευή αποθήκης. Αναλύθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά του υπό εξέταση έργου, τα οποία το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για την εφαρμογή της θεωρίας της καμπύλης μάθησης, καθώς η εργασία της συναρμολόγησης μεταλλικών ραφιών χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό επανάληψης ομοιογενών μονάδων, επαρκή πολυπλοκότητα και σταθερές συνθήκες εκτέλεσης προϋποθέσεις που θέτει ο Thomas (1986) για την εκδήλωση του φαινομένου της μάθησης.

Στη συνέχεια, αποτυπώθηκαν αναλυτικά τα βήματα της ερευνητικής προσέγγισης που ακολουθήθηκε, συμπεριλαμβανομένης της συλλογής και επεξεργασίας των δεδομένων παραγωγικότητας από το εργοτάξιο, όπως ο χρόνος συναρμολόγησης ανά μονάδα ραφιού, καθώς και του τρόπου εφαρμογής των επιλεγμένων μοντέλων στα δεδομένα αυτά. Για την ανάλυση του φαινομένου της μάθησης επιλέχθηκαν δύο από τα πέντε μοντέλα που πρότεινε ο Thomas (1986): το μοντέλο Wright και το Κυβικό μοντέλο. Το μοντέλο Wright επιλέχθηκε λόγω της απλότητάς του και της αποδεδειγμένης ικανότητάς του να προβλέπει αξιόπιστα τη μελλοντική εξέλιξη της παραγωγικότητας στη συναρμολόγηση των ραφιών, ενώ το Κυβικό μοντέλο αξιοποιήθηκε για την ανάλυση των ιστορικών δεδομένων του έργου, καθώς παρουσιάζει την καλύτερη στατιστική προσαρμογή στα πραγματικά δεδομένα εργοταξίου.

Τέλος, παρουσιάστηκε η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε για κάθε μοντέλο ξεχωριστά και αιτιολογήθηκαν οι λόγοι επιλογής τους, ώστε να διασφαλιστεί η συνοχή και η επιστημονική

εγκυρότητα της ερευνητικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

4 Η διαδικασία συναρμολόγησης και ανέγερσης των μεταλλικών ραφιών και ο υπολογισμός της καμπύλης μάθησης

4.1 Αντικείμενο του κεφαλαίου

Ο σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι η λεπτομερής παράθεση των εργασιών που απαιτούνται για το έργο και ο υπολογισμός των παραμέτρων για δύο μοντέλα μάθησης που θα δοκιμαστούν με τα εφαρμόζοντας τα αριθμητικά δεδομένα από τη διαδικασία ανέγερσης των μεταλλικών ραφιών. Η μελέτη θα γίνει μέσα από τη χρήση του μοντέλου μάθησης για κάθε έργο. Στη συνέχεια θα παραθέσουμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν.

4.2 Περιγραφή των εργασιών ανέγερσης

Η διαδικασία ανέγερσης των ραφιών έπεται μιας σειράς εργασιών που προηγούνται αλλά αποτελούν εργασίες που υλοποιούνται από εξειδικευμένα συνεργεία σκυροδέτησης με εμπειρία και οι οποίες δεν μας απασχολούν διότι είναι συνηθισμένες. Η μόνη ενδεχόμενη διαφορά είναι ότι απαιτείται μια ακρίβεια στη χωροβάτηση $\pm 2\text{mm}$ η οποία ίσως να προϋποθέτει περισσότερο χρόνο εργασίας για ένα απλό συνεργείο βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Στη συνέχεια των εργασιών γίνεται η τοποθέτηση των ραγών τύπου γερανотροχιάς πάνω στις οποίες θα τοποθετηθεί και θα εργάζεται το βασικό μηχάνημα της αποθήκης των μεταλλικών ραφιών, ο αυτόματος γερανός (Automatic Storage Retrieval Crane, ASRC).



Εικόνα 2. Στάδιο συναρμολόγησης και ανέγερσης των ραφιών

Τα συστήματα ραφιών κατασκευάζονται από κατακόρυφους σκελετούς (box frames), οι οποίοι συνήθως συναρμολογούνται οριζόντια στο δάπεδο ενώ στη συνέχεια ανυψώνονται στη θέση τους. Αυτό εξασφαλίζει ασφάλεια, ακρίβεια και ταχύτερη εγκατάσταση.

Κάθε αποθήκη τελικά χαρακτηρίζεται από το συνολικό αριθμό θέσεων (κελιών) που είναι διαθέσιμες σαν αποθηκευτικό χώρος. Στο κελί μπορεί να τοποθετηθεί ειδικό μεταλλικό καλάθι (μήκος:6μ, πλάτος:1μ, ύψος:0,8μ) που περιέχει προφίλ αλουμινίου όταν αναφερόμαστε στις αποθήκες αλουμινίου ή σε άλλες κατασκευές πλαστική κασέτα, πλαστική παλέτα ή ακόμη και ξύλινη παλέτα. Επομένως το δομικό στοιχείο ενός πλαισίου μπορεί να θεωρηθεί το κελί. Το πλαίσιο κατασκευάζεται από τον αριθμό κελιών που αντιστοιχούν στο συνολικό ύψος της αποθήκης σε κελιά και με πλάτος συνήθως 2 κελιών. Συναρμολογείται οριζόντια με τις κατακόρυφες κολόνες τοποθετημένες στο έδαφος και στη συνέχεια ανυψώνεται.

Πίνακας 2. Οι εργασίες για κάθε έργο

A/A	Περιγραφή έργου
1	Παραλαβή και προετοιμασία υλικών στο χώρο
2	Τοποθέτηση κολώνων
3	Τοποθέτηση οριζόντιων αποστατών
4	Τοποθέτηση διαγώνιων αποστατών
5	Τοποθέτηση πελμάτων και πλαστικών πλακιδίων
6	Έλεγχος κατακορυφότητας και τετραγωνισμού
7	Τελικό σφίξιμο μπουλονιών
8	Έλεγχοι ποιότητας και ασφάλειας
9	Ανύψωση
10	Συναρμολόγηση και σύσφιξη
11	Χωροβάτηση και έλεγχος καθετότητας με την αξονική του αυτόματου
12	Τοποθέτηση ραγών (γερανοτροχιές) αυτόματου γερανού.
13	Τοποθέτηση αυτόματου γερανού
14	Ηλεκτρολογική σύνδεση

4.2.1 Παραλαβή και προετοιμασία υλικών στο χώρο

Συνήθως για βέλτιστη εκμετάλλευση του χώρου του εργοστασίου για την κατασκευή της αποθήκης τα ράφια τοποθετούνται σε σκάμμα ως και 6 μέτρα κάτω από το επίπεδο του εδάφους όταν υπάρχει υφιστάμενο κτίριο ή όταν οι πολεοδομικοί κανόνες δεν επιτρέπουν μεγάλο ύψος κτιρίου. Επομένως οι εργασίες γίνονται στο σκάμμα και απαιτείται τα υλικά να βρίσκονται στο περιβάλλοντα χώρο.

α. Εξαρτήματα-υλικά συναρμολόγησης

- Κολώνες
- Οριζόντιοι αποστάτες
- Διαγώνιοι αποστάτες
- Βίδες, παξιμάδια, ροδέλες
- Βάσεις
- Πλαστικά πλακίδια (ολισθητήρες)

β. Οπτικός Έλεγχος Εξαρτημάτων

Ελέγχονται για:

- Παραμορφώσεις ή στραβώματα
- Αποκλίσεις στις θέσεις των οπών
- Ευθυγράμμιση και ευθύτητα κολώνων

γ. Προετοιμασία Χώρου Εργασίας

- Το δάπεδο πρέπει να είναι επίπεδο και καθαρό για να διευκολύνει τις εργασίες.
- Ξύλινοι τάκοι πάνω στους οποίους τοποθετούνται οι κολόνες.
 - ο Κλειδιά
 - ο Ηλεκτρικό κατσαβίδι χαμηλής ροπής
 - ο Γωνιές, μέτρο, αλφάδια laser
 - ο Σφιγκτήρες

4.2.2 Τοποθέτηση κολώνων και αποστατών

Οι δύο κάθετες κολόνες τοποθετούνται στο δάπεδο παράλληλα, και δένονται με τους αποστάτες στα σημεία που απαιτεί το σχέδιο ενώ ελέγχεται η απόσταση των κολώνων και η σωστή φορά τοποθέτησης.

4.2.3 Τοποθέτηση οριζόντιων αποστατών

Οι οριζόντιοι αποστάτες εξασφαλίζουν ότι οι κολώνες παραμένουν παράλληλες και σταθερές. Γίνεται η τοποθέτηση του κατάλληλου τύπου αποστατών που ορίζονται από το σχέδιο σε ευθυγράμμιση με τις τρύπες και γίνεται πρόχειρη τοποθέτηση των βιδών με ροδέλες και παξιμάδια και γίνεται ένα αρχικό σφίξιμο. Οι αποστάτες παρέχουν παράλληλη ευθυγράμμιση ενώ παράλληλα δημιουργούν σημεία σύνδεσης για τα διαγώνια χιαστά.

4.2.4 Τοποθέτηση διαγώνιων αποστατών

Οι διαγώνιοι αποστάτες τοποθετούνται για να εμποδίζουν την πλευρική ταλάντωση. Κατά τον ίδιο τρόπο τοποθετούνται σε ευθυγράμμιση με τις τρύπες και στη συνέχεια βάζουμε τις βίδες, τις ροδέλες και τα παξιμάδια για μια αρχική σύσφιξη. Οι διαγώνιοι αποστάτες αυξάνουν τη δυσκαμψία έναντι πλευρικών φορτίων και συμβάλλουν στην αντισεισμική συμπεριφορά της κατασκευής.

4.2.5 Τοποθέτηση πελμάτων και πλαστικών πλακιδίων

Τα πέλματα είναι συγκολλημένα στο εργοστάσιο και ο ρόλος τους είναι να μεταφέρουν το φορτίο στο σκυρόδεμα και να δίνουν περιθώρια ρύθμισης κατά την τελική ανύψωση. Σε αυτή τη φάση τοποθετούνται και τα πλαστικά πλακίδια – ολισθητήρες. Οι ολισθητήρες είναι πλαστικά πλακίδια από ειδικό πλαστικό υλικό που εξασφαλίζει χαμηλό συντελεστή τριβής, αντοχή στη φθορά και εύκολη αντικατάσταση. Τοποθετούνται σε αυτή τη φάση της κατασκευής όσο τα ράφια είναι χαμηλά για ευκολία και ασφάλεια.

4.2.6 Έλεγχος Κατακορυφότητας και τετραγωνισμού

Πριν γίνει το τελικό σφίξιμο, το πλαίσιο πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο. Για το λόγο αυτό μετρούνται οι διαγώνιες αποστάσεις και επαληθεύονται. Αν χρειαστεί γίνονται ρυθμίσεις και επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις μέχρι να επιτευχθεί η ζητούμενη ανοχή. Η διαδικασία είναι κρίσιμη διότι αν δεν γίνει σωστά δυσκολεύει τη συναρμολόγηση του πλαισίου όταν αυτό ανυψωθεί.

4.2.7 Τελικό σφίξιμο μπουλονιών

Όταν το πλαίσιο έχει ευθυγραμμιστεί με τις ζητούμενες ακρίβειες και ανοχές γίνεται η τελική σύσφιξη των βιδών με την απαιτούμενη ροπή. Η ροπή σύσφιξης είναι συγκεκριμένη διότι η χαλαρή σύσφιξη δίνει επικίνδυνη κατασκευή ενώ η υπερβολική σύσφιξη μπορεί να προκαλέσει καταστροφή των βιδών ή των οπών. Υπάρχει επίσης ο κίνδυνος παραμόρφωσης του πλαισίου από τη ροπή στρέψης των βιδών.

4.2.8 Έλεγχοι Ποιότητας και Ασφάλειας

Το πλαίσιο ελέγχεται για τη γεωμετρική του ακρίβεια ενώ γίνεται και οπτικός έλεγχος των συνδέσεων ώστε να υπάρχουν παντού παξιμάδια και ροδέλες.

4.2.9 Ανύψωση

Το έτοιμο πλαίσιο μεταφέρεται κοντά στο σημείο εγκατάστασης και με γερανό δένεται με ιμάντες και ανυψώνεται μέχρι να πατήσει όρθιο στις βάσεις. Εργάτης από το συνεργείο κρεμασμένος με ιμάντες ασφαλείας δένει το πλαίσιο στην υπάρχουσα κατασκευή και αρχίζει να σφίγγει βίδες για να σταθεροποιήσει πλαίσιο με την κατασκευή.

4.2.10 Συναρμολόγηση και σύσφιξη

Μετά την ανύψωση του πλαισίου και την περίδεση του με ιμάντες με τον υφιστάμενο σκελετό (για λόγους ασφαλείας) ακολουθεί η σύσφιξη του νέου πλαισίου ραφιών πάνω στον υφιστάμενο σκελετό.

4.2.11 Χωροβάτηση και έλεγχος καθετότητας με την αξονική του αυτόματου γερανού

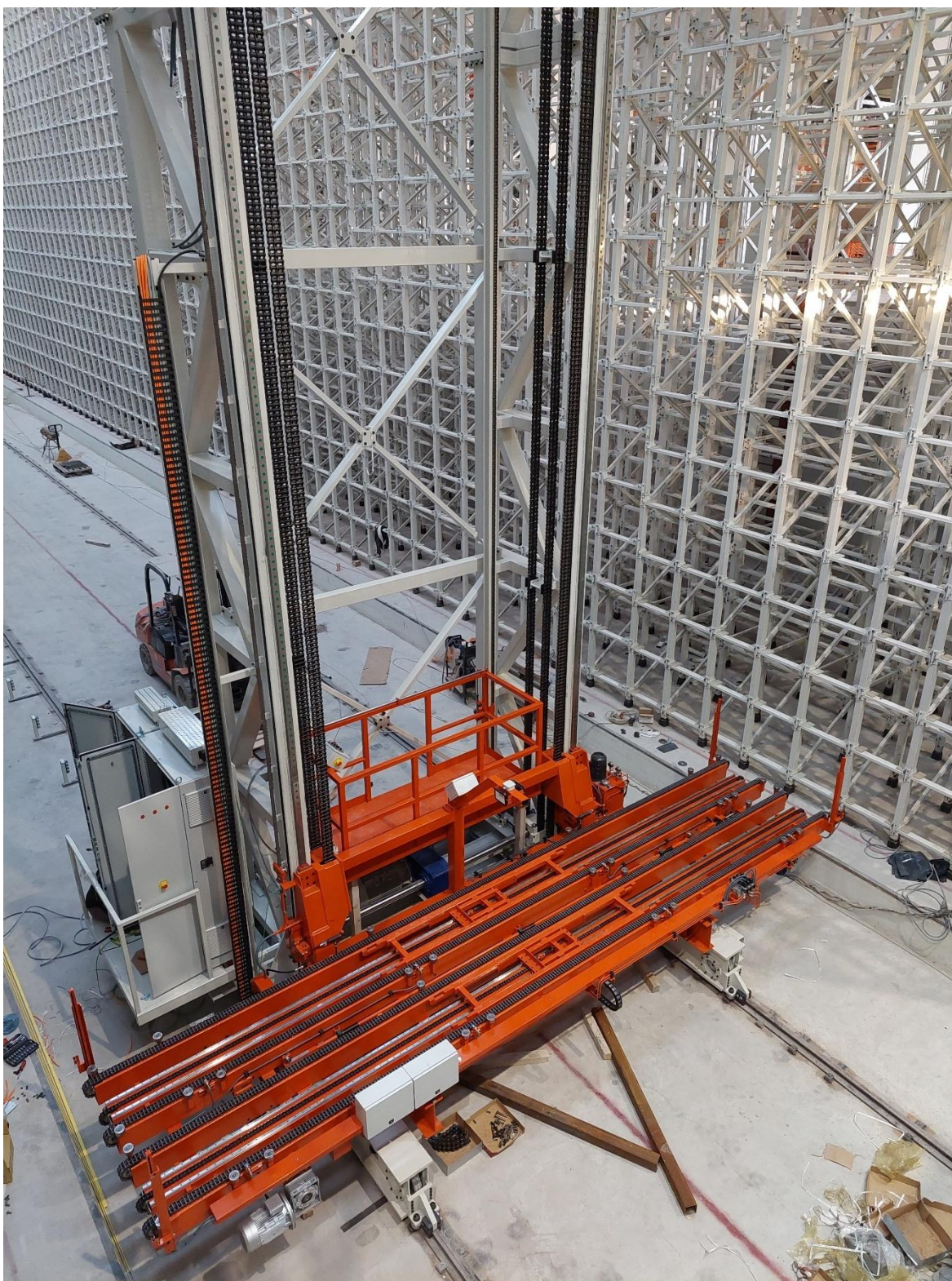
Μετά τη σύσφιξη του νέου πλαισίου πάνω στην προηγούμενη υφιστάμενη κατασκευή ακολουθεί χωροβάτηση και έλεγχος της καθετότητας του πλαισίου με την αξονική του αυτόματου γερανού.

4.2.12 Τοποθέτηση ραγών (γερανοτροχιές) αυτόματου γερανού

Τα τμήματα των ραγών τοποθετούνται πάνω στη χάραξη που έχει γίνει από τον τοπογράφο σε όλο το μήκος της αποθήκης και ελέγχεται η παραλληλότητα και το επίπεδο τους να βρίσκεται μέσα σε συγκεκριμένες προδιαγραφές. Στη συνέχεια εγκιβωτίζονται και οι βάσεις σκυροδετούνται για σταθεροποίηση.

4.2.13 Τοποθέτηση αυτόματου γερανού

Το τελικό βήμα της εγκατάστασης αφορά στη τοποθέτηση του αυτόματου γερανού πάνω στις ράγες. Αρχικά τοποθετείται ο φορέας δηλαδή η βάση του αυτόματου γερανού που φέρει τους τροχούς που κινούνται πάνω στις οριζόντιες γερανοτροχιές. Στη συνέχεια πάνω στο φορέα εγκαθίσταται το κατακόρυφο πλαίσιο, μονοκόμματο αν το ύψος του αυτόματου γερανού είναι μικρότερο από 10 μέτρα ή σε δυο τμήματα για μεγαλύτερα ύψη που τοποθετούνται σε δύο στάδια. Έπειτα πάνω στο κατακόρυφο πλαίσιο τοποθετείται το φορείο του γερανού και οι αλυσίδες ή τα συρματόσχοινα που το κινούν κατακόρυφα.



Εικόνα 3. Ο αυτόματος γερανός

4.2.14 Ηλεκτρολογική σύνδεση

Στο τέλος των μηχανολογικών εργασιών ακολουθεί τοποθέτηση των ηλεκτρικών πινάκων και η ηλεκτρική σύνδεση των επιμέρους τμημάτων του γερανού. Τοποθετούνται οι πόρτες ασφαλείας και συνδέονται όλα τα αισθητήρια.

4.3 Ανάλυση των αριθμητικών δεδομένων των έργων

Τα έργα των ρομποτικών αποθηκών διαφοροποιούνται σε κάθε πελάτη ανάλογα με τις ανάγκες του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ενώ οι διαδικασίες συναρμολόγησης να είναι ουσιαστικά οι ίδιες να προκύπτουν διαφορετικά δεδομένα διότι υπάρχει διαφορετικός αριθμός στηλών ή πιο σημαντικά διαφορετικός αριθμός ορόφων που αλλάζει τη δυσκολία των εργασιών. Επιπλέον αλλάζει και η σύνθεση του συνεργείου ποιοτικά και αριθμητικά εφόσον είτε για γεωγραφικούς είτε για οικονομικούς λόγους προτιμώνται τοπικά συνεργεία που τις περισσότερες φορές δεν έχουν την απαραίτητη εμπειρία και τεχνογνωσία. Ο τελικός σκοπός είναι να δούμε αν προκύπτουν μετρήσιμα συμπεράσματα τα οποία θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν σε μεταγενέστερα έργα.

Για το λόγο αυτό η μονάδα του έργου που έχει επιλεγεί θα είναι το πλαίσιο δύο στηλών (box frame) και οι εργατοώρες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του. Παρατηρήθηκε ότι το πλαίσιο στην αρχή κατασκευάζεται αργά. Όσο περνάνε οι πρώτες μέρες και το συνεργείο εξοικειώνεται και μαθαίνει την εργασία κάθε πλαίσιο ετοιμάζεται γρηγορότερα ως να σταθεροποιηθεί ο χρόνος που κάνει το συνεργείο για την κατασκευή του.

Η εισαγωγή των δεδομένων έγινε σε υπολογιστικό φύλλο του προγράμματος Microsoft Excel. Τα δεδομένα επεξεργάστηκαν με τη βοήθεια των έτοιμων συναρτήσεων αλλά και με εισαγωγή απαιτούμενων μαθηματικών συναρτήσεων όποτε χρειάστηκε. Ειδική αναφορά πρέπει να γίνει στο πακέτο Solver του Microsoft Excel που χρησιμοποιήθηκε για πιο σύνθετους υπολογισμούς. Άλλες χρήσιμες συναρτήσεις του Excel που χρησιμοποιήθηκαν στις επιλύσεις είναι η LINEST, RSQ κτλ.

Τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί είναι στη μορφή παραγόμενης ποσότητας έργου ανά ημέρα. Η καταγραφή κάθε ημέρας από τον προϊστάμενο του συνεργείου ή τον υπεύθυνο

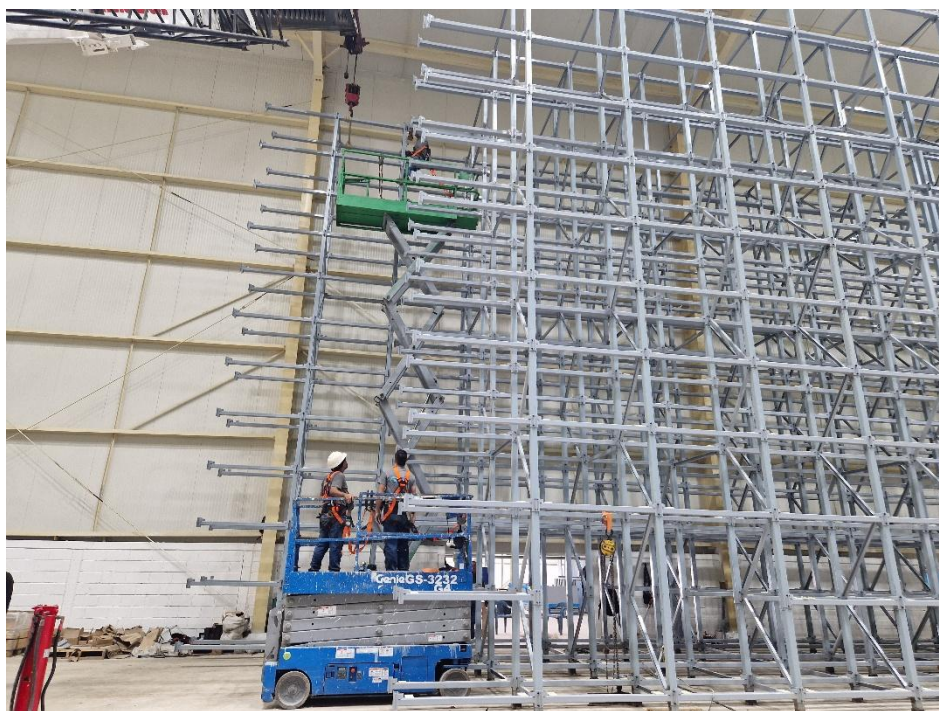
μηχανικό αφορά στον αριθμό των κελιών δηλαδή ραφιών που συναρμολογούνται αλλά όχι στις εργατοώρες ανά παραγόμενη μονάδα που έχει οριστεί και μελετήθηκε στην εργασία.

4.3.1 Έργο 1

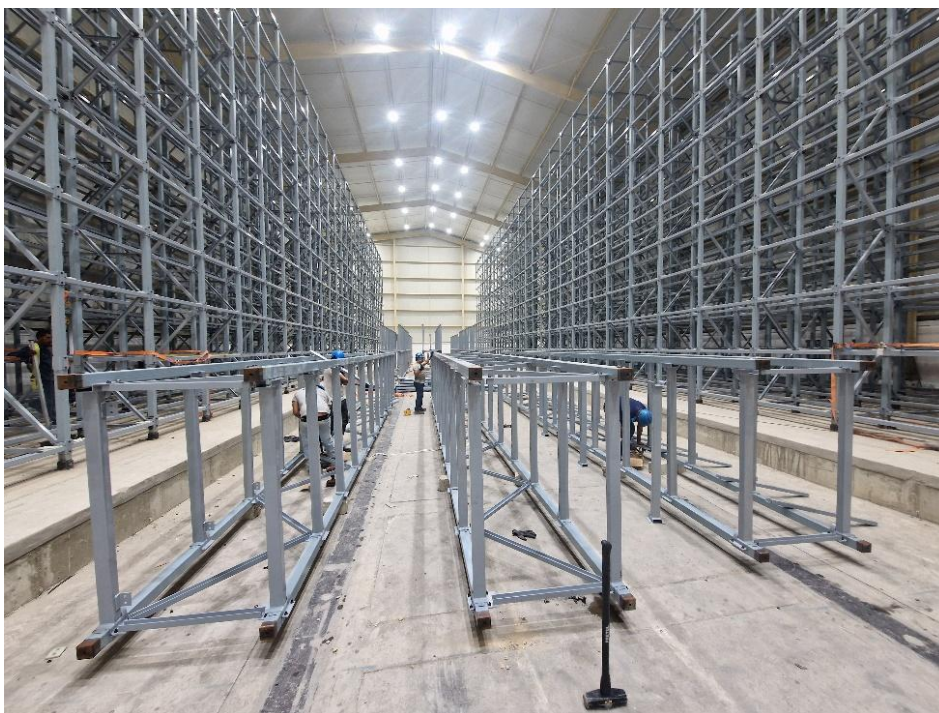
Τα δεδομένα από το έργο 1 αναφέρονται σε μια ρομποτική αποθήκη 1008 θέσεων, που αποτελείται από 84 στήλες με 12 θέσεις η κάθε στήλη. Η εγκατάσταση έλαβε χώρα στη βιομηχανία Tecnoglass στην πόλη Μπαρρανκίγια της Κολομβίας. Η δομική μονάδα του έργου ήταν ένα πλαίσιο 2 επί 12 κελιών και κατασκευάστηκαν συνολικά 42 πλαίσια. Για την εκτέλεση του έργου εργαζόταν ένα συνεργείο των 10 ατόμων. Το συνεργείο συναρμολόγησε και ανύψωσε 42 πλαίσια σε 37 ημέρες δουλεύοντας 2960 εργατοώρες.



Εικόνα 4. Έργο 1. Συναρμολόγηση των πλαισίων.



Εικόνα 5. Έργο 1. Ανύψωση και σύσφιξη νέου πλαισίου.



Εικόνα 6. Έργο 1. Λίγο πριν την ολοκλήρωση.

Στον πίνακα 3 φαίνεται η παραγωγή των κελιών ανά ημέρα και η αναγωγή στο χρόνο που θα χρειαζόταν να κατασκευαστεί ένα πλαίσιο με το ρυθμό εργασίας της κάθε ημέρας.

Πίνακας 3. Αριθμός κελιών ανά ημέρα και ωρών ανά πλαίσιο για το έργο 1. Δεδομένα μονάδας

Ημέρα	Κελιά/ημέρα	Ωρες / πλαίσιο	Ημέρα	Κελιά/ημέρα	Ωρες / πλαίσιο
1	18	106,6666667			
2	18	106,6666667	20	28	68,57142857
3	19	101,0526316	21	29	66,20689655
4	20	96	22	29	66,20689655
5	21	91,42857143	23	29	66,20689655
6	23	83,47826087	24	28	68,57142857
7	25	76,8	25	29	66,20689655
8	27	71,11111111	26	30	64
9	27	71,11111111	27	29	66,20689655
10	28	68,57142857	28	30	64
11	29	66,20689655	29	29	66,20689655
12	29	66,20689655	30	30	64
13	29	66,20689655	31	29	66,20689655
14	28	68,57142857	32	29	66,20689655
15	29	66,20689655	33	30	64
16	28	68,57142857	34	30	64
17	29	66,20689655	35	29	66,20689655
18	28	68,57142857	36	29	66,20689655
19	28	68,57142857	37	29	66,20689655

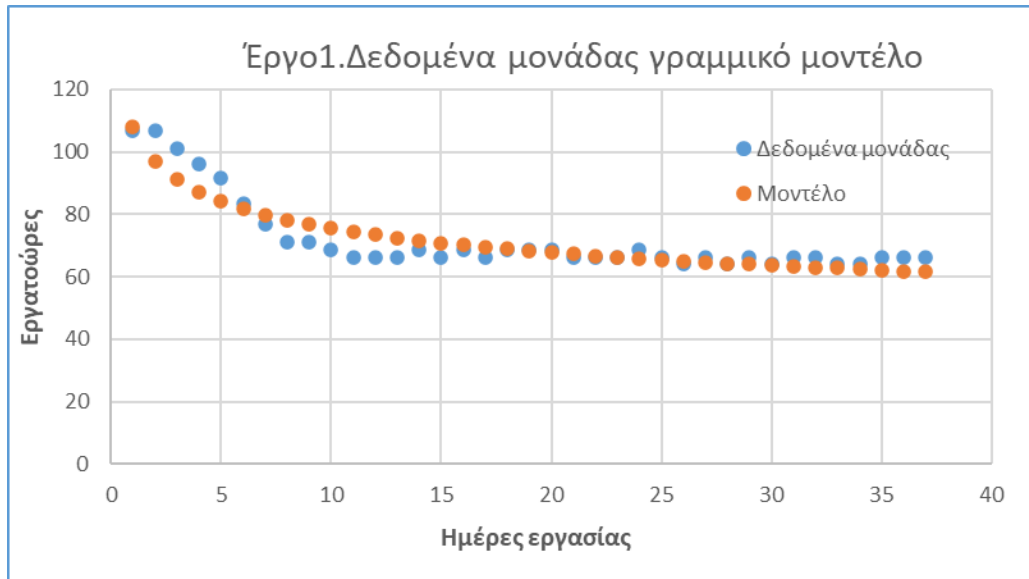
Στον πίνακα 4 εμφανίζονται τα δεδομένα που υπολογίζονται από τον αθροιστικό μέσο όρο.

Πίνακας 4. Αριθμός κελιών ανά ημέρα και ωρών ανά πλαίσιο για το έργο 1. Δεδομένα αθροιστικού μέσου.

Ημέρα	Κελιά/ ημέρα	Ώρες / πλαίσιο	Κελιά/ ημέρα (αθροιστ ικος μ.ο.)	Ώρες / πλαίσιο (αθροιστ ικος μ.ο.)	Ημέρα	Κελιά/ ημέρα	Ώρες / πλαίσιο	Κελιά/ ημέρα (αθροιστ ικος μ.ο.)	Ώρες / πλαίσιο (αθροιστ ικος μ.ο.)
1	18	106,6667	18	106,6667	20	28	68,57143	25,55	75,14677
2	18	106,6667	18	106,6667	21	29	66,2069	25,71429	74,66667
3	19	101,0526	18,33333	104,7273	22	29	66,2069	25,86364	74,2355
4	20	96	18,75	102,4	23	29	66,2069	26	73,84615
5	21	91,42857	19,2	100	24	28	68,57143	26,08333	73,61022
6	23	83,47826	19,83333	96,80672	25	29	66,2069	26,2	73,28244
7	25	76,8	20,57143	93,33333	26	30	64	26,34615	72,87591
8	27	71,11111	21,375	89,82456	27	29	66,2069	26,44444	72,60504
9	27	71,11111	22	87,27273	28	30	64	26,57143	72,25806
10	28	68,57143	22,6	84,95575	29	29	66,2069	26,65517	72,03105
11	29	66,2069	23,18182	82,82353	30	30	64	26,76667	71,73101
12	29	66,2069	23,66667	81,12676	31	29	66,2069	26,83871	71,53846
13	29	66,2069	24,07692	79,74441	32	29	66,2069	26,90625	71,35889
14	28	68,57143	24,35714	78,82698	33	30	64	27	71,11111
15	29	66,2069	24,66667	77,83784	34	30	64	27,08824	70,87948
16	28	68,57143	24,875	77,18593	35	29	66,2069	27,14286	70,73684
17	29	66,2069	25,11765	76,44028	36	29	66,2069	27,19444	70,60266
18	28	68,57143	25,27778	75,95604	37	29	66,2069	27,24324	70,47619
19	28	68,57143	25,42105	75,52795					

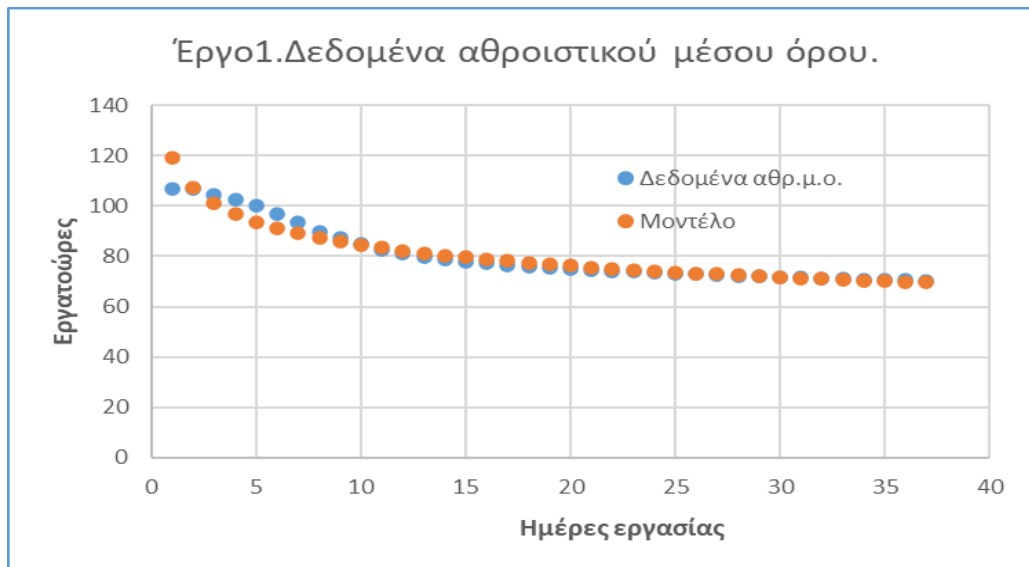
4.3.1.1 Έργο 1 γραμμικό μοντέλο

Με βάση τα στοιχεία του έργου 1 προκύπτει το σχήμα 4 όπου φαίνεται ο χρόνος σε εργατοώρες που απαιτούνται για κάθε πλαίσιο με βάση τα δεδομένα μονάδας.



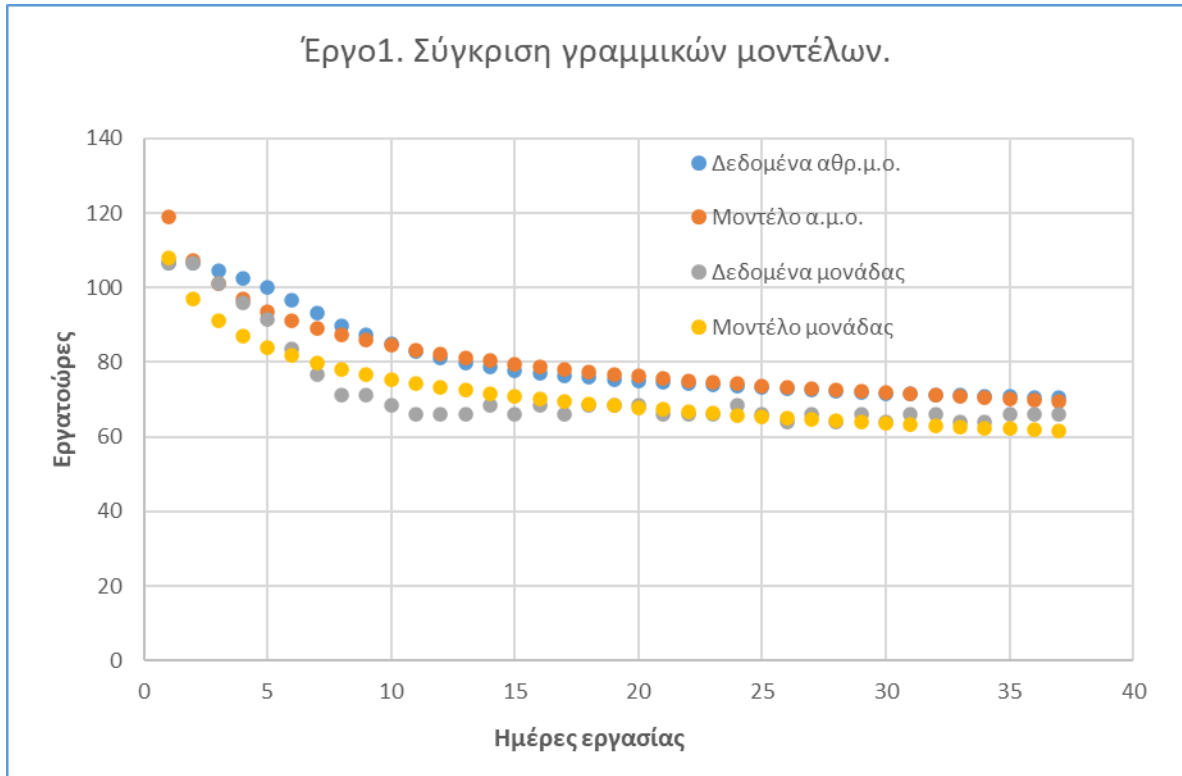
Σχήμα 4. Έργο 1. Δεδομένα μονάδας γραμμικό μοντέλο

Στο σχήμα 5 εμφανίζονται τα δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου για το γραμμικό μοντέλο.



Σχήμα 5. Έργο 1. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου

Στο σχήμα 6 παρουσιάζονται τα γραμμικά μοντέλα για τα δεδομένα μονάδας και αθροιστικού μέσου όρου.



Σχήμα 6. Έργο 1. Σύγκριση γραμμικών μοντέλων

Για τα μοντέλα αυτά υπολογίστηκε ο ρυθμός μάθησης. Για το γραμμικό μοντέλο με δεδομένα μονάδας υπολογίστηκε η τιμή του σε 0,8978 ενώ για δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου σε 0,9019.

Το μοντέλο του Wright έδωσε τον τύπο για τα δεδομένα μονάδας

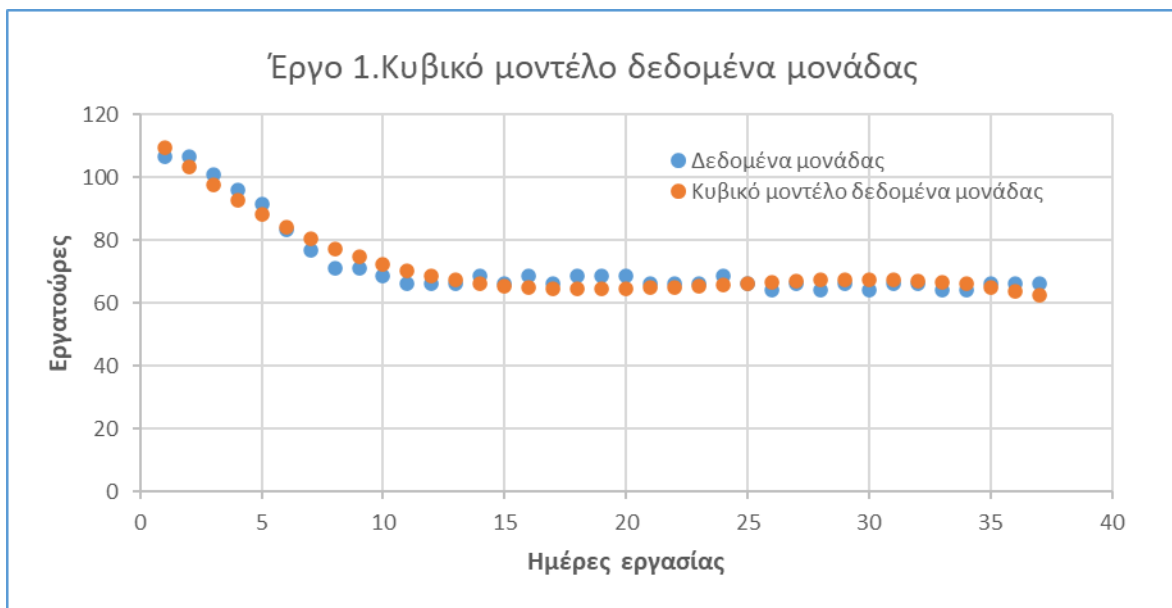
$$Y = 108,0461 \times X^{-0,155}$$

Όπου X η ημέρα εργασίας και Y οι εργατοώρες για κάθε πλαίσιο. Το μοντέλο για τα δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου αντίστοιχα διαμορφώνεται σε

$$Y = 119,1 \times X^{-0,149}$$

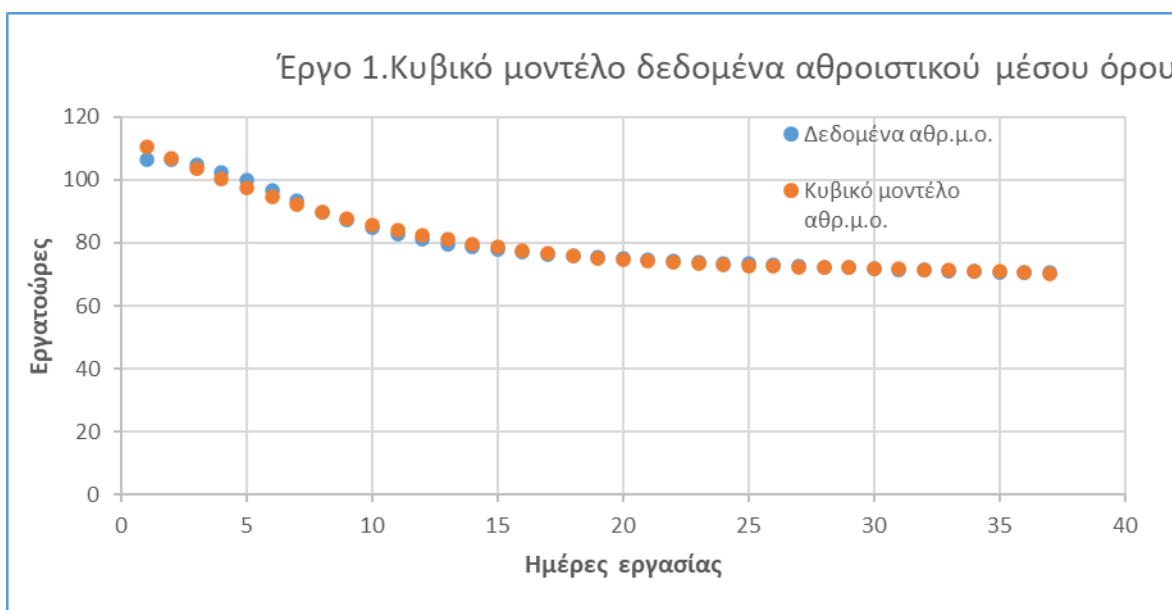
4.3.1.2 Έργο 1 κυβικό μοντέλο

Εφαρμόζοντας το κυβικό μοντέλο που προσεγγίζει καλύτερα τα δεδομένα παίρνουμε το σχήμα 7 για τα δεδομένα μονάδας.



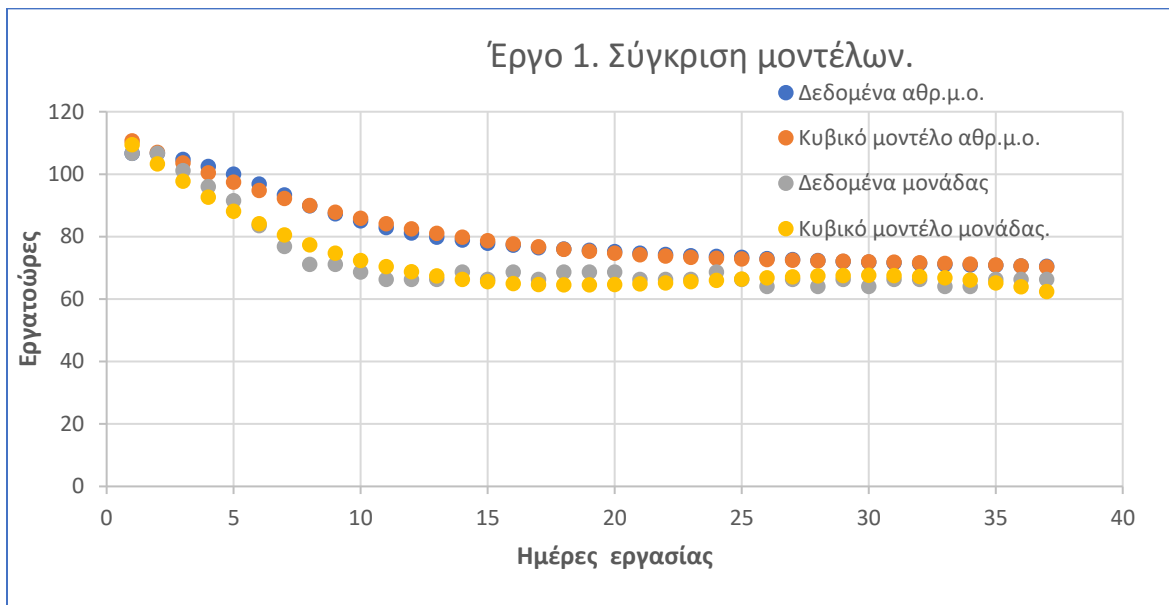
Σχήμα 7. Έργο 1.Κυβικό μοντέλο. Δεδομένα μονάδας

Κυβικό μοντέλο για δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου.



Σχήμα 8. Έργο 1. Κυβικό μοντέλο. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου

Η σύγκριση των δεδομένων μονάδας και των δεδομένων αθροιστικού μέσου όρου του έργου 1 για το κυβικό μοντέλο εμφανίζονται στο σχήμα 9.



Σχήμα 9. Έργο 1. Σύγκριση δεδομένων μονάδας και αθροιστικού μέσου όρου για το κυβικό μοντέλο

Η συνάρτηση που δίνει το κυβικό μοντέλο για τα δεδομένα μονάδας είναι

$$Y = 116,1251 - 7X + 0,308X^2 - 0,00425X^3$$

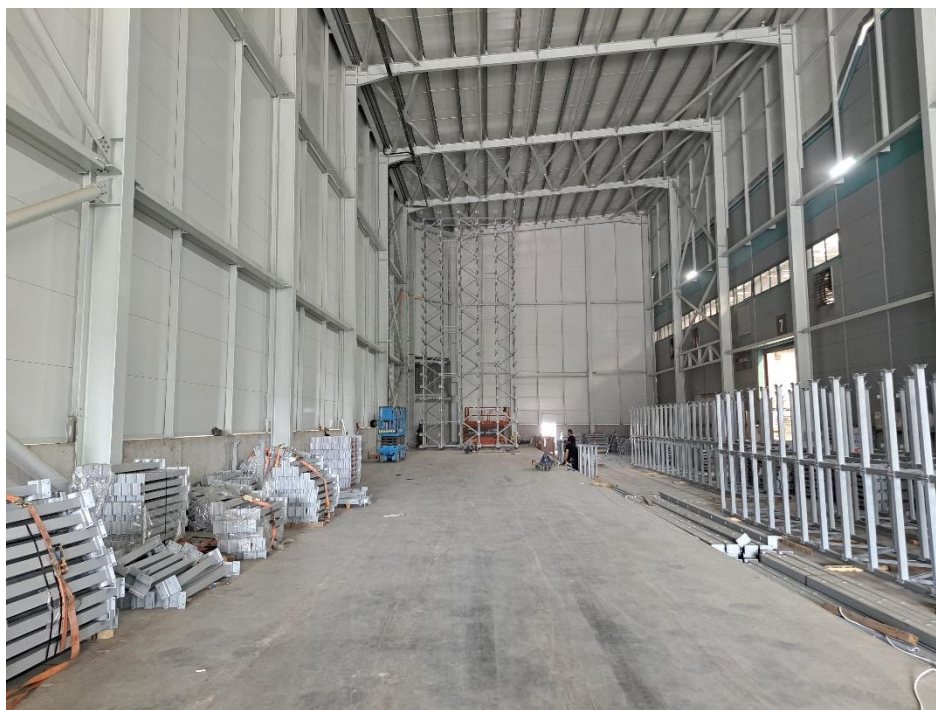
Και για τα δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου είναι

$$Y = 114,5 - 4X + 0,13X^2 - 0,0015X^3$$

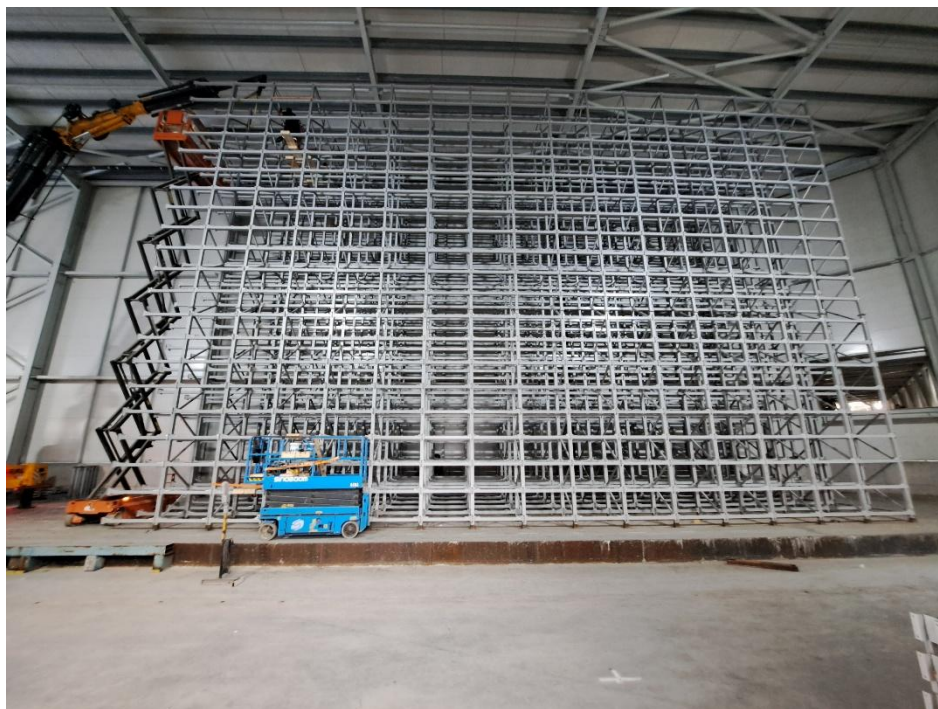
4.3.2 Έργο 2

Τα δεδομένα από το έργο 2 αναφέρονται σε μια ρομποτική αποθήκη 1008 θέσεων, που αποτελείται από 48 στήλες με 21 θέσεις η κάθε στήλη. Η εγκατάσταση έλαβε χώρα στη βιομηχανία ΑΚΡΑ στην πόλη Σακάρια της Τουρκίας. Η δομική μονάδα του έργου ήταν ένα πλαίσιο 2 επί 21 κελιών και κατασκευάστηκαν συνολικά 24 πλαίσια. Για την εκτέλεση του έργου εργαζόταν ένα συνεργείο 5 ατόμων. Το συνεργείο συναρμολόγησε και ανύψωσε 24 πλαίσια σε 78 ημέρες με συνολική απασχόληση 3120 εργατοωρών. Το συνεργείο ξεκίνησε συναρμολογώντας 6 κελιά ανά ημέρα ή αλλιώς θα χρειαζόταν 280 ώρες για το πρώτο πλαίσιο και έφτασε να μοντάρει 14 κελιά ανά ημέρα ή να χρειάζεται 120 ώρες για ένα πλήρες

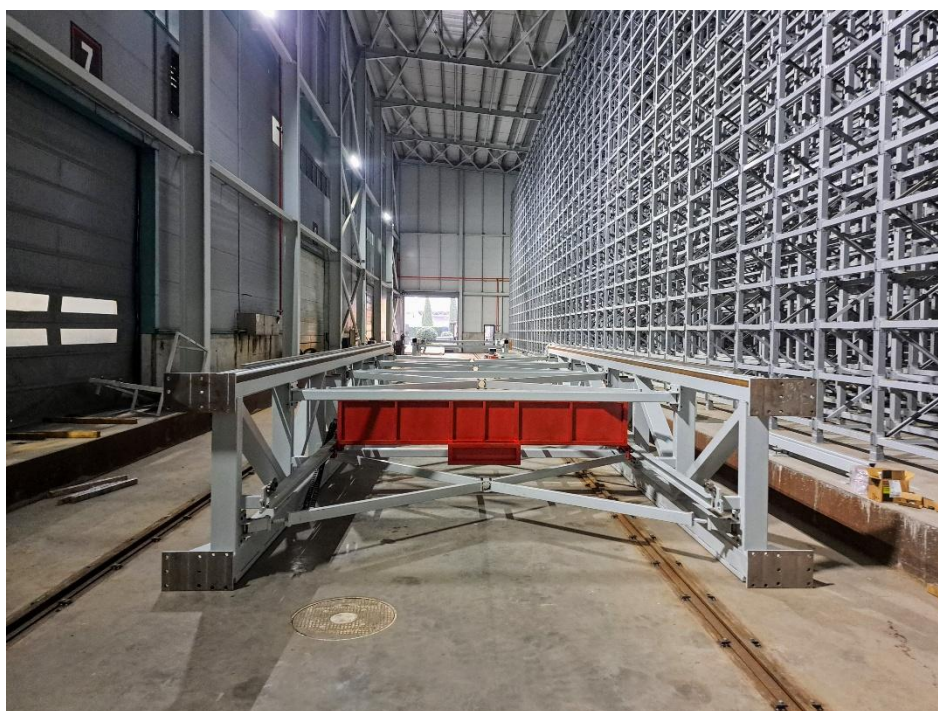
πλαίσιο. Στην Εικόνα 7 φαίνονται τα πρώτα κελιά της αποθήκης. Στην Εικόνα 8 φαίνεται το στάδιο της ανύψωσης των πλαισίων και στην Εικόνα 9 η αποθήκη ολοκληρωμένη όσον αφορά στα μεταλλικά κελιά με τον αυτόματο γερανό σε στάδιο συναρμολόγησης στο έδαφος.



Εικόνα 7. Έργο 2. Συναρμολόγηση πλαισίων.



Εικόνα 8. Έργο 2. Ανύψωση πλαισίων.



Εικόνα 9. Έργο 2. Πριν την ανύψωση του αυτόματου γερανού. Ολοκλήρωση μεταλλικών κελιών.

Ο πίνακας 5 παρουσιάζει την παραγωγή των θέσεων ανά ημέρα και την αναγωγή για το χρόνο που θα χρειαζόταν να κατασκευαστεί ένα πλαίσιο με το ρυθμό εργασίας της κάθε ημέρας. Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει τα αντίστοιχα δεδομένα σε μορφή αθροιστικού μέσου όρου.

Πίνακας 5. Αριθμός κελιών ανά ημέρα και ωρών ανά πλαίσιο για το έργο 2. Δεδομένα μονάδας

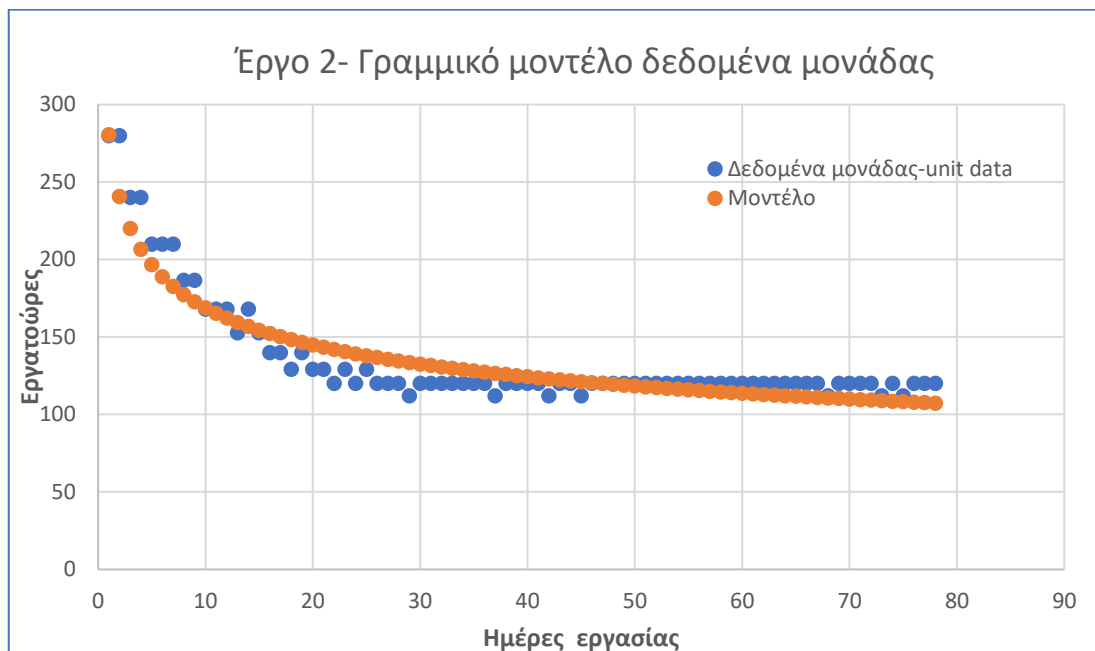
Ημέρα	Κελιά/ημέρα	Ωρες / πλαίσιο	Ημέρα	Κελιά/ημέρα	Ωρες / πλαίσιο
1	6	280	40	14	120
2	6	280	41	14	120
3	7	240	42	15	112
4	7	240	43	14	120
5	8	210	44	14	120
6	8	210	45	15	112
7	8	210	46	14	120
8	9	186,6666667	47	14	120
9	9	186,6666667	48	14	120
10	10	168	49	14	120
11	10	168	50	14	120
12	10	168	51	14	120
13	11	152,7272727	52	14	120
14	10	168	53	14	120
15	11	152,7272727	54	14	120
16	12	140	55	14	120
17	12	140	56	14	120
18	13	129,2307692	57	14	120
19	12	140	58	14	120
20	13	129,2307692	59	14	120
21	13	129,2307692	60	14	120
22	14	120	61	14	120
23	13	129,2307692	62	14	120
24	14	120	63	14	120
25	13	129,2307692	64	14	120
26	14	120	65	14	120
27	14	120	66	14	120
28	14	120	67	14	120
29	15	112	68	15	112
30	14	120	69	14	120
31	14	120	70	14	120
32	14	120	71	14	120
33	14	120	72	14	120
34	14	120	73	15	112
35	14	120	74	14	120
36	14	120	75	15	112
37	15	112	76	14	120
38	14	120	77	14	120
39	14	120	78	14	120

Πίνακας 6. Αριθμός κελιών ανά ημέρα και ωρών ανά πλαίσιο για το έργο 2. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου

Ημέρα	Κελιά/ ημέρα	Ώρες / πλαίσιο	Κελιά/ ημέρα (αθροιστ ικος μ.ο.)	Ώρες / πλαίσιο (αθροιστ ικος μ.ο.)	Ημέρα	Κελιά/ ημέρα	Ώρες / πλαίσιο	Κελιά/ ημέρα (αθροιστ ικος μ.ο.)	Ώρες / πλαίσιο (αθροιστ ικος μ.ο.)
1	6	280	6	280	40	14	120	11,775	152,7735
2	6	280	6	280	41	14	120	11,82927	151,9742
3	7	240	6,333333	266,6667	42	15	112	11,90476	151,0224
4	7	240	6,5	260	43	14	120	11,95349	150,301
5	8	210	6,8	250	44	14	120	12	149,6123
6	8	210	7	243,3333	45	15	112	12,06667	148,7765
7	8	210	7,142857	238,5714	46	14	120	12,1087	148,1509
8	9	186,6667	7,375	232,0833	47	14	120	12,14894	147,552
9	9	186,6667	7,555556	227,037	48	14	120	12,1875	146,978
10	10	168	7,8	221,1333	49	14	120	12,22449	146,4274
11	10	168	8	216,303	50	14	120	12,26	145,8988
12	10	168	8,166667	212,2778	51	14	120	12,29412	145,391
13	11	152,7273	8,384615	207,697	52	14	120	12,32692	144,9027
14	10	168	8,5	204,8615	53	14	120	12,35849	144,4329
15	11	152,7273	8,666667	201,3859	54	14	120	12,38889	143,9804
16	12	140	8,875	197,5492	55	14	120	12,41818	143,5444
17	12	140	9,058824	194,164	56	14	120	12,44643	143,124
18	13	129,2308	9,277778	190,5566	57	14	120	12,47368	142,7183
19	12	140	9,421053	187,8957	58	14	120	12,5	142,3266
20	13	129,2308	9,6	184,9625	59	14	120	12,52542	141,9482
21	13	129,2308	9,761905	182,3086	60	14	120	12,55	141,5824
22	14	120	9,954545	179,4764	61	14	120	12,57377	141,2286
23	13	129,2308	10,08696	177,2918	62	14	120	12,59677	140,8862
24	14	120	10,25	174,9046	63	14	120	12,61905	140,5546
25	13	129,2308	10,36	173,0777	64	14	120	12,64063	140,2335
26	14	120	10,5	171,0362	65	14	120	12,66154	139,9222
27	14	120	10,62963	169,146	66	14	120	12,68182	139,6203
28	14	120	10,75	167,3908	67	14	120	12,70149	139,3275
29	15	112	10,89655	165,4807	68	15	112	12,73529	138,9256
30	14	120	11	163,9647	69	14	120	12,75362	138,6513
31	14	120	11,09677	162,5465	70	14	120	12,77143	138,3849
32	14	120	11,1875	161,2169	71	14	120	12,78873	138,1259
33	14	120	11,27273	159,9679	72	14	120	12,80556	137,8742
34	14	120	11,35294	158,7924	73	15	112	12,83562	137,5197
35	14	120	11,42857	157,684	74	14	120	12,85135	137,283
36	14	120	11,5	156,6373	75	15	112	12,88	136,9459
37	15	112	11,59459	155,4309	76	14	120	12,89474	136,7229
38	14	120	11,65789	154,4985	77	14	120	12,90909	136,5057
39	14	120	11,71795	153,6139	78	14	120	12,92308	136,2941

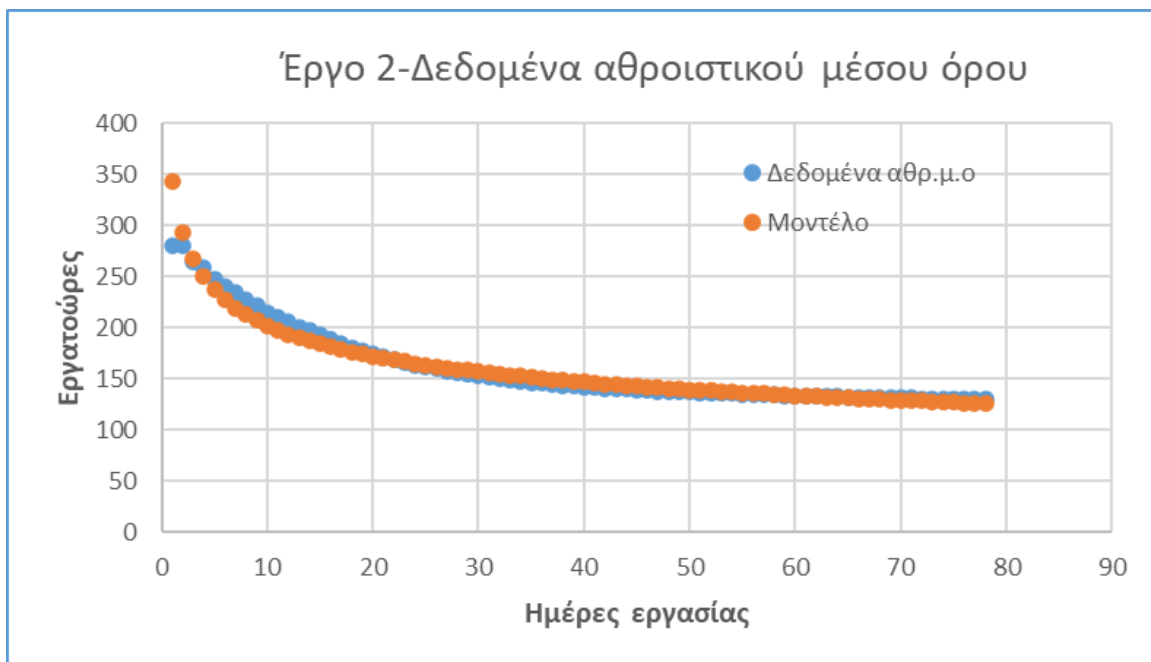
4.3.2.1 Έργο 2 γραμμικό μοντέλο

Στο σχήμα 10 εμφανίζονται τα δεδομένα μονάδας για το γραμμικό μοντέλο.



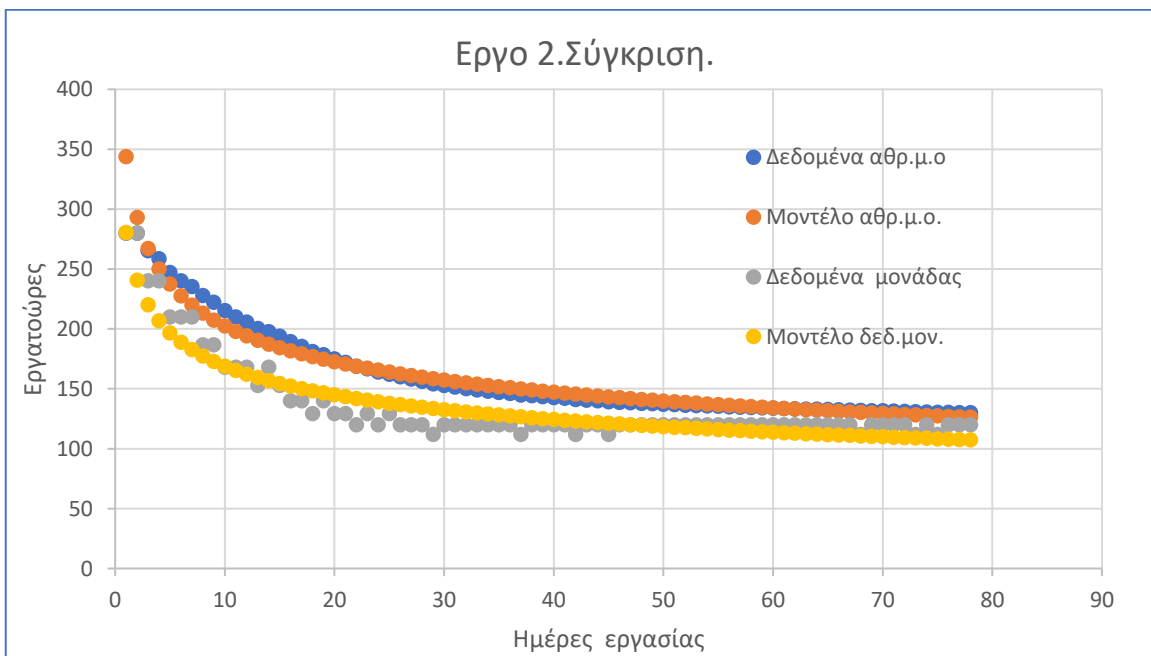
Σχήμα 10. Έργο 2. Γραμμικό μοντέλο. Δεδομένα μονάδας

Με τη χρήση των δεδομένων αθροιστικού μέσου όρου εμφανίζονται τα αποτελέσματα για το γραμμικό μοντέλο στο σχήμα 11. Είναι εμφανής η μικρότερη διασπορά από τα δεδομένα μονάδας.



Σχήμα 11. Έργο 2. Γραμμικό μοντέλο. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου.

Τα συγκριτικά δεδομένα μονάδας και αθροιστικού μέσου όρου που απεικονίστηκαν γραφικά στα σχήματα εμφανίζονται στο παρακάτω Σχήμα 12 μαζί με τα μοντέλα τους.



Σχήμα 12. Έργο 2. Σύγκριση μοντέλων δεδομένων μονάδας και αθροιστικού μέσου όρου

Για τα μοντέλα αυτά υπολογίστηκε ο ρυθμός μάθησης. Για το γραμμικό μοντέλο με δεδομένα μονάδας υπολογίστηκε η τιμή του σε 0,8583 ενώ για δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου σε 0,8527.

Το μοντέλο του Wright έδωσε τον τύπο για τα δεδομένα μονάδας

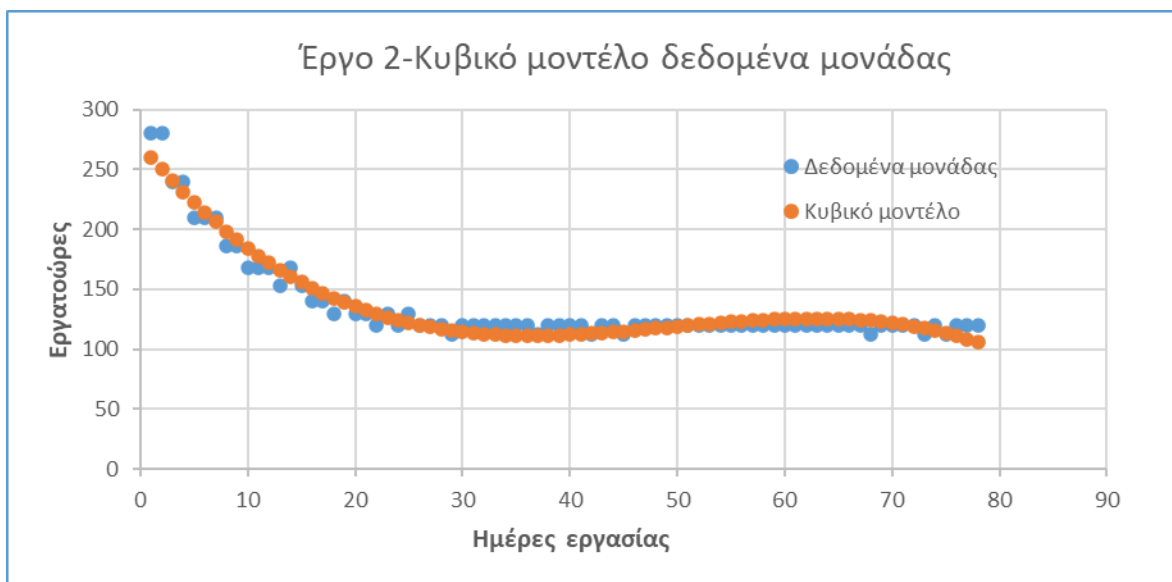
$$Y = 280,46 \times X^{-0,22}$$

Όπου X η ημέρα εργασίας και Y οι εργατοώρες για κάθε πλαίσιο. Το μοντέλο για τα δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου αντίστοιχα διαμορφώνεται σε

$$Y = 343,68 \times X^{-0,2298}$$

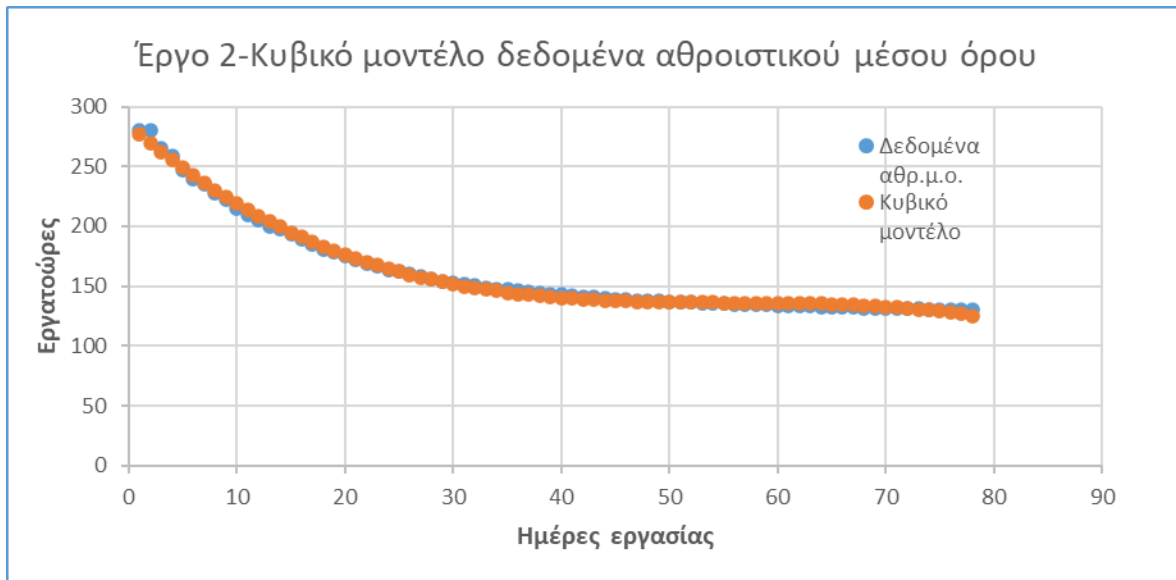
4.3.2.2 Έργο 2 κυβικό μοντέλο

Για το κυβικό μοντέλο τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 13 για τα δεδομένα μονάδας.



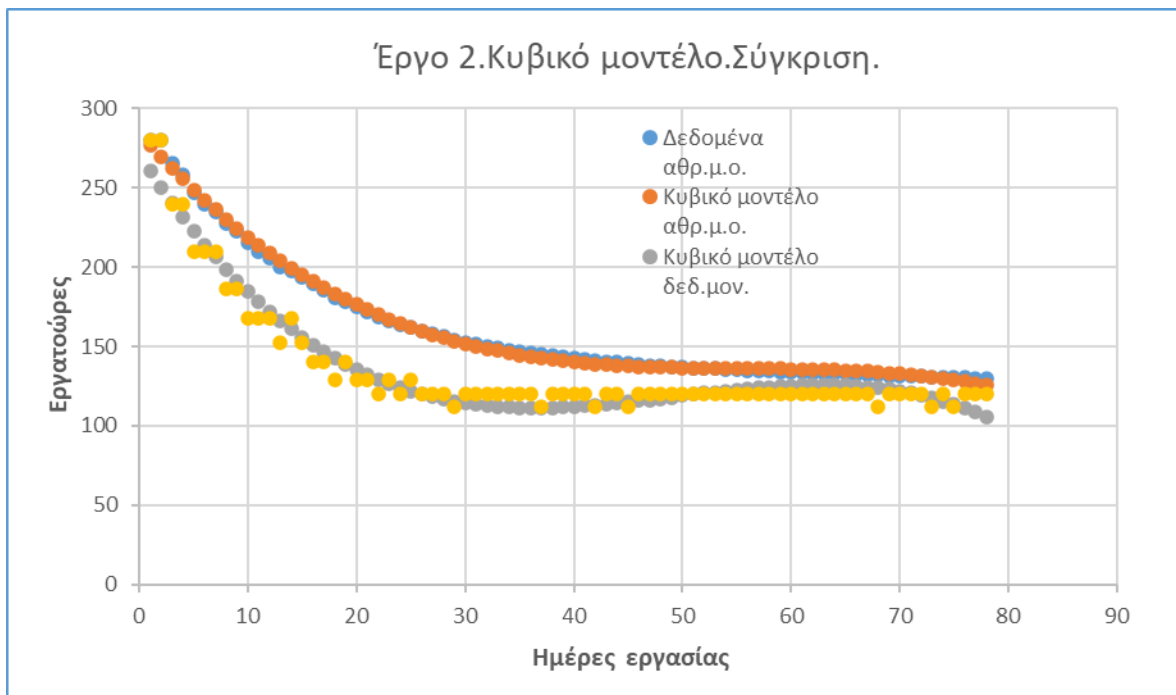
Σχήμα 13. Έργο 2. Κυβικό μοντέλο. Δεδομένα μονάδας

Και στο σχήμα 14 για τα δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου.



Σχήμα 14. Έργο 2. Κυβικό μοντέλο. Δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου

Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται και η συγκριτική απεικόνιση.



Σχήμα 15. Έργο 2.Σύγκριση κυβικών μοντέλων

Η συνάρτηση που δίνει το κυβικό μοντέλο για τα δεδομένα μονάδας είναι

$$Y = 271,1775 - 10,86X + 0,2354X^2 - 0,00158X^3$$

Και για τα δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου είναι

$$Y = 284,852 - 7,913X + 0,141X^2 - 0,00085X^3$$

4.4 Ανάλυση μοντέλων καμπύλης μάθησης

Για τα δεδομένα μονάδας και αθροιστικού μέσου όρου υπολογίστηκαν οι παράμετροι για το μοντέλο του Wright καθώς και του κυβικού μοντέλου για κάθε έργο. Για τη σύγκριση των μοντέλων θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος του συντελεστή προσδιορισμού R^2 (coefficient of determination). Ο τύπος που δίνει το συντελεστή προσδιορισμού είναι

$$R^2 = 1 - \frac{SSV}{SST}$$

Όπου

- $SSV = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2$ άθροισμα των τετραγώνων παλινδρόμησης
- $SST = \sum (Y_i - \bar{Y})^2$ άθροισμα των τετραγώνων

Ο συντελεστής προσδιορισμού παίρνει τιμές από 0 ως 1 και όσο πιο κοντά στη μονάδα τόσο καλύτερο είναι το αποτέλεσμα της προσαρμογής.

Για το έργο 1 προκύπτει ο πίνακας 7.

Πίνακας 7. Έργο 1. Συντελεστής προσδιορισμού για τα 2 μοντέλα

Μοντέλο	Συντελεστής προσδιορισμού για δεδομένα μονάδας	Συντελεστής προσδιορισμού για δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου
Wright	0,857	0,933
Κυβικό μοντέλο	0,942	0,990

Για το έργο 2 προκύπτει ο πίνακας 8.

Πίνακας 8. Έργο 2. Συντελεστής προσδιορισμού για τα 2 μοντέλα

Μοντέλο	Συντελεστής προσδιορισμού για δεδομένα μονάδας	Συντελεστής προσδιορισμού για δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου
Wright	0,902	0,956
Κυβικό μοντέλο	0,946	0,997

4.5 Σύνοψη κεφαλαίου

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε αναλυτικά η διαδικασία συναρμολόγησης και ανέγερσης των μεταλλικών ραφιών καθώς και τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από τα δύο έργα. Έγινε αναλυτική περιγραφή των επιμέρους εργασιών που απαιτούνται για την κατασκευή κάθε πλαισίου.

Τα δεδομένα των δύο έργων αναλύθηκαν με το γραμμικό μοντέλο του Wright και το κυβικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας δεδομένα μονάδας και δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου. Από τη σύγκριση των μοντέλων προέκυψε ότι το κυβικό μοντέλο με δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου δίνει την καλύτερη προσαρμογή και στα δύο έργα, με $R^2=0,990$ για το Έργο 1 και $R^2=0,997$ για το Έργο 2. Και στα δύο έργα παρατηρήθηκε το φαινόμενο του πλατό, δηλαδή σταθεροποίηση της παραγωγικότητας μετά από κάποιο αρχικό στάδιο βελτίωσης.

5 Συμπεράσματα

5.1 Αντικείμενο του κεφαλαίου

Το αντικείμενο του κεφαλαίου είναι η σύντομη ανασκόπηση της εργασίας και η παρουσίαση των βασικών συμπερασμάτων. Τέλος θα παρουσιαστούν και διάφορες προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

5.2 Ανασκόπηση της διπλωματικής εργασίας

Η εργασία ασχολήθηκε με τη μελέτη του φαινομένου της μάθησης σε μια ιδιαίτερη κατηγορία κατασκευαστικών έργων όπως η συναρμολόγηση και ανέγερση μεταλλικών ραφιών σε αποθήκες Logistics σε εργοστάσια διέλασης αλουμινίου. Μελετήθηκε η βιβλιογραφία για το φαινόμενο της μάθησης και αναφέρθηκαν τα κυριότερα μοντέλα που περιγράφουν το φαινόμενο. Η βιβλιογραφία αναφέρει εφαρμογή και χρήση των μοντέλων σε κατασκευαστικά έργα.

5.3 Συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας

Στην εργασία μελετήθηκαν δυο έργα που αφορούσαν την κατασκευή δυο αποθηκών με διαφορετικό σχέδιο δηλαδή διαφορετική δομική μονάδα (πλαίσιο) και διαφορετικό συνεργείο τόσο σε σύνθεση όσο και σε αριθμό.

Το πρώτο έργο αφορούσε στην κατασκευή 1008 θέσεων σε 84 στήλες (2 ομάδες των 42 στηλών δεξιά και αριστερά του αυτόματου γερανού) και 12 ορόφους. Η εγκατάσταση έλαβε χώρα στη βιομηχανία Tecnoglass στην πόλη Μπαρνακίγια της Κολομβίας. Η δομική μονάδα του έργου ήταν ένα πλαίσιο 2 επί 12 κελιών και κατασκευάστηκαν συνολικά 42 πλαίσια. Για το έργο απασχολήθηκε ένα συνεργείο των 10 ατόμων και συνολικά δαπανήθηκαν 2960 εργατοώρες.

Το δεύτερο έργο αφορούσε στην κατασκευή 1008 θέσεων σε 48 στήλες (1 ομάδα των 48 στηλών μόνο αριστερά του αυτόματου γερανού) και 21 ορόφους. Η εγκατάσταση έλαβε χώρα στη βιομηχανία AKPA στην πόλη Σακάρια της Τουρκίας. Η δομική μονάδα του έργου ήταν ένα πλαίσιο 2 επί 21 κελιών και κατασκευάστηκαν συνολικά 24 πλαίσια. Για το

δεύτερο έργο απασχολήθηκε ένα συνεργείο των 5 ατόμων και δαπανήθηκαν 3120 εργατοώρες.

Για κάθε έργο επιλέχθηκε το δομικό στοιχείο που είναι το μεταλλικό πλαίσιο που συναρμολογείται και στη συνέχεια ανεγείρεται ως μονάδα αναφοράς για τη μελέτη του φαινομένου της μάθησης.

Από τα κυριότερα μοντέλα που περιγράφουν την καμπύλη μάθησης επιλέχθηκαν το κλασικό μοντέλο του Wright ως γενικό μοντέλο αναφοράς και στη συνέχεια το κυβικό μοντέλο που λόγω πολλών συντελεστών έχει τη δυνατότητα καλύτερης προσαρμογής στην καμπύλη των πραγματικών δεδομένων.

Τα δεδομένα που καταγράφηκαν στα έργα μετασχηματίστηκαν σε δεδομένα μονάδας και σε δεδομένα αθροιστικού μέσου όρου. Τα μοντέλα εφαρμόστηκαν και στα δύο έργα και μετρήθηκε ο συντελεστής προσδιορισμού για τον έλεγχο των μοντέλων όσον αφορά στην απόκλισή τους από τις πραγματικές τιμές. Από τις τιμές που προέκυψαν διαπιστώθηκε ότι τα μοντέλα περιγράφουν και ταυτίζονται ικανοποιητικά με τα δεδομένα των έργων. Ειδικότερα, από τον συντελεστή προσδιορισμού προκύπτει ότι το κυβικό μοντέλο περιγράφει με μεγάλη ακρίβεια την καμπύλη των δεδομένων.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα συνεργεία παρουσιάζουν βελτίωση της αποδοτικότητας τις πρώτες μέρες και στη συνέχεια η απόδοσή τους σταθεροποιείται αφού έχουν βελτιώσει τις τεχνικές τους και αυτοματοποιήσει την εργασία τους. Η σταθεροποίηση σε κάθε έργο επιτυγχάνεται μετά από διαφορετικό χρόνο, στις 10 μέρες για το πρώτο έργο και στις 20 περίπου για το δεύτερο. Μια πιθανή εξήγηση της διαφοράς που προέκυψε είναι τα διαφορετικού μεγέθους δομικά στοιχεία καθώς στο δεύτερο έργο το πλαίσιο είναι μεγαλύτερο κάνοντας δυσκολότερη την εργασία συναρμολόγησης και ανύψωσης. Επίσης ένας άλλος λόγος είναι η διαφορετική αριθμητική σύνθεση των συνεργείων αν και σε γενικές γραμμές τα δύο έργα δεν είχαν πολύ διαφορετικό συνολικό αριθμό σε εργατοώρες.

Η εμπειρία των παλαιότερων έργων για τα οποία δεν είχαν υπάρξει καταγραφές δεδομένων έχει δείξει ότι τα συνεργεία αυξάνουν την παραγωγικότητά τους με την πάροδο του χρόνου και την επανάληψη. Μάλιστα φτάνουν πάντοτε στη φάση της σταθεροποίησης της μάθησης,

όπου για τη συναρμολόγηση και ανύψωση των πλαισίων απαιτείται ένας σταθερός αριθμός εργατοωρών που δύναται να μεταβάλλεται καθημερινά κατά πολύ μικρές τιμές.

Η προσωπική πείρα έχει δείξει ότι η εκτίμηση ολοκλήρωσης των εργασιών στα έργα αποθηκών μεταλλικών ραφιών στα οποία έχω συμμετάσχει παρουσιάζει δυσκολίες και συνήθως δεν μπορεί να γίνει ακριβής χρονικός υπολογισμός από την αρχή του έργου. Η εργασία βοήθησε στον υπολογισμό του χρόνου αυτού για τα έργα που μελετήθηκαν.

5.4 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Ο αρχικός στόχος της εργασίας ήταν να μελετηθούν τα δεδομένα από έργα κατασκευής μεταλλικών ραφιών και να βρεθεί αν η εργασία του συνεργείου μπορεί να περιγραφεί από κάποιο μοντέλο μάθησης. Η μελέτη έδειξε ότι τα μοντέλα μάθησης μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά την πρόοδο των εργασιών του συνεργείου καθώς και τη σταθεροποίηση της μάθησης μετά από κάποιο χρονικό διάστημα.

Η εργασία χρησιμοποίησε δεδομένα μόνο από δύο έργα. Ιδανικά απαιτούνται περισσότερα δεδομένα από περισσότερα έργα για πιο αξιόπιστα συμπεράσματα. Επιπλέον θα θέλαμε να εξετάσουμε έργα με συνεργεία ίσου αριθμού ατόμων ή ίδιο σε διαστάσεις δομικό στοιχείο για να εξεταστεί ποιος από τους δύο παράγοντες και σε ποιο βαθμό επηρεάζει το φαινόμενο της μάθησης.

Σε μελλοντικές έρευνες η καταγραφή των δεδομένων θα πρέπει να γίνεται στη ζητούμενη μορφή (χρόνος που απαιτείται για κάθε μονάδα-πλαίσιο) ώστε να είναι ευκολότερη η χρήση των δεδομένων. Στην εργασία έγιναν αναγωγές οι οποίες μπορεί να εισάγουν κάποιο σφάλμα για να έρθουν τα δεδομένα σε χρηστική μορφή. Επιπλέον θα μπορούσε να γίνει δοκιμή με περισσότερα μοντέλα ώστε να βρεθεί ίσως καταλληλότερο για τη συγκεκριμένη εργασία. Στη βιβλιογραφία έχουν παρουσιαστεί νέα μοντέλα για τον κλάδο των κατασκευών όπως των Srouf et al (2016).

Μία σημαντική βελτίωση θα ήταν η δημιουργία ενός παραμετρικού μοντέλου που να μπορεί να κάνει ικανοποιητική πρόβλεψη λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση των κατασκευών. Το παραμετρικό μοντέλο ιδανικά θα αλλάζει παραμέτρους ανάλογα με τον αριθμό των ορόφων και ίσως και της εμπειρίας ή της αριθμητικής σύνθεσης του συνεργείου, παράγοντες

που φαίνεται να επηρεάζουν τη συμπεριφορά του μοντέλου μάθησης. Με τον τρόπο αυτό θα ήταν δυνατός ο χρονικός προγραμματισμός των εργασιών με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ξενόγλωσσες

Anzanello, M. J. & Fogliatto, F. S. (2011). Learning curve models and applications: Literature review and research directions, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Volume 41, Issue 5, Pages 573-583, ISSN 0169-8141, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2011.05.001>.

Badiru, A. B. (1992). Computational survey of univariate and multivariate learning curve models. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 39(2), 176-188.

Baloff, N. (1971). Extension of the learning curve—some empirical results *J. Operational Research Society*. Vol. 22. p 329–340.

Boehmke, B. C., & Freels, J. K. (2017). Learning Curve: An implementation of Crawford's and Wright's learning curve production functions. *Journal of Open Source Software*, 2(13), 202. <https://doi.org/10.21105/joss.00202>.

Carlson, J. G. H. (1973). Cubic learning curves: Precision tool for labor estimating. *Manufacturing Engineering and Management*, 71(5), 22-25.

Conway, R. W., & Schultz, A., Jr. (1959). The Manufacturing Progress Function. *Journal of Industrial Engineering*, 10(1), 39–53.

Crawford, J. R. (1944). Learning curve, ship curve, ratios, related data. Burbank, CA: Lockheed Aircraft Corporation.

DeJong JR (1957). The Effects Of Increasing Skill On Cycle Time And Its Consequences For Time Standards. *Ergonomics* 1 (1):51-60. doi:10.1080/00140135708964571

Everett, J.G. & Farghal, S. (1994). Learning curve predictors for construction field operations. *Journal of Construction Engineering and Management*, 120 (3), 603-616.

Everett, J.G. & Farghal, S. (1997). Data representation for predicting performance with learning curves. *Journal of Construction Engineering and Management*, 123 (1), 46-52. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1997\)123:1\(46\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1997)123:1(46))

- Everett, J.G. & Farghal, S. (1997). Learning curves: Accuracy in predicting future performance. *Journal of Construction Engineering and Management*, 123 (1), 41–45.
- Gates, M., & Scarpa, A. (1972). Learning and experience curves. *Journal of the Construction Division*, Volume 98, Issue 1. <https://doi.org/10.1061/JCCEAZ.0000339>
- Hijazi, A. M., AbouRizk, S. M. & Halpin, D. W. (1992). Modeling and simulating learning development in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 118 (4), 685–700.
- Hirschmann, W. B. (1964). Learning Curve. *Chemical Engineering*, Vol. 71, No. 7, pp. 95-100.
- Jaber, M. (2006). Learning and Forgetting Models and Their Applications. *Handbook of Industrial and Systems Engineering*. 30-31. 10.1201/9781420038347.ch30.
- Jordan, R. B. 1958. Learning how to use the learning curve. N.A.A. Bulletin (January): 27-39.
- Kati, S. & Thomaidou, F. (2021). Logistics in Greece. Sectors in Focus 2021 Alpha Bank
- Malyusz, Levente & Pécs, Attila. (2014). Predicting Future Performance by Learning Curves. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 119. 368-376. 10.1016/j.sbspro.2014.03.042.
- Malyusz, L. & Varga, A. (2017). An Estimation of the Learning Curve Effect on Project Scheduling with Calendar Days Calculation. *Procedia Engineering*, 196, 730–737.
- Oglesby, C. H., Parker, H. W., & Howell, G. A. (1989). *Productivity improvement in construction*. New York: McGraw-Hill
- Salman, A., & Sodangi, M. (2025). Developing the Learning Curve Model to Enhance Construction Project Scheduling and Cost Estimating. *Open Constr Build Technol J*; 19: e18748368369918. DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/0118748368369918250114095300>.
- SaravanaPrabhu, G. & Vidjeapriya, R. (2021). *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 1197 012004. DOI 10.1088/1757-899X/1197/1/012004.

Srouf, F. J., Kiomjian, D., and Srouf, I. M. (2016). Learning curves in construction: a critical review and new model. *Journal of Construction Engineering and Management*, 142:06015004 [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001096](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001096)

Teplitz, C. J. (1991). *The learning curve deskbook: A reference guide to theory, calculations, and applications*. New York: Quorum Books.

Thomas, H.R., Mathews, C.T., Ward, J.G., (1986). Learning Curve Models of Construction Productivity. *Journal of Construction Engineering and Management* 112 (2):245-258. doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9364(1986)112:2(245)

Thomas, H. R., & Sanders, S. R. (1991). "Factor Model of Construction Labor Productivity." *Journal of Construction Engineering and Management*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1991\)117:4\(626\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1991)117:4(626)).

United Nations. Economic Commission for Europe. (1965). Effect of Repetition on Building Operations and Processes on Site: Report of an Enquiry Undertaken by the Committee on Housing, Building and Planning. UN.

Wright, T. P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 3(4), 122-128

Yelle, L. E. (1979). The learning curve: Historical review and comprehensive survey. *Decision Sciences*, 10(2), 302-328.

Ελληνικές

Οικονομικός Ταχυδρόμος, 2025. <https://www.ot.gr/2025/06/06/epixeiriseis/alumil-se-ekseliksi-oi-nees-ependyseis-pou-enisxyoun-ti-diethni-tis-anaptyksi/>.

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.