



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗΣ  
ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΠΑΙΘΡΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΡΠΙΡΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΜΑΡΙΟΣ

Επιβλέπων: Θεόδωρος Ν. Μιχαλακόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΙΚΗΣ  
ΔΥΝΑΜΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΠΑΙΘΡΙΕΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΕΙΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΕΡΠΙΡΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΜΑΡΙΟΣ

Επιβλέπων: Θεόδωρος Ν. Μιχαλακόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_

Θεόδωρος Μιχαλακόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π. ....

Κωνσταντίνος Μόδης, Καθηγητής Ε.Μ.Π. ....

Μαρία Μενεγάκη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π. ....

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2022

Copyright © Κωνσταντίνος Μάριος Περπιράκης, 2022  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία υπό τον τίτλο «Κατανομή μεταφορικής δυναμικότητας σε υπαίθριες εκμεταλλεύσεις» εξετάζει το ζήτημα της βελτιστοποίησης του συστήματος φόρτωσης και μεταφοράς στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις. Το σύστημα φόρτωσης και μεταφοράς αποτελεί έναν από τους κρισιμότερους κρίκους στην αλυσίδα λειτουργίας κάθε εκμετάλλευσης. Η σημασία του αντικατοπτρίζεται και από την συμμετοχή του στο συνολικό κόστος λειτουργίας, αφού με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία αυτό υπερβαίνει ακόμα και το 60% στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις.

Στην πρώτη ενότητα δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο για την περιγραφή του ζητήματος της βελτιστοποίησης, αλλά και για τον τρόπο που αυτή μπορεί να επιτευχθεί. Ουσιαστικά γίνεται μία αναλυτική περιγραφή του συστήματος μεταφοράς στα υπαίθρια μεταλλεία. Εν συνεχεία δίνεται το ιστορικό υπόβαθρο στην προσπάθεια εύρεσης μεθόδων για τη βελτιστοποίηση του συστήματος και οι διάφορες μέθοδοι που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιούνται για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Κατόπιν η ενότητα συνεχίζεται με την ανάπτυξη και παράθεση των βασικών προβλημάτων που υπάρχουν στα συστήματα φόρτωσης και μεταφοράς στα υπαίθρια μεταλλεία. Τέλος, περιγράφεται πλήρως η σύνθεση του κόστους κατά την μεταφορά, αλλά και πως αυτό μπορεί να μειωθεί.

Η επόμενη ενότητα περιγράφει την ανάπτυξη ενός προγράμματος τόσο σε θεωρητικό επίπεδο όσο και σε πρακτικό. Σκοπός του ήταν η βελτιστοποίηση του συστήματος μεταφοράς με βάση τον στοχαστικό προγραμματισμό. Ενσωματώνει γενετικούς αλγόριθμους και υλοποιείται με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python. Ο αντικειμενικός σκοπός λειτουργίας του προγράμματος είναι να εντοπίζει τις βέλτιστες παραμέτρους λειτουργίας για κάθε σύστημα μεταφοράς και με αυτόν τον τρόπο να κατευθύνει τον εκάστοτε χρήστη στις αποφάσεις που πρέπει να λάβει ως προς τον τρόπο λειτουργίας της εκμετάλλευσης.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με την ενότητα της πειραματικής εφαρμογής και χρήσης του προγράμματος με βάση τις παραμέτρους λειτουργίας του ορυχείου άνθρακα Cao Son στο Βιετνάμ. Με τη χρήση του προγράμματος κατέστη εφικτό να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα τόσο για την αποτελεσματικότητα του μεταφορικού συστήματος του ορυχείου, όσο κυριότερα για

την αποτελεσματικότητα του ίδιου του προγράμματος, αλλά και να εντοπιστούν πιθανοί τρόποι βελτίωσής του.

Οι προτεινόμενες αλλαγές αφορούν στο πλήθος και στην ακρίβεια των δεδομένων που εισάγει ο χρήστης, όσο και στην ίδια την βελτίωση του κώδικα.

## **ABSTRACT**

This thesis under the title "Allocation of transport capacity in open pit mines" examines the issue of optimization of the loading and haulage system in open pit mines. The system is one of the most critical links in the operation chain of any mine. Its importance is also reflected by its participation in the total operating cost, since according to the international literature this even exceeds 60% in open pit mines.

In the first section, the theoretical background is given for the description of the optimization issue, as well as for the way it can be achieved. Essentially, it consists of a detailed description of the haulage system in open pit mines. Then the historical background is given in the effort to find methods for the optimization of the system and the various methods developed and used to find the optimal solution. The section continues with the development and listing of the main problems that exist in the loading and haulage systems in open pit mines. Finally, the cost distribution during transportation is described, in addition to how cost reductions can be achieved.

The next section describes the development of a computer program both theoretically and practically. The aim was to develop an optimization program based on stochastic programming for haulage systems in open pit mines. It incorporates genetic algorithms and is implemented in the Python programming language. The objective of the program is to identify the optimal operating parameters for each haulage system and in this way to direct the user to the decisions he must make regarding the operation of the mine.

The thesis concludes with the section of the experimental application and use of the program based on the operating parameters of the Cao Son coal mine in Vietnam. With the use of the program, it became possible to draw the necessary conclusions both for the effectiveness of the mine's haulage system, and for the effectiveness of the program itself, but also to identify possible ways of improving it.

The proposed changes concern the quantity and accuracy of the data entered by the user as well as the improvement of the code itself.

## **ΠΡΟΛΟΓΟΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε, στον Τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο πλαίσιο του μαθήματος «Συστήματα φόρτωσης - μεταφοράς σε μεταλλεία και τεχνικά έργα». Η ανάπτυξη του κώδικα για την υλοποίηση του προγραμματιστικού τμήματος της εργασίας και η συγγραφή πραγματοποιήθηκαν σε ξεχωριστές μεταξύ τους περιόδους. Το προγραμματιστικό τμήμα της εργασίας υλοποιήθηκε σε όλη την διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2021-2022, ενώ η εφαρμογή του προγράμματος για την διεξαγωγή του πειραματικού μέρους, καθώς και η συγγραφή, πραγματοποιήθηκαν από τον Ιούνιο του 2022 έως τον Οκτώβριο του ίδιου έτους.

Το θέμα της διπλωματικής εργασίας ανατέθηκε από τον κ. Μιχαλακόπουλο, Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Ε.Μ.Π., τον οποίο και ευχαριστώ για την εμπιστοσύνη της ανάθεσης του συγκεκριμένου θέματος, την υποστήριξη καθώς και συνεχή καθοδήγηση του σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Όλα τα παραπάνω καθόρισαν σε πολύ μεγάλο βαθμό την εξέλιξη και την ποιότητα της παρούσας εργασίας.

Τέλος θέλω να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τους γονείς μου, Γιώργο και Νίκη, για τη βοήθεια και για την αμέριστη υλική και πνευματική υποστήριξη που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια.



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	vi
ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ.....	ix
ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	x
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
1.1 Το σύστημα φόρτωσης και μεταφοράς στα υπαίθρια μεταλλεία.....	1
1.2 Προσδιορισμός του προβλήματος.....	1
1.3 Στόχοι της παρούσας εργασίας.....	2
1.4 Το ερευνητικό μέρος της εργασίας.....	3
1.5 Δομή της εργασίας.....	3
1.6 Περιορισμοί της εργασίας.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	7
2.1 Γενική περιγραφή του συστήματος.....	7
Το σύστημα φόρτωσης – μεταφοράς.....	7
Επιλογή μηχανικού εξοπλισμού.....	9
Φάσεις του κύκλου μεταφοράς.....	10
2.2.1 Μελέτη του συστήματος με την χρήση των μοντέλων από την θεωρία της σειράς αναμονής.....	11
Γενική περιγραφή της θεωρίας των σειρών αναμονής (ουράς).....	11
Διεργασίες που ακολουθεί η θεωρία των σειρών αναμονής.....	11
Μελέτη περίπτωσης με χρήση μοντέλου ουράς των Hai, Masniyom.....	25
2.2.2 Μελέτη συστήματος με χρήση στοχαστικού προγραμματισμού.....	30
2.3 Μελέτη συστήματος με την χρήση μοντέλων προσομοίωσης.....	32
2.3.1. Γενική περιγραφή μοντέλων προσομοίωσης.....	32
2.3.2. Μελέτη περίπτωσης με την χρήση μοντέλου προσομοίωσης.....	42
2.4 Προβλήματα στην διαδικασία μεταφοράς εντός των μεταλλείων.....	50
2.4.1 Γενικά προβλήματα στις μεταλλευτικές μεταφορές.....	50

2.4.2 Το βασικό πρόβλημα στα συστήματα μεταφοράς.....	52
2.4.3 Τα συστήματα δρομολόγησης ως λύση στο βασικό πρόβλημα.....	54
2.5 Κόστος μεταφοράς σε υπαίθρια μεταλλεία.....	61
2.5.1. Κόστος μεταφοράς.....	61
2.5.2. Νέες τεχνολογίες και η συνεισφορά τους στο κόστος μεταφοράς.....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	69
3.1 Εισαγωγή στην γλώσσα προγραμματισμού Python.....	69
3.2. Γενική περιγραφή μοντέλων CCP (Chance Constrained Program).....	71
3.3 Στόχος του προγράμματος.....	75
3.4 Ανάπτυξη και δομή μοντέλου CCGP.....	77
3.5 Ανάπτυξη μοντέλου με χρήση της γλώσσας Python.....	84
Προβλήματα στην ανάπτυξη του μοντέλου.....	84
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	93
4.1 Εισαγωγή.....	93
4.2 Δεδομένα εκτέλεσης πειράματος και παραδοχές.....	95
4.3 Εκτέλεση Πειράματος.....	97
4.4 Συμπεράσματα πειραματικής διαδικασίας.....	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	105
5.1 Συμπέρασμα για την αποδοτικότητα των συστημάτων φόρτωσης και μεταφοράς.....	105
5.2 Συμπέρασμα για την αποτελεσματικότητα του προγράμματος.....	106
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	107

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ-ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Εικόνα 1 Τυπικός Κύκλος Φόρτωσης κ Μεταφοράς (Hitachi Global, access 2022)...	11
Εικόνα 2: Βασικό σύστημα ουράς φορτωτή – φορτηγών.....	15
Εικόνα 3 Ταξινόμηση μοντέλων Θεωρίας Σειρών Αναμονής (Alkass, 2003).....	23
Εικόνα 4: Διάγραμμα: Η συσχέτιση του μήκους της ουράς με τον αριθμό των φορτηγών.....	27
Εικόνα 5: Διάγραμμα : Η συσχέτιση του χρόνου αναμονής των φορτηγών σε σχέση με τον αριθμό τους.....	27
Εικόνα 6: Ποσοστό χρήσης φορτωτή ανάλογα με τον αριθμό των φορτηγών.....	27
Εικόνα 7: Διάγραμμα: Ποσότητα παραγωγής ανάλογα με τον αριθμό των φορτηγών .....	28
Εικόνα 8: Διάγραμμα : Συσχέτιση κόστους και αριθμού φορτηγών.....	28
Εικόνα 9: Τυπικό διάγραμμα ροής δομής μοντέλου προσομοίωσης (Banks. 2005)..	35
Εικόνα 10: Αποτελέσματα χρήσης μεθόδου SBO για διαφορετικές θέσεις εργασίας.	45
Εικόνα 11: Διάγραμμα : Μέσοι αθροιστικοί χρόνοι αδράνειας φορτωτή και αναμονής φορτηγού.....	49
Εικόνα 12: Κατολίσθηση με 4 νεκρούς και καταστροφή εξοπλισμού στο μεταλλείο Haryana στην Ινδία (Hindustan Times).....	52
Εικόνα 13: Απεικόνιση συστήματος αυτόματης δυναμικής δρομολόγησης σε ανοιχτό μεταλλείο (hitachiglobal.com access 2022).....	58
Εικόνα 14: Διάγραμμα : Χρόνοι αδράνειας φορτηγών λόγω προβλημάτων στα ελαστικά πριν και μετά την χρήση συστήματος αυτόματης δρομολόγησης (modularmining.com).....	60
Εικόνα 15: Διάγραμμα : Απεικόνιση της κατανομής του κόστους στις διάφορες λειτουργίες ενός μεταλλείου (Bagherpour et al. 2007).....	64
Εικόνα 16: Διάγραμμα : Απεικόνιση κατανομής αρχικού κεφαλαίου για την απόκτηση του μεταλλευτικού εξοπλισμού (Bagherpour et al. 2007).....	65
Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση της αναντιστοιχίας των στόλων των φορτηγών και των φορτωτών. (α) Λειτουργία συστήματος μεταφοράς με πλεονάζοντα αριθμό	

φορτηγών. (β) Λειτουργία συστήματος μεταφοράς με έλλειμα φορτηγών. ( Mohtasham et al. 2021).....	77
Εικόνα 18: Αρχική σελίδα γραφικού περιβάλλοντος για την εισαγωγή των βασικών δεδομένων.....	81
Εικόνα 19: Δεύτερη σελίδα του γραφικού περιβάλλοντος για την εισαγωγή δεδομένων.....	81
Εικόνα 20: Συνέχεια δεύτερης σελίδας γραφικού περιβάλλοντος για την εισαγωγή δεδομένων.....	82
Εικόνα 21: Απεικόνιση αποτελέσματος προγράμματος .....	82
Εικόνα 22: Αναλυτικοί χρόνοι κάθε φορτηγού κ σημείου φόρτωσης.....	83
Εικόνα 23: Αναλυτικοί χρόνοι χρήσης κάθε θέσης εκφόρτωσης.....	83
Εικόνα 24: Τοποθεσία του ορυχείου εντός του Βιετνάμ.....	94
Εικόνα 25: Δορυφορική απεικόνιση του ορυχείου.....	94
Εικόνα 26: Διάγραμμα χρόνων λύσεων (Σύστημα με 100 φορτηγά/φορτωτές).....	98
Εικόνα 27: Διάγραμμα Χρόνου Λύσεων (Σύστημα με 120 φορτηγά/10 φορτωτές) ..	99
Εικόνα 28: Σύστημα Χρόνου Λύσεων (Σύστημα με 120 φορτηγά/8 φορτωτές).....	101
Εικόνα 29: Διάγραμμα Χρόνων Λύσεων (Σύστημα 150 φορτηγά/10 φορτωτές).....	102

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Συμβολισμοί θεωρία Σειρών Αναμονής (Alkass, 2003).....	14
Πίνακας 2 Βασικών εξισώσεων βασικού μονοκαναλικού μοντέλου (M/M/1) (Stevenson 2008).....	24
Πίνακας 3 Δεδομένα χρόνων άφιξης και εξυπηρέτησης φορτηγών και κόστη (Cao Sun, Technology Report, access 2018).....	25
Πίνακας 4 Αποτελέσματα Μοντέλου Αγοράς, Η επίδραση που είχε η μεταβολή του πλήθους των φορτηγών στο σύστημα (μέγεθος ουράς, χρόνος αναμονής φορτηγών, χρήση φορτωτή, κόστη) μπορεί να απεικονιστεί στις Εικόνες 4-8. (Hai, et al. 2018).	26
Πίνακας 5: Δεδομένα για τον στόλο των οχημάτων μεταφοράς) (Amin Moniri-Morad, et al. 2019).....	43

Πίνακας 6: Βελτιστοποίηση απόδοσης κατανομής φορτηγών στο σύστημα φόρτωσης– μεταφοράς.....	45
Πίνακας 7: Ανάλυση κατασκευής μοντέλου προσομοίωσης.....	48
Πίνακας 8: Δομή Εξαγωγής Λύσεων.....	80
Πίνακας 9: Πίνακας συνολικής ποσότητας στειρών και τρόπου μεταφοράς αυτών (Vinacomin 2018):.....	95
Πίνακας 10: Πίνακας χρήσης φορτωτών σε σύστημα με 100 φορτηγά.....	99
Πίνακας 11: Πίνακας χρήσης φορτωτών σε σύστημα με 120 φορτηγά κ 10 φορτωτές .....	100
Πίνακας 12: Πίνακας χρήσης φορτωτών σε σύστημα με 120 φορτηγά κ 8 φορτωτές .....	101
Πίνακας 13: Πίνακας χρήσης φορτωτών σε σύστημα με 150 φορτηγά.....	103
Πίνακας 14: Τμήμα Πίνακα χρήσης φορτηγών σε σύστημα με 150 φορτηγά.....	103

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1.1 Το σύστημα φόρτωσης και μεταφοράς στα υπαίθρια μεταλλεία

Κατά τη λειτουργία ενός μεταλλείου, είναι απαραίτητη η μεταφορά διαφόρων υλικών (μετάλλευμα, στείρο) σε πολύ μεγάλες ποσότητες. Για τη μεταφορά αυτών των υλικών χρησιμοποιούνται διάφορα κατάλληλα συστήματα φόρτωσης και μεταφοράς, έτσι ώστε η διαδικασία της μεταφοράς να είναι ταυτόχρονα αποτελεσματική αλλά και οικονομική.

Στα υπαίθρια μεταλλεία υπάρχουν τρεις μέθοδοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την μεταφορά, είτε αυτόνομα είτε συνδυαστικά. Η πρώτη και πιο διαδεδομένη μέθοδος είναι αυτή με χρήση φορτωτών και φορητών. Έχει το βασικό πλεονέκτημα ότι παρέχει μεγάλη ευελιξία σε σχέση με τις άλλες δύο μεθόδους. Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή με χρήση ταινοδρόμων, ενώ η τρίτη μέθοδος είναι αυτή με χρήση σιδηροδρόμων.

Η παρούσα διπλωματική εξετάζει μόνο τη μέθοδο μεταφοράς με χρήση φορτωτών και φορητών.

## 1.2 Προσδιορισμός του προβλήματος

Το μερίδιο του συνολικού κόστους λειτουργίας που καταλαμβάνει το σύστημα μεταφοράς στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις (σχεδόν 60%) έδωσε το έναυσμα σε πολλούς μηχανικούς του μεταλλευτικού κλάδου, αλλά και στις εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον μεταλλευτικό τομέα, να ξεκινήσουν την αναζήτηση μεθόδων και τρόπων για την αύξηση της παραγωγικότητας του συστήματος μεταφοράς με την ταυτόχρονη μείωση του κόστους λειτουργίας. Ιδιαίτερα στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις, όπου κυριαρχεί το σύστημα μεταφοράς με χρήση φορτωτών και χωματουργικών οχημάτων, οι προσπάθειες έχουν εστιάσει στην εύρεση του βέλτιστου πλήθους οχημάτων που πρέπει να βρίσκονται στο σύστημα και εν συνεχεία στην εύρεση της βέλτιστης κατανομής αυτών.

Όμως οι συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες που κυριαρχούν στις εκμεταλλεύσεις και οι μη σταθεροί παράγοντες λειτουργίας (αλλαγή στόχων παραγωγής, μεταβολή των καιρικών συνθηκών, μεταβολή της τιμής του μεταλλεύματος, μεταβολή του κόστους βασικών αγαθών για την λειτουργία όπως τα καύσιμα κτλ.), κατεύθυναν

τις προσπάθειες βελτιστοποίησης των συστημάτων μεταφοράς στα υπαίθρια μεταλλεία σε λύσεις με στοχαστικό χαρακτήρα, όπως η χρήση της θεωρίας των σειρών αναμονής, η χρήση του στοχαστικού προγραμματισμού και η ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης.

Από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε για τη συγγραφή της παρούσας διπλωματικής αλλά και τη διεθνή βιβλιογραφία, προέκυψε το συμπέρασμα πως παρά τις δεκάδες προσπάθειες που έχουν γίνει για την εύρεση λύσεων στην προσπάθεια βελτιστοποίησης του συστήματος φόρτωσης και μεταφοράς μέχρι και σήμερα δεν έχει βρεθεί κάποια λύση που να λύνει ολοκληρωτικά το πρόβλημα. Τις περισσότερες φορές για να βρεθεί μία αξιόπιστη και κυρίως αποτελεσματική λύση πρέπει να συνδυαστούν αρκετές μέθοδοι βελτιστοποίησης, τόσο κατά το σχεδιασμό του συστήματος όσο και κατά τη λειτουργία του.

### **1.3 Στόχοι της παρούσας εργασίας**

Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι πολλαπλός. Αρχικά αποσκοπεί να δώσει μια εικόνα για τις μεθόδους που εφαρμόζονται με στόχο την βελτιστοποίηση των συστημάτων μεταφοράς στα υπαίθρια μεταλλεία. Επιπλέον, επιδιώκει να διερευνήσει τους λόγους για τους οποίους παρά την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων δεν υπάρχει πάντα το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ο κύριος όμως στόχος είναι η ανάπτυξη ενός προγράμματος σε υπολογιστικό περιβάλλον με βάση μία από τις υπάρχουσες μεθόδους βελτιστοποίησης. Το ζητούμενο είναι αρχικά, να βασίζεται σε έναν σχετικά απλό κώδικα που να μπορεί να αξιοποιηθεί από κάθε ενδιαφερόμενο χρήστη αλλά και να βελτιωθεί – επεξεργαστεί με βάση τις ανάγκες κάθε ενδιαφερόμενου. Επίσης, ιδιαίτερως σημαντική είναι η ύπαρξη γραφικού περιβάλλοντος που καθιστά το πρόγραμμα πολύ εύκολο στη χρήση του.

Ο δευτερεύων στόχος του προγράμματος είναι η χρησιμοποίησή του με βάση κάποια υπαρκτά δεδομένα ώστε να εντοπιστεί η πραγματική αποτελεσματικότητα του αλλά και για να εξαχθούν τα απαραίτητα συμπεράσματα για τη λειτουργία του. Με αυτόν τον τρόπο η εμπειρία που προέρχεται από την ανάπτυξη και χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος, θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στην ανάπτυξη μελλοντικών προγραμμάτων που θα βελτιστοποιούν σε πολύ μεγάλο βαθμό τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος φόρτωσης και μεταφοράς σε μία υπαίθρια εκμετάλλευση.

## **1.4 Το ερευνητικό μέρος της εργασίας**

Στα κεφάλαια 3 και 4 γίνεται η παρουσίαση του ερευνητικού μέρους της εργασίας.

Στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε με χρήση της γλώσσας προγραμματισμού Python, δημιουργήθηκε ένα σύστημα όπου λαμβάνει τις παραμέτρους από ένα γραφικό περιβάλλον WEB και στη συνέχεια παράγει λύσεις μέχρι να καταλήξει στη βέλτιστη λύση με χρήση γενετικών αλγορίθμων. Τα δεδομένα εισάγονται από τον χρήστη ανάλογα με τις ανάγκες που επιθυμεί να καλύψει ή ανάλογα με τα δεδομένα που του είναι διαθέσιμα. Στην περίπτωση του πειραματικού τμήματος της συγκεκριμένης εργασίας τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα τελευταία διαθέσιμα που υπήρχαν σε ελεύθερες πηγές για τη λειτουργία του ανθρακωρυχείου Cao Son στο Βιετνάμ.

Τα δεδομένα που εισήχθησαν αφορούσαν κυρίως την περίοδο λειτουργίας πριν την πανδημία και συγκεκριμένα το ημερολογιακό έτος 2018. Από την εισαγωγή των δεδομένων και την εν συνεχεία εκτέλεση του προγράμματος προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παράγραφο 4.3, τα οποία δίνουν μια σχετικά πλήρη εικόνα για τη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς του συγκεκριμένου ανθρακωρυχείου, αλλά και του προγράμματος συνολικά.

## **1.5 Δομή της εργασίας**

Η διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια και ένα παράρτημα.

Το παρόν Κεφάλαιο 1 της εργασίας αποτελεί εισαγωγή στο θέμα της. Περιγράφει το προς εξέταση πρόβλημα, παρουσιάζει τους στόχους της εργασίας και αναλύει συνοπτικά την ανάπτυξη του κώδικα που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσió της. Τέλος παρουσιάζει τη δομή και τους περιορισμούς της.

Στη συνέχεια ακολουθεί το Κεφάλαιο 2, όπου περιγράφεται λεπτομερώς το σύστημα μεταφοράς με χωματουργικά αυτοκίνητα και φορτωτές στα υπαίθρια μεταλλεία καθώς και οι απαραίτητοι ορισμοί για τη μελέτη και την ανάπτυξη μεθόδων βελτιστοποίησης των μεταφορικών συστημάτων. Στη συνέχεια ακολουθεί η περιγραφή των διάφορων μεθόδων μελέτης και βελτιστοποίησης, όπως η χρήση της θεωρίας των σειρών αναμονής, η χρήση στοχαστικού προγραμματισμού και η χρήση μοντέλων προσομοίωσης. Το Κεφάλαιο 2 ολοκληρώνεται με μία αναλυτική περιγραφή των προβλημάτων που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία του μεταφορικού συστήματος και ιδιαίτερα γίνεται μια



παρουσίαση του βασικού προβλήματος στα συστήματα μεταφοράς. Τέλος το Κεφάλαιο 2 κλείνει με μία αναλυτική περιγραφή του του κόστους μεταφοράς και των μεθόδων που μπορούν να αξιοποιηθούν για την μείωση αυτού.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το θέμα της ανάπτυξης του προγράμματος για τη βελτιστοποίηση των μεταφορικών συστημάτων. Γίνεται μία εισαγωγή στην προγραμματιστική γλώσσα που χρησιμοποιήθηκε, αλλά και στη γενική θεωρία που αποτελεί την βάση σύνθεσης του προγράμματος, όπως είναι ο προγραμματισμός στόχων και ο προγραμματισμός υπό τυχαίους περιορισμούς. Ακολουθεί μία αναλυτική αναφορά στο στόχο του προγράμματος, στον τρόπο ανάπτυξης και στη δομή του. Το Κεφάλαιο 3 ολοκληρώνεται με μία συνοπτική παρουσίαση ενός τμήματος του κώδικα που αναπτύχθηκε, όπου περιλαμβάνεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επιβεβαίωση της λειτουργίας και της αποτελεσματικότητας του προγράμματος που αναπτύχθηκε. Η πειραματική διαδικασία γίνεται με βάση το ορυχείο άνθρακα Cao Son του Βιετνάμ και με δεδομένα που ανακτήθηκαν από τη διεθνή βιβλιογραφία.

Τα Συμπεράσματα είναι το τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας. Σε αυτό γίνεται σύντομη ανακεφαλαίωση των σημαντικότερων πληροφοριών της εργασίας και γίνεται πρόταση για τις κατευθύνσεις στις οποίες θα ήταν καλό να κινηθούν οι μελλοντικές προσπάθειες ανάπτυξης προγραμμάτων για τη βελτιστοποίηση του συστήματος μεταφοράς.

Η διπλωματική εργασία ολοκληρώνεται με την παράθεση των βιβλιογραφικών πηγών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της εργασίας.

Στο Παράρτημα βρίσκεται ο πλήρης κώδικας του προγράμματος βελτιστοποίησης.

## **1.6 Περιορισμοί της εργασίας**

Η παρούσα εργασία δεν αποσκοπεί, ούτε βεβαίως μπορεί, να επιλύσει το πρόβλημα της βελτιστοποίησης του συστήματος φόρτωσης και μεταφοράς στα υπαίθρια μεταλλεία. Αποτελεί εντούτοις μια προσέγγιση του προβλήματος αυτού, που κάνει χρήση γενετικών αλγορίθμων και ενός εύχρηστου κώδικα, η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για μελλοντική έρευνα. Η έλλειψη εμπειρίας

στην κατασκευή υπολογιστικών προγραμμάτων αποτελεί έναν σημαντικό περιορισμό, αφού είναι πολύ πιθανό να μπορεί να κατασκευαστεί το πρόγραμμα με έναν πιο αποτελεσματικό και εύχρηστο τρόπο. Ο σημαντικότερος όμως περιορισμός της εργασίας, ο οποίος επισημαίνεται αρκετές φορές εντός της, είναι η ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από τη διεθνή βιβλιογραφία και όχι από επί τόπου παρατήρηση. Επίσης υπάρχει σημαντική έλλειψη δεδομένων αφού δεν κατέστη δυνατό να βρεθούν όλα όσα ήταν απαραίτητα, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν κατά περιπτώσεις δεδομένα που δεν αφορούν το συγκεκριμένο ανθρακωρυχείο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2.1 Γενική περιγραφή του συστήματος

Στις μεταλλευτικές δραστηριότητες είναι σύνηθες μεγάλες ποσότητες μεταλλεύματος και στείρων να μεταφέρονται εντός των μεταλλευτικών μονάδων με τη χρήση χωματουργικών φορητών κατά την διάρκεια όλου του 24 ώρου. Σήμερα το κόστος μεταφοράς σε μία μεταλλευτική μονάδα αντιπροσωπεύει περίπου το 50-60% του συνολικού κόστους λειτουργίας στα υπαίθρια μεταλλεία, συνεπώς για να μπορούν οι μεταλλευτικές επιχειρήσεις να έχουν βιώσιμες αλλά και κερδοφόρες μονάδες πρέπει συνεχώς να μειώνουν το κόστος λειτουργίας του εξοπλισμού ή να αυξάνουν κατά το δυνατό την συνολική αποδοτικότητα του.

Το κόστος λειτουργίας μπορεί να μειωθεί με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα με την χρήση νεότερων οχημάτων που έχουν μικρότερη κατανάλωση καυσίμων καθώς και μικρότερο κόστος συντήρησης λόγω μικρότερων φθορών ή με την χρήση αν είναι εφικτό οχημάτων μεγαλύτερης δυναμικότητας που με την σειρά τους θα μειώσουν τόσο το απαιτούμενο προσωπικό όσο αντίστοιχα και το κόστος χρήσης. Τα τελευταία χρόνια βέβαια πολλές μεταλλευτικές επιχειρήσεις λόγω μειωμένου προϋπολογισμού στρέφονται στην αύξηση της αποδοτικότητας προσπαθώντας μέσω αυτού να εξοικονομήσουν πόρους χωρίς να χρειαστεί να επενδύσουν σε νέες μονάδες.

Η αύξηση της αποδοτικότητας κατά την χρήση χωματουργικών οχημάτων, αλλά και συστημάτων φόρτωσης, είναι τόσο σημαντική που ακόμα και μια βελτίωση της τάξης του 1% μπορεί να επιφέρει εξοικονόμηση πόρων από μερικές χιλιάδες ευρώ έως και αρκετά εκατομμύρια ανάλογα με το μέγεθος και τη διάρκεια ζωής του μεταλλείου. Για να αυξηθεί η συνολική αποδοτικότητα του εξοπλισμού υπάρχουν δύο τρόποι: 1) είτε με την αύξηση της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού, 2) είτε με καλύτερη χρήση του εξοπλισμού μέσω καλύτερου προγραμματισμού και διαχείρισης αυτού.

#### **Το σύστημα φόρτωσης – μεταφοράς**

Το σύστημα φόρτωσης – μεταφοράς στα υπαίθρια μεταλλεία αποτελείται συνήθως από τα ακόλουθα τρία μέρη: 1) Τα φορητά , 2) Τους εκσκαφείς , 3) Τους φορτωτές. Οι φορτωτές και οι εκσκαφείς είναι υπεύθυνοι για την φόρτωση των φορητών, οι εκσκαφείς συνήθως λόγω του μεγάλου μεγέθους τους και των

μικρών δυνατοτήτων ευκινησίας εντός του μεταλλευτικού χώρου βρίσκονται στο σημείο εξόρυξης. Ο ρόλος των φορτηγών μπορεί να διακριθεί σε τρία επιμέρους τμήματα, 1) μεταφορά μεταλλεύματος από το σημείο εξόρυξης στο σημείο απόθεσης ή στο σημείο επεξεργασίας, 2) μεταφορά μεταλλεύματος από το σημείο απόθεσης στο σημείο επεξεργασίας, 3) μεταφορά στείρων από το σημείο εξόρυξης στο σημείο απόθεσης στείρων.

Ένας πλήρης κύκλος λειτουργίας των μεταλλευτικών φορτηγών διακρίνεται στα διαστήματα που τα οχήματα είναι παραγωγικά και στα διαστήματα που βρίσκονται σε αδράνεια. Η συνήθης διαδικασία που ακολουθούν τα φορτηγά σε ένα μεταλλευτικό κύκλο κατά την οποία δεν είναι σε καθεστώς αδράνειας είναι η μετακίνηση άνευ φόρτου από το σημείο εκκένωσης στο σημείο που βρίσκεται ο φορτωτής/εκσκαφέας και η κατάλληλη στάθμευση στον χώρο για να είναι εφικτή η φόρτωσή τους. Εν συνεχεία ακολουθεί η φόρτωση και τέλος η επιστροφή στον χώρο εκκένωσης έμφορτο. Ο μεγαλύτερος παράγοντας που αυξάνει τον μη παραγωγικό χρόνο των οχημάτων κατά την διάρκεια ενός κύκλου μεταφοράς είναι ο σχηματισμός σειρών αναμονής είτε στο σημείο εξόρυξης είτε στο σημείο απόθεσης. Αντίστοιχα για τους εκσκαφείς και τους φορτωτές ο μεγαλύτερος παράγοντας που συμβάλει στην μείωση της παραγωγικότητας τους είναι η αναμονή για την άφιξη των φορτηγών, συνεπώς σκοπός κάθε μεταλλευτικής μονάδας είναι η κατά το δυνατόν καλύτερη οργάνωση του κύκλου μεταφοράς για να μην βρίσκονται σε αδράνεια οι διάφορες μονάδες εξοπλισμού.

Η επιλογή των κατάλληλων οχημάτων για την λειτουργία μια υπαίθριας μεταλλευτικής μονάδας είναι μία αρκετά σύνθετη διαδικασία που απαιτεί την λήψη κρίσιμων αποφάσεων που θα καθορίσουν ακόμα και την επιβίωση της μεταλλευτικής μονάδας. Τα φορτηγά πρέπει να έχουν τέτοιο μέγεθος που να μπορούν να κυκλοφορήσουν εντός του οδικού δικτύου που έχει δημιουργηθεί μέσα στον μεταλλευτικό χώρο και τα μηχανήματα φόρτωσης να έχουν το κατάλληλο μέγεθος ανάλογα με το ύψος αλλά και το πλάτος των βαθμίδων (θα πρέπει κατά τον σχεδιασμό της μεταλλευτικής να έχει προβλεφθεί και ο μηχανολογικός εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί). Συνεπώς ο αριθμός των οχημάτων που χρειάζονται είναι μία δύσκολη απόφαση που πρέπει να συμπεριλάβει την κάλυψη της αναγκαίας παραγωγής, την αύξηση της αποδοτικότητας και την κατά το δυνατόν μικρότερη αρχική επένδυση. Τέλος σε

καμία περίπτωση αυτός ο αριθμός δεν μένει στάσιμος αφού οι ανάγκες του μεταλλείου είναι συνεχώς μεταβαλλόμενες.

### **Επιλογή μηχανικού εξοπλισμού**

Μέχρι να υιοθετηθούν από την μεταλλευτική βιομηχανία τα διάφορα υπολογιστικά συστήματα η επιλογή του πλήθους αλλά και του τύπου των οχημάτων ήταν μία καθαρά εμπειρική διαδικασία που χαρακτηριζόταν από μεγάλη αβεβαιότητα, αφού ο κύριος παράγοντας που καθόριζε την αποτελεσματικότητα της επιλογής ήταν οι ικανότητες και η εμπειρία του εκάστοτε αναλυτή. Για την λήψη των διάφορων αποφάσεων για τον κύκλο μεταφοράς ο αναλυτής προσπαθούσε να υπολογίσει τη μέση διάρκεια για τις διάφορες διαδικασίες όπως η φόρτωση, η εκκένωση, η αναμονή και οι χρόνοι κίνησης. Τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου ήταν ότι δεν μπορούσε να λάβει υπόψη τις μεταβολές στον κύκλο μεταφοράς κατά τη λειτουργία της εκμετάλλευσης αφού θεωρούσε ότι όλοι οι κύκλοι γίνονται στην ίδια ακριβώς διάρκεια και ότι η αποτελεσματικότητα των οχημάτων είναι ανεξάρτητη του αριθμού τους (Deshmukh, 1970).

Μια άλλη κοινή μέθοδος για τη μοντελοποίηση συστημάτων στόλου-φορτωτή είναι η στοχαστική προσομοίωση. Στη στοχαστική προσομοίωση μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών δημιουργεί κατανομές πιθανοτήτων από μια στοχαστική μεταβλητή με βάση δεδομένα από χρονικές μελέτες. Αυτό γίνεται για να ληφθεί μια ακολουθία μεταβλητών χρόνου που μπορεί να προκύψουν κατά τη διάρκεια πραγματικών λειτουργιών. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση τιμών για φάσεις του κύκλου μεταφοράς, όπως η διάρκεια φόρτωσης, η διάρκεια εκκένωσης ή η διάρκεια των διάφορων αναμονών. Δημιουργείται έτσι ένα μοντέλο του κύκλου μεταφοράς με βάση τη διάρκεια φόρτωσης, μεταφοράς και αναμονής που ελήφθησαν μέσω της προσομοίωσης (Deshmukh, 1970). Τα προγράμματα προσομοίωσης για υπολογιστή μπορούν να εκτελέσουν γρήγορα αυτές τις προσομοιώσεις και ο βέλτιστος αριθμός φορτηγών μπορεί να βρεθεί συγκρίνοντας μοντέλα μιας δεδομένης διαδρομής μεταφοράς που χρησιμοποιούν διαφορετικά μεγέθη στόλου.

Λόγω της στοχαστικής και δυναμικής φύσης των αλληλεπιδράσεων φορτωτή-φορτηγού, διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των απαιτήσεων στόλου αποδίδουν διαφορετικά μεγέθη στόλου για τις ίδιες παραμέτρους εισόδου. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην

υποτιθέμενες κατανομές πιθανοτήτων που εφαρμόζονται σε μεταβλητές του κύκλου και στις διάρκειες αναμονής για τα φορτηγά και τους φορτωτές που υπολογίστηκαν με βάση αυτές τις υποθέσεις (Krause and Musingwini, 2007).

Μία ακόμα μέθοδος είναι η θεωρία ουρών (σειρών αναμονής) που αναπτύχθηκε για να μοντελοποιήσει συστήματα που παρέχουν υπηρεσίες, όταν οι απαιτήσεις του συστήματος δεν ακολουθούν μία νόρμα αλλά εμφανίζονται με τυχαίο τρόπο, ώστε να προβλέπει τη συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων. Ένα σύστημα ουράς είναι αυτό στο οποίο οι «πελάτες» φτάνουν στο σημείο εξυπηρέτησης, περιμένουν να εξυπηρετηθούν στην περίπτωση που δεν είναι άμεσα διαθέσιμη η δυνατότητα εξυπηρέτησης και εν συνεχεία προχωρούν στο επόμενο σημείο εξυπηρέτησης αφού έχουν εξυπηρετηθεί (Gross and Harris, 1998). Στην περίπτωση των συστημάτων μεταφοράς σε ένα ορυχείο, τα φορτηγά είναι οι «πελάτες» στο σύστημα αναμονής, που ίσως χρειαστεί να περιμένουν στον φορτωτή και στη θέση εκκένωσης.

#### Φάσεις του κύκλου μεταφοράς

Ο σχεδιασμός του συστήματος φόρτωσης και μεταφοράς είναι μια αρκετά περίπλοκη διαδικασία, που διακρίνεται σε τμήματα, που αν όμως εφαρμοστεί με τον σωστό τρόπο μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση οικονομικών πόρων.

Το σύστημα φόρτωσης και μεταφοράς των εξορυγμένων προϊόντων εντός μίας εκμετάλλευσης διαχωρίζεται σε τρία επιμέρους τμήματα.

- Τις θέσεις φόρτωσης.
- Το δίκτυο μεταφοράς (δρόμοι).
- Τις θέσεις εκκένωσης των χωματουργικών οχημάτων.



## **2.2.1 Μελέτη του συστήματος με την χρήση των μοντέλων από την θεωρία της σειράς αναμονής**

### **Γενική περιγραφή της θεωρίας των σειρών αναμονής (ουράς)**

Η θεωρία της σειράς αναμονής ασχολείται με την μελέτη των χρόνων αδράνειας που δημιουργούνται σε οποιοδήποτε σύστημα. Η θεωρία της σειράς αναμονής εξετάζει κάθε στοιχείο της αναμονής στην ουρά, συμπεριλαμβανομένης της διαδικασίας άφιξης, της διαδικασίας εξυπηρέτησης, του πλήθους των θέσεων εξυπηρέτησης, του πλήθους των θέσεων του συστήματος και του πλήθους των πελατών — που μπορεί να είναι άτομα, πακέτα δεδομένων, πρώτες ύλες ή ο,τιδήποτε άλλο.

Η αφετηρία της θεωρίας της σειράς αναμονής μπορεί να εντοπιστεί στις αρχές του 1900 σε μια μελέτη του τηλεφωνικού κέντρου της Κοπεγχάγης από τον Agner Kragup Erlang, έναν Δανό μηχανικό, στατιστικολόγο και μαθηματικό. Το έργο του οδήγησε στη θεωρία Erlang των αποδοτικών δικτύων και στον τομέα της ανάλυσης τηλεφωνικών δικτύων (Investopedia queueing theory 2021).

Η θεωρία των σειρών αναμονής βασίζεται εξ ολοκλήρου στα μαθηματικά και η σωστή εφαρμογή της μπορεί να αποκαλύψει σημαντικά προβλήματα στον σχεδιασμό εν προκειμένω μιας μεταλλευτικής εκμετάλλευσης και κατά συνέπεια να συμβάλει στην πραγματοποίηση διορθωτικών κινήσεων με σκοπό την μεγιστοποίηση της απόδοσης και την ελαχιστοποίηση του κόστους.

### **Διεργασίες που ακολουθεί η θεωρία των σειρών αναμονής**

#### *Διεργασία άφιξης*

Το πλήθος των πελατών του συστήματος της θεωρίας των σειρών αναμονής συνήθως μετράτε και περιγράφεται από τις αφίξεις ανά μονάδα χρόνου (ρυθμός αφίξεων) ή από τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ των αφίξεων. Η σχέση αυτών των δύο τιμών είναι καλά καθορισμένη και κάθε μία από αυτές είναι ικανή να περιγράψει επακριβώς το σύστημα αφίξεων.

Στην καθημερινότητα δεν υπάρχει μία προκαθορισμένη ακολουθία αφίξεων, αλλά αντίθετα οι αφίξεις έχουν στοχαστικό χαρακτήρα, δηλαδή διέπονται από μεγάλη αβεβαιότητα τόσο ως προς τον χρόνο άφιξης όσο και ως προς το πλήθος. Στην θεωρία των σειρών αναμονής οι μέσες τιμές δείχνουν μία τάση αλλά δεν επαρκούν

για την περιγραφή του συστήματος, συνεπώς είναι απαραίτητη η χρήση κάποιου είδους στατιστικής κατανομής έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η ακριβής περιγραφή του συστήματος.

#### *Διαδικασία εξυπηρέτησης*

Η διαδικασία εξυπηρέτησης είναι συνάρτηση τριών παραγόντων. Του πλήθους των θέσεων εξυπηρέτησης, του αριθμού των φάσεων εξυπηρέτησης, καθώς και του χρόνου που απαιτείται για την εξυπηρέτηση του εκάστοτε πελάτη. Η διαδικασία εξυπηρέτησης μπορεί να λειτουργεί με ένα από τα ακόλουθα 4 πρότυπα.

1. Μία θέση εξυπηρέτησης και μία φάση εξυπηρέτησης.
2. Μία θέση εξυπηρέτησης σε συνδυασμό με πολλαπλές φάσεις.
3. Πολλαπλές θέσεις εξυπηρέτησης με μόνο μία φάση (παράλληλος τρόπος λειτουργίας).
4. Πολλαπλές θέσεις εξυπηρέτησης με πολλαπλές φάσεις.

Το σημαντικότερο ίσως όμως στοιχείο της διαδικασίας εξυπηρέτησης στην θεωρία των σειρών αναμονής είναι ο χρόνος. Αυτός μπορεί να οριστεί είτε από το μέσο αριθμό πελατών που εξυπηρετούνται ανά μονάδα χρόνου, είτε από τον χρόνο που απαιτείται για την εξυπηρέτηση ενός πελάτη. Και στις δύο περιπτώσεις είναι αναγκαίο το σύστημα να μην είναι άδειο καθώς σε αντίθετη περίπτωση το σύστημα εξυπηρέτησης δεν έχει λόγο ύπαρξης. Και οι δύο αυτές τιμές μπορεί να έχουν τόσο ντετερμινιστικό χαρακτήρα, όσο και πιθανολογικό.

#### *Νόμος προτεραιότητας εξυπηρέτησης*

Ο νόμος προτεραιότητας εξυπηρέτησης στην ουρά αντιπροσωπεύει τον τρόπο οργάνωσης της ουράς (κανόνες εισόδου και εξόδου πελατών προς/από την ουρά).

Υπάρχουν οι παρακάτω τρόποι:

- 1) FIFO (First In First Out) που ονομάζεται επίσης FCFS (First Come First Serve) όπου ο πρώτος πελάτης που θα αφιχθεί θα εξυπηρετηθεί και πρώτος,
- 2) LIFO (Last In First Out) που ονομάζεται επίσης LCFS (Last Come First Serve) όπου ο τελευταίος πελάτης που θα αφιχθεί θα εξυπηρετηθεί πρώτος,
- 3) SIRO (Serve In Random Order) όπου η εξυπηρέτηση γίνεται με τυχαίο τρόπο,
- 4) PQ (=Priority Queue) , όπου δεν λαμβάνεται υπόψη ο χρόνος άφιξης αλλά αντίθετα οι ιδιότητες του πελάτη.



### Χωρητικότητα του συστήματος

Η χωρητικότητα του συστήματος αναφέρεται στο μέγιστο πλήθος πελατών που μπορεί να εξυπηρετήσει και εξαρτάται από τον διαθέσιμο χώρο αναμονής. Η χωρητικότητα ενός συστήματος μπορεί είτε να έχει συγκεκριμένα όρια και εξαρτάται από την μέγιστη ουρά που μπορεί να εξυπηρετήσει είτε να είναι απεριόριστη. Στα συστήματα που η χωρητικότητα είναι περιορισμένη, αν ο ρυθμός αφίξεων υπερβεί τον ρυθμό εξυπηρέτησης μπορεί να δημιουργηθούν σοβαρά προβλήματα ή ακόμα και να προκληθεί κατάρρευση του συστήματος.

Συμβολισμός που χρησιμοποιείται στην θεωρία των σειρών αναμονής

Στην διεθνή βιβλιογραφία έχει καθιερωθεί ένας συμβολισμός για την θεωρία των σειρών αναμονής, ο οποίος βασίζεται στον Kendall. Με βάση αυτό τον συμβολισμό ένα σύστημα περιγράφεται ως A/B/X/Y/Z. Στον Πίνακα 1 διακρίνεται ο συγκεκριμένος συμβολισμός, ενώ πρέπει να τονιστεί ότι οι παράμετροι Y, Z πολλές φορές παραλείπονται στην περιγραφή του συστήματος.

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚ Ο	ΣΥΜΒΟΛΟ	ΕΠΕΞΗΓΗΣΗ
(A) Κατανομή αφίξεων (B) Κατανομή εξυπηρέτησης	M D $E_k$ G PH	Εκθετική Ντετερμινιστική Erlang k τάξης με $k=1,2,\dots$ Γενική κατανομή Κατανομή τύπου φάσεων
(X) Αριθμός παράλληλων μονάδων εξυπηρέτησης	1,2,3,..., $\infty$	
(Y) Χωρητικότητα συστήματος	1,2,3,..., $\infty$	
(Z) Νόμος προτεραιότητας εξυπηρέτησης	FIFO/FCFS LIFO/LCFS SIRO PQ	

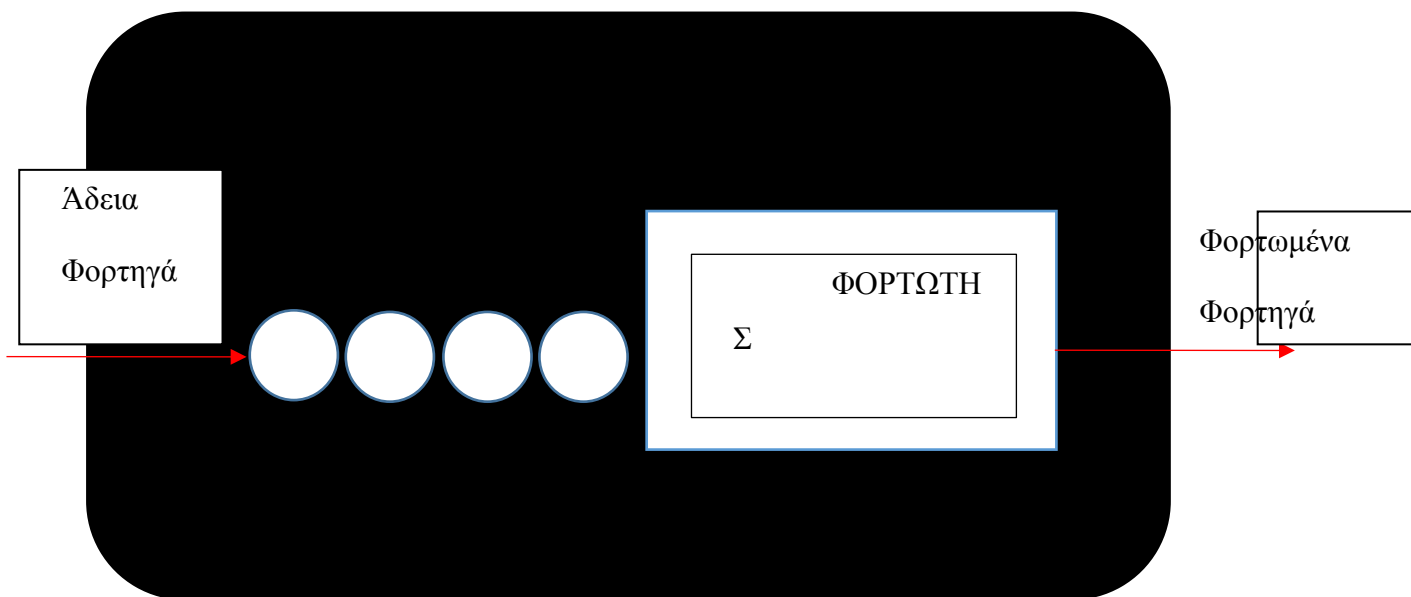
Η εφαρμογή της θεωρίας των σειρών αναμονής στην μεταλλευτική βιομηχανία

Τα περισσότερα μεταλλεία υπαίθριας εκμετάλλευσης χρησιμοποιούν συστήματα φορτηγών και φορτωτών για τη μεταφορά μεταλλεύματος και στείρων. Ωστόσο υπάρχει αυξημένη δυσκολία να προσδιοριστεί το σωστό πλήθος φορτηγών που θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε αυτά τα συστήματα λόγω της δυναμικής φύσης των συστημάτων μεταφοράς και φόρτωσης εντός των μεταλλείων. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μέθοδοι μοντελοποίησης και προσομοίωσης του συστήματος όπως έχει ήδη αναφερθεί και οι εταιρείες αναζητούν συνεχώς τρόπους για ταχύτερα και πιο ακριβή δεδομένα για να μπορούν να προβλέψουν με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια την απόδοση του εξοπλισμού. Η θεωρία της σειράς αναμονής από την πλευρά της παρουσιάζει μια αρκετά αποτελεσματική μέθοδο για τον σχεδιασμό του συστήματος μεταφοράς και εστιάζει στον χρόνο αδράνειας που προκαλείται από τα φορτηγά που περιμένουν να εξυπηρετηθούν είτε στην φάση φόρτωσης είτε στην φάση εκκένωσης. Όταν τα φορτηγά και οι φορτωτές αντιπροσωπεύονται ως διακομιστές και πελάτες σε ένα δίκτυο αναμονής, μπορεί να προσδιοριστεί το πλήθος μηχανολογικού εξοπλισμού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε ένα μεταλλείο διασφαλίζοντας ότι οι ανάγκες παραγωγής μπορούν να καλυφθούν, διατηρώντας παράλληλα την αποτελεσματική χρήση του εξοπλισμού.

Στις εργασίες εξόρυξης, συχνά σχηματίζονται ουρές κατά τη διαδικασία μεταφοράς καθώς φτάνουν τα φορτηγά στους φορτωτές, τους θραυστήρες και στις θέσεις εκκένωσης και πρέπει να περιμένουν τη σειρά τους στην ουρά. Αυτή η διαδικασία μπορεί να αναπαρίσταται χρησιμοποιώντας δίκτυα σειρών αναμονής όπου τα φορτηγά μεταφοράς αντιπροσωπεύουν τους πελάτες στο σύστημα και οι διακομιστές είναι οι φορτωτές ή οι θραυστήρες όπου περιμένουν τα φορτηγά. Όταν απεικονίζονται οι λειτουργίες ενός συστήματος φόρτωσης και μεταφοράς σε ένα μεταλλείο με βάση τα συστήματα της θεωρίας της σειράς αναμονής, ο χρόνος που αφιερώνει ένα φορτηγό για να βρεθεί στην κατάλληλη θέση μπορεί να θεωρηθεί είτε ως μέρος του χρόνου του κύκλου φόρτωσης είτε ως μέρος του

χρόνου που ήταν το φορτηγό σε κατάσταση αναμονής στην ουρά για να εξυπηρετηθεί.

Τα περισσότερα συστήματα φόρτωσης και μεταφοράς έχουν τέσσερις βασικές φάσεις: φόρτωση, διάρκεια ταξιδιού με φορτίο, εκκένωση και διάρκεια ταξιδιού χωρίς φορτίο. Αυτές οι φάσεις επαναλαμβάνονται διαδοχικά σε όλη τη διάρκεια της μεταφοράς, και αντιπροσωπεύονται εύκολα από μια κυκλική ουρά, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2, όπου οι κύκλοι αντιπροσωπεύουν τα φορτηγά και το ορθογώνιο τον φορτωτή. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι διαδρομές μπορούν να θεωρηθούν ως διακομιστές χωρίς όμως τον φορτωτή και τον θραυστήρα, αφού οι διαδρομές είναι απαραίτητα βήματα στον κύκλο παραγωγής και ο χρόνος που θα χρειαστεί κάθε μεμονωμένο φορτηγό για την ολοκλήρωση του ταξιδιού δεν είναι σταθερός σε όλη τη βάρδια παραγωγής, έτσι είναι δυνατό να εκχωρηθεί μια διαδικασία υπηρεσίας στις διαδρομές και να αντιμετωπιστούν ως διακομιστές, παρόλο που δεν θα σχηματιστούν ουρές, αφού πολλά φορτηγά μπορούν να βρίσκονται ταυτόχρονα στους δρόμους μεταφοράς.



Εικόνα 2: Βασικό σύστημα ουράς φορτωτή – φορτηγών

Ο παραπάνω κύκλος στην πραγματικότητα είναι αρκετά πιο σύνθετος αφού συνήθως υπάρχουν παραπάνω από ένας φορτωτής, υπάρχουν οι θέσεις εκκένωσης του μεταλλεύματος και των στείρων αλλά στην ουσία η δομή παραμένει η ίδια. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί η θεωρία των σειρών αναμονής, όταν υπάρχουν πολλά μονοπάτια διαθέσιμα για τα φορτηγά, όμως για να μπορέσει να λειτουργήσει αυτός ο τύπος μοντέλου ουράς, είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν μετρήσεις για

τον προσδιορισμό της πιθανότητας που έχει κάθε φορτηγό να ακολουθήσει μία διαδρομή. Αυτό θα μπορούσε να εξαρτάται από τη συμφόρηση σε ένα τμήμα του συστήματος, τα χαρακτηριστικά του καθενός μεμονωμένου διακομιστή, το περιεχόμενο του φορτίου του φορτηγού (χρήσιμο υλικό ή στείρα) και διάφορους άλλους παράγοντες.

Τα μεταλλεία που έχουν ταυτόχρονα σε λειτουργία περισσότερα από ένα σημεία εξόρυξης μπορούν να αντιμετωπίζουν το σύστημα μεταφοράς, με βάση την θεωρία των σειρών αναμονής, με δύο τρόπους. Είτε κάθε σημείο εξόρυξης αντιμετωπίζεται ως ένα σύστημα ουράς με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει κοινό σημείο μεταξύ των συστημάτων, είτε αν τα σημεία εξόρυξης μοιράζονται ένα τμήμα του συστήματος, π.χ. τον φορτωτή, δημιουργείται ένα ενιαίο δίκτυο ουρών με υποσυστήματα για κάθε σημείο εξόρυξης.

Η ιστορία της εφαρμογής των σειρών αναμονής στην μεταλλευτική βιομηχανία

Ο Ernest Koenigsberg ήταν ο πρώτος που εφάρμοσε τη θεωρία της ουράς σε μεταλλευτικές δραστηριότητες το 1958. Η έρευνά του ασχολήθηκε με τα πρότυπα υπηρεσιών και τα αποτελέσματα για ένα σύστημα ουράς κλειστού βρόχου που εξυπηρετεί έναν πεπερασμένο αριθμό πελατών. Σε αυτό το κυκλικό σύστημα, ένας πελάτης που είχε ολοκληρώσει την υπηρεσία στο στάδιο Μ επανερχόταν στην ουρά στο πρώτο στάδιο. Η κατανομή του χρόνου υπηρεσίας θεωρούνταν εκθετική. Οι υπολογισμοί πραγματοποιούνταν για συμβατικές μηχανοποιημένες εργασίες υπόγειας εξόρυξης, στις οποίες ένα τμήμα, που αποτελούνταν από μια ομάδα εξειδικευμένων μηχανημάτων και των βοηθητικών αυτών, εργαζόταν διαδοχικά σε πολλά μέτωπα εξόρυξης. Κάθε μέτωπο εξόρυξης επεξεργαζόταν διαδοχικά από μια μηχανή κοπής, μια μηχανή γεώτρησης, ένα συνεργείο ανατινάξεων, μια ομάδα μηχανών φόρτωσης και μια μηχανή ξυλείας ή κατασκευής της οροφής. Κάθε μηχανή προχωρούσε στο επόμενο μέτωπο εξόρυξης αφού είχε ολοκληρώσει την εργασία της (Koenigsberg, 1958).

Ο σκοπός του Koenigsberg για αυτό το σύστημα ουρών ήταν να εξετάσει τα μηχανήματα που βρίσκονταν σε ουρά έτσι ώστε να εξυπηρετούνται τα μέτωπα εξόρυξης με σταθερή σειρά και αυτά τα μέτωπα εξόρυξης που βρίσκονταν σε κατάσταση αναμονής για επεξεργασία να εξυπηρετούνταν με σειρά προτεραιότητας. Οι εξισώσεις της θεωρίας της σειράς αναμονής εφαρμόζονταν για να προσδιοριστεί ο αριθμός μονάδων σε μια δεδομένη κατάσταση, ο αριθμός

μονάδων που ανέμεναν να εξυπηρετηθούν σε μια δεδομένη κατάσταση, ο μέσος χρόνος κύκλου και η ημερήσια παραγωγή. Αυτές οι εξισώσεις μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για σύγκριση με διαφορετικές περιπτώσεις σε διάφορους αριθμούς πελατών και διακομιστών. Ο Koenigsberg βρήκε ότι η παραγωγικότητα αυξάνεται όταν ο αριθμός των μετώπων εξόρυξης  $N$  που βρίσκονται σε κατάσταση επεξεργασίας αυξάνεται και επίσης ότι ο ρυθμός μεταβολής της αύξησης μειώνεται με την αύξηση του  $N$  και περιορίζεται από τον ρυθμό εξυπηρέτησης της πιο αργής μηχανής (Koenigsberg, 1958).

Η θεωρία της ουράς στην συνέχεια απέκτησε δημοτικότητα ως μέθοδος επιλογής στόλου και ανάλυσης κύκλου μεταφοράς στις δεκαετίες του 1970 και του 1980. Τα μοντέλα προσομοίωσης ήταν μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική για την ανάλυση των συστημάτων φορτηγών – φορτωτών κατά τη διάρκεια αυτής της χρονικής περιόδου, επειδή μπορούσαν να παρέχουν χρήσιμα αποτελέσματα για τη μεταβλητότητα που υπάρχει στα συστήματα μεταφοράς (Barnes, et al. 1979). Όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα της προσομοίωσης σε υπολογιστή εκείνη την περίοδο ήταν οι λιγιστές δυνατότητες των υπολογιστών στον τομέα της αποθήκευσης και οι αργοί επεξεργαστές, πράγμα που καθιστούσε την μέθοδο των προσομοιώσεων δαπανηρή και χρονοβόρα. Αντίθετα αναλυτικές μέθοδοι μοντελοποίησης με πολύ μικρές απαιτήσεις, όπως η θεωρία των ουρών, ήταν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση (Billette, 1986).

Το 1973 οι Maher και Cabrera εφάρμοσαν τη θεωρία της κυκλικής σειράς αναμονής στα συστήματα μεταφοράς στις χωματουργικές εργασίες σε οικοδομικά έργα που ήταν παρόμοια με τα συστήματα μεταφορών που χρησιμοποιούνταν στην εξόρυξη στα υπαίθρια μεταλλεία. Η θεωρία της σειράς αναμονής χρησιμοποιήθηκε για να βρεθεί το βέλτιστο πλήθος φορτηγών που έπρεπε να χρησιμοποιηθεί για να ελαχιστοποιηθεί το κόστος σε σύγκριση με τον όγκο της επιφάνειας που μετακινήθηκε. Το σύστημα μεταφορών αναλύθηκε με βάση αν ο ρυθμός αφίξεων είναι σταθερός ή μεταβλητός χρησιμοποιώντας αρνητική εκθετική κατανομή. Αυτή η μελέτη επίσης αναγνώρισε ότι με περισσότερους από έναν εκσκαφέα σε λειτουργία το σύστημα μπορεί να έχει είτε δύο χωριστά συστήματα σειρών αναμονής είτε να λειτουργεί σε μία κοινή σειρά. Το τελικό αποτέλεσμα αυτής της μοντελοποίησης ήταν ένα σύνολο διαγραμμάτων που οδηγούσε στην επιλογή του βέλτιστου αριθμού φορτηγών από άποψη κόστους με βάση την αναλογία του

χρόνου φόρτωσης και του χρόνου μεταφοράς καθώς και με βάση την αναλογία του κόστους λειτουργίας του φορτωτή και των φορτηγών (Maher and Cabrera 1973). Αυτά τα γραφήματα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε χωματουργική ή εξορυκτική εργασία εφόσον τα δεδομένα σχετικά με το κόστος και τον χρόνο κύκλου ήταν γνωστά.

Το 1977 ο Jorgen Elbrond ανέπτυξε μια απλή τεχνική διαμόρφωσης του συστήματος μεταφοράς και λειτουργίας ενός υπαίθριου μεταλλείου βασισμένη στην θεωρία των σειρών αναμονής που χρησιμοποιήθηκε ως εναλλακτική λύση στην προσομοίωση με υπολογιστή. Η τεχνική του Elbrond βασίστηκε στη μέθοδο της θεωρίας της σειράς αναμονής για το χρόνο αναμονής σε κλειστό κύκλωμα με πρόσθετους συντελεστές διόρθωσης που αντικατοπτρίζουν την μεταβλητότητα στη φόρτωση, τη διαδρομή και την εκκένωση. Οι χρόνοι αναμονής στις θέσεις ανεφοδιασμού υπολογίστηκαν ως συνάρτηση του αριθμού των φορτηγών στο κύκλωμα με τον μέσο όρο των αποτελεσμάτων που βρέθηκαν μέσω προσομοιώσεων για τρεις διαφορετικές περιπτώσεις: σταθερός χρόνος ταξιδιού και σταθερός χρόνος εξυπηρέτησης, εκθετικά κατανομημένος χρόνος ταξιδιού και εκθετικά κατανομημένος χρόνος εξυπηρέτησης, εκθετικά κατανομημένος χρόνος ταξιδιού και σταθερός χρόνος εξυπηρέτησης. Οι συντελεστές διόρθωσης υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας μια διαδικασία που συνδύαζε θεωρητικά δεδομένα και προσομοιωμένες περιπτώσεις. Άλλα δεδομένα σχετικά με τον κύκλο μεταφοράς, όπως ο χρόνος εκκένωσης και η σύνθεση της βάρδιας εντοπίστηκαν χρησιμοποιώντας μελέτες χρόνου. Μόλις η μέθοδος του Elbrond αναπτύχθηκε πλήρως, πραγματοποιήθηκαν μελέτες στην τότε Hamersley Iron και βρέθηκε ένας συντελεστής συσχέτισης 0,865 μεταξύ των παρατηρούμενων και των υπολογισμένων χρόνων αναμονής στους φορτωτές (Elbrond, 1977). Αυτό κατέδειξε ότι η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε ήταν μια αρκετά ακριβής μέθοδος μοντελοποίησης των συστημάτων μεταφορών, ειδικά για εκείνη την περίοδο.

Οι Barnes, King και Johnson προσέγγισαν την θεωρία των σειρών αναμονής ως μια οικονομική εναλλακτική λύση στην τότε ακριβή μέθοδο της προσομοίωσης σε υπολογιστή και ως μια λύση στις ανακριβείς μεθόδους κατανομής των οχημάτων και του συντελεστή απόδοσης του συστήματος που λάμβαναν χώρα εκείνη την περίοδο στα υπαίθρια μεταλλεία. Στην μελέτη τους ουσιαστικά γίνεται μία σύγκριση της μεθόδου του Koenigsberg που κάνει χρήση κυκλικών ουρών και

στην μέθοδο του Elbrond που χρησιμοποιεί πεπερασμένες ουρές. Ενώ, τέλος, και οι δύο μέθοδοι συγκρίνονται με την μέθοδο της στοχαστικής προσομοίωσης. Ο στόχος αυτής της σύγκρισης ήταν η παρατήρηση οποιασδήποτε συστηματικής σχέσης μεταξύ των εκτιμήσεων που βρέθηκαν χρησιμοποιώντας κάθε μέθοδο. (Barnes et al. 1979)

Αυτή η σύγκριση διαπίστωσε ότι η στοχαστική προσομοίωση είναι πιο ευέλικτη μέθοδος από τη θεωρία των σειρών αναμονής και παρέχει πιο ακριβή αποτελέσματα. Σε αντίθεση με τις μεθόδους που βασίζονται στη θεωρία ουρών, η προσομοίωση δεν προϋποθέτει συνθήκες σταθερής κατάστασης για το σύνολο του χρόνου που διαρκεί ο κύκλος. Η προσομοίωση είναι σε θέση να υπολογίσει τον χρόνο εκκίνησης και το τέλος της δραστηριότητας της βάρδιας. Τα κύρια μειονεκτήματα που σχετίζονταν εκείνη την εποχή με τη στοχαστική προσομοίωση ήταν ο σημαντικός χρόνος και οι υψηλές ανάγκες σε ανθρώπινο δυναμικό που απαιτούνταν για την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης, καθώς επίσης και οι χαμηλές δυνατότητες των υπολογιστών που χρησιμοποιούνταν εκείνη την περίοδο για την εκτέλεση της προσομοίωσης. Αυτή η μελέτη διαπίστωσε ότι τα μοντέλα της κυκλικής ουράς εκείνης της εποχής, όπως το μοντέλο του Koenigsberg, δεν ήταν επαρκής μέθοδος για την εκτίμηση της παραγωγικότητας του συστήματος μεταφοράς και φόρτωσης. Αυτό οφειλόταν σε μεγάλο βαθμό στην μαθηματική απαίτηση ότι όλοι οι χρόνοι για κάθε διεργασία είναι εκθετικά κατανομημένοι. Αυτό είχε σαν συνέπεια να εμφανίζονται πολύ έντονα φαινόμενα αναντιστοιχίας και συσσώρευσης των οχημάτων σε μία θέση, με αποτέλεσμα η παραγωγικότητα του συστήματος να είναι πολύ μικρή. Το συμπέρασμα ήταν ότι αυτή η μέθοδος δεν παράγει μια αληθινή αναπαράσταση της δυναμικότητας και της ικανότητας κάθε συστήματος.

Αντίθετα, η εφαρμογή της θεωρίας πεπερασμένης ουράς του Elbrond μπορούσε να παράγει μια αρκετά ακριβή εκτίμηση της παραγωγικής ικανότητας του συστήματος εφαρμόζοντας έναν συντελεστή διόρθωσης που λάμβανε υπόψη τα αποτελέσματα που βρέθηκαν χρησιμοποιώντας εκθετικά κατανομημένους χρόνους δραστηριότητας. Οι Barnes, King και Johnson όμως κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι ενώ η θεωρία της πεπερασμένης ουράς του Elbrond παράγει ένα πιο ακριβές μοντέλο από ότι οι κυκλικές ουρές του Koenigsberg, χρειάζονταν σημαντικές τροποποιήσεις είτε στους διορθωτικούς παράγοντες είτε στην ίδια τη μέθοδο για

να πλησιάσει περισσότερο στην πραγματική λειτουργία του συστήματος και στα αποτελέσματα που αυτή προκαλεί (Barnes et al. 1979).

Το 2002 ο Khalil El-Moslmani δημιούργησε το μοντέλο FLSELECTOR. Το μοντέλο βασιζόταν στην θεωρία των σειρών αναμονής και είχε σκοπό να μοντελοποιήσει ένα σύστημα μεταφοράς πολλών φορτωτών και φορτηγών. Το μοντέλο είχε σαν βάση την υπόθεση ότι οι χρόνοι ταξιδιού των φορτηγών ακολουθούσαν αρνητική εκθετική κατανομή, ενώ οι χρόνοι φόρτωσης ακολουθούσαν μία κατανομή Erlang με τρεις ή λιγότερους διακομιστές (φορτωτές).

Το μοντέλο ουράς του El-Moslmani λυνόταν με σκοπό να ληφθούν τιμές όπως η χρήση διακομιστή που στην συνέχεια χρησιμοποιούνταν στον υπολογισμό της παραγωγής του συστήματος. Ουσιαστικά το υπολογιστικό πρόγραμμα FLSELECTOR, χρησιμοποιούνταν με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους του στόλου. Το FLSELECTOR υλοποιήθηκε με χρήση της Visual Basic για εφαρμογή (VBA) και με την χρήση Microsoft Excel και επέτρεπε την επιλογή ενός βέλτιστου στόλου βάσει του ελάχιστου κόστους, της μέγιστης παραγωγής ή της ελάχιστης διάρκειας του έργου (El-Moslmani et al. 2002).

Το FLSELECTOR επέτρεπε επίσης στο χρήστη να συγκρίνει τις διαφορετικές εκροές παραγωγής που θα προέκυπταν αν χρησιμοποιούνταν διαφορετικές διαδρομές μεταφοράς από το σημείο φόρτωσης στο σημείο απόρριψης (Alkass et al. 2003). Όταν ο χρήστης εισήγαγε τα δεδομένα και εκτελούσε το πρόγραμμα λάμβανε ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου τα αντίστοιχα διαγράμματα για τις δέκα καλύτερες διαμορφώσεις του στόλου που θα μπορούσε να εφαρμόσει. Επίσης ο χρήστης λάμβανε δεδομένα για τον ρυθμό των αφίξεων, τον ρυθμό εξυπηρέτησης, την χρήση των φορτωτών, την παραγωγή, το κόστος, την διάρκεια κάθε εργασίας ενώ τέλος υπολογιζόταν το κόστος ανά μονάδα για κάθε στόλο. Ο υπολογισμός των παραπάνω δεδομένων διαρκούσε λίγα δευτερόλεπτα για συστήματα με έναν διακομιστή και έναν τύπο φορτηγού και έφτανε μέχρι και τα δέκα λεπτά για πιο πολύπλοκα συστήματα όπως αυτά με τρεις διακομιστές και παραπάνω από δύο τύπους φορτηγών (El-Moslmani et al. 2002).

Η απόδοση του FLSELECTOR συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από μοντέλα προσομοίωσης και ντετερμινιστικές μεθόδους. Κατά τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με εκείνα από ντετερμινιστικά μοντέλα, το FLSELECTOR



έδωσε μικρότερες τιμές παραγωγής από το αντίστοιχο ντετερμινιστικό μοντέλο. Αυτό συμφωνούσε με τις μελέτες που είχαν υλοποιηθεί και οι οποίες είχαν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα ντετερμινιστικά μοντέλα τείνουν να υπερεκτιμούν τις τιμές παραγωγής. Από την άλλη πλευρά το FLSELECTOR έδινε αποτελέσματα σχετικά παρόμοια με αυτά ενός άλλου μοντέλου προσομοίωσης (Sim Earth). Η σύγκριση έδειξε ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων διέφεραν κατά μέσο όρο κατά 14% (El-Moslmani et al. 2002).

Οι περιορισμοί που είχε το FLSELECTOR σαν πρόγραμμα ήταν ότι δεν μπορούσε να χειριστεί παραπάνω από τρεις διακομιστές και κυρίως ότι υπέθετε ότι δεν θα σχηματιστούν ουρές στο σημείο απόρριψης. Παρά τα σημαντικά του μειονεκτήματα το FLSELECTOR παρείχε μία αρκετά ικανοποιητική και εύκολη προς το χρήστη μέθοδο εφαρμογής της θεωρίας των σειρών αναμονής με σκοπό την βέλτιστη επιλογή του στόλου και ταυτόχρονα έδινε στον χρήστη την δυνατότητα να επιλέξει διαφορετικές διαμορφώσεις ως προς την μορφή του στόλου έτσι ώστε να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες κάθε έργου ξεχωριστά (El-Moslmani et al. 2002).

Μια επιπλέον εφαρμογή της θεωρίας των σειρών αναμονής στον μεταλλευτικό κλάδο ήταν ένα κλειστό δίκτυο ουράς που υπέθετε εκθετικές κατανομές για τους χρόνους φόρτωσης, μεταφοράς και απόρριψης. Αυτό το μοντέλο αναπτύχθηκε για να ελαχιστοποιήσει το κόστος παραγωγής ανά ποσότητα υλικού που μετακινείται. Οι εκτιμήσεις για το κόστος που προέκυψαν σε μία μελέτη περίπτωσης που έγινε σε ένα υπαίθριο ανθρακωρυχείο με την εφαρμογή της θεωρίας των ουρών συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα που βρέθηκαν χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού.

Η θεωρία των σειρών αναμονής πέτυχε το ελάχιστο κόστος φόρτωσης και μεταφοράς για το σύστημα, καθώς και την βέλτιστη κατανομή των φορτηγών στα φτυάρια. Όταν αυτό το σύστημα εφαρμόστηκε σε ένα ορυχείο, ο στόχος παραγωγής για το έτος ξεπεράστηκε και το μέσο κόστος παραγωγής μειώθηκε (Ercelebi and Bascetin, 2009).

Ένα άλλο πρόσφατο έργο εξόρυξης χρησιμοποίησε τη θεωρία των ουρών για να καταγράψει τη μη γραμμική σχέση μεταξύ της μέσης απόδοσης των ορυχείων και του πλήθους των φορτηγών που χρησιμοποιούνται, και στη συνέχεια οδηγούσε στην ανάπτυξη ενός μοντέλου βελτιστοποίησης. Το μοντέλο παρείχε την επιλογή

για το μέγεθος κάθε φορτηγού, ενώ επίσης σε κάθε μεμονωμένο φορτηγό εκχωρούταν μια παράμετρος ετοιμότητας έτσι ώστε το μοντέλο να μπορεί να υποδείξει πόσα φορτηγά ήταν απαραίτητα και ποια μεμονωμένα φορτηγά έπρεπε να χρησιμοποιηθούν. Οι χρόνοι εξυπηρέτησης των φορτωτών και οι χρόνοι επιστροφής των φορτηγών αντιπροσωπεύονταν με μία κατανομή Erlang. Το μοντέλο θεωρούσε ότι η πιθανότητα ένας φορτωτής να είναι αδρανής ήταν γραμμική έτσι ώστε η απόδοση του φορτωτή να ήταν εφικτό να εκφραστεί ως γραμμική συνάρτηση. Το μοντέλο αυτό συγκρίθηκε με αποτελέσματα μιας προσομοίωσης και αποδείχθηκε ότι το μοντέλο βελτιστοποίησης προέβλεπε με ακρίβεια τη χρήση του φορτωτή και το χρόνο αδράνειας του. Αντίθετα, πληροφορίες για κάθε φορτηγό όπως η χρήση και ο χρόνος αδράνειας δεν υπολογίζονταν, αλλά το μοντέλο βελτιστοποίησης παρείχε πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το πόσα φορτηγά έπρεπε να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη των απαραίτητων στόχων παραγωγής (Ta et al. 2010).

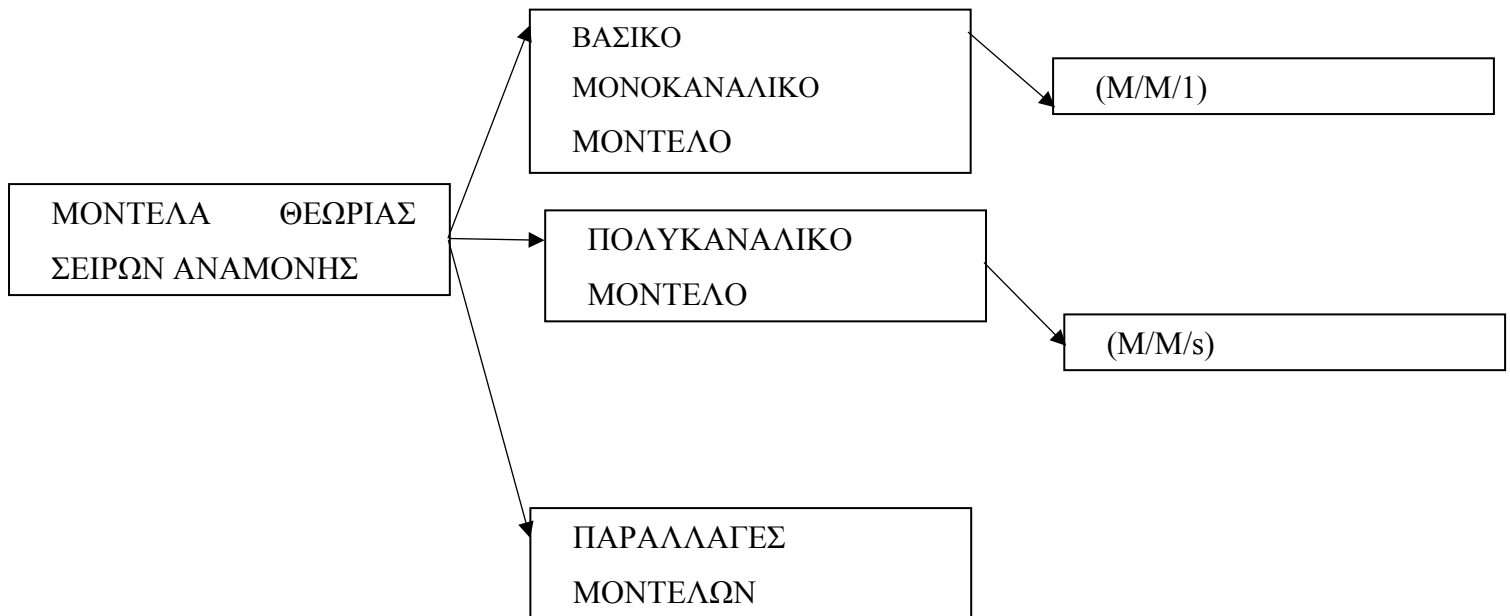
Ο Meredith το 2012 ανέπτυξε ένα (M/M/c) μοντέλο σειράς αναμονής για να μοντελοποιήσει τις αλληλεπιδράσεις φορτηγών και φορτωτών σε ένα υπαίθριο μεταλλείο. Αυτό το μοντέλο υπέθετε ότι ο χρόνος άφιξης των φορτηγών και οι χρόνοι εξυπηρέτησης ήταν εκθετικά κατανομημένοι και μπορούσε να εφαρμοστεί σε μεταλλεία που λειτουργούν με επτά ή λιγότερους φορτωτές. Για να εφαρμόσει αυτό το μοντέλο, ο χρήστης έπρεπε να γνωρίζει τον μέσο ρυθμό άφιξης νέων φορτηγών στο σύστημα ( $\lambda$ ), τον αριθμό των φορτωτών και τον μέσο ρυθμό εξυπηρέτησης ανά φορτωτή ( $\mu$ ). Με βάση αυτές τις τιμές, το μοντέλο υπολόγιζε αρκετές παραμέτρους που περιγράφουν τη συμπεριφορά του συστήματος, π.χ. τον χρόνο που δαπανούν τα φορτηγά περιμένοντας να φορτωθούν και την χρήση των θέσεων εξυπηρέτησης ( $\rho$ ), που είναι και οι δύο δείκτες του πόσο αποτελεσματικά λειτουργεί το σύστημα (Meredith, 2012).

#### Ταξινόμηση συστημάτων θεωρίας σειράς αναμονής

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, ο Kendall το 1953 δημιούργησε μία μεθοδολογία για τη ταξινόμηση των συστημάτων της θεωρίας των σειρών αναμονής. Ουσιαστικά κάθε σύστημα διακρίνεται από έναν χαρακτηριστικό τύπο της μορφής (a/b/c). Το a συμβολίζει την κατανομή πιθανότητας των αφίξεων πελατών στο σύστημα. Το b συμβολίζει την κατανομή

πιθανότητας του χρόνου εξυπηρέτησης ενώ το  $c$  είναι ο αριθμός των διακομιστών ή καναλιών.

Στην Εικόνα 3 δίνεται ένα σχεδιάγραμμα που περιγράφει τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται κατά βάση στην μεταλλευτική βιομηχανία όταν το σύστημα μεταφοράς έχει σχεδιαστεί με τη χρήση της θεωρίας της σειράς αναμονής.



Εικόνα 3 Ταξινόμηση μοντέλων Θεωρίας Σειρών Αναμονής (Alkass, 2003)

#### Βασικό μονοκαναλικό μοντέλο (M/M/1)

Αυτό το μοντέλο αφορά την κατάσταση στην οποία υπάρχει ένα κανάλι ή διακομιστής που επεξεργάζεται όλους τους πελάτες. Ένα μοντέλο μονού καναλιού (M/M/1) είναι κατάλληλο όταν υπάρχουν οι ακόλουθες συνθήκες:

- Ένας διακομιστής ή κανάλι
- Ένας ρυθμός άφιξης Poisson
- Αρνητικός εκθετικός χρόνος εξυπηρέτησης
- Σειρά εξυπηρέτησης είναι της μορφής ο πρώτος που φτάνει, εξυπηρετείται πρώτος
- Απεριόριστος πληθυσμός εισόδου
- Δεν υπάρχει όριο στο μήκος της ουράς

ΕΙΔΟΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ	ΤΥΠΟΣ
Χρήση συστήματος	$\rho = \lambda/\mu$
Μέσο πλήθος φορτηγών στην ουρά	$L_q = \lambda^2/\mu*(\mu-\lambda)$
Μέσο πλήθος φορτηγών στο σύστημα	$L = L_q + (\lambda/\mu)$
Μέσος χρόνος αναμονής στην ουρά	$W_q = L_q /\lambda$
Μέσος χρόνος παραμονής στο σύστημα	$W = W_q + (1/\mu)$
Πιθανότητα μηδενικού αριθμού φορτηγών στο σύστημα	$P_0 = 1 - (\lambda/\mu)$
Πιθανότητα n φορτηγών στο σύστημα	$P_n = P_0*(\lambda^n/\mu)$
Πιθανότητα ο χρόνος αναμονής στην ουρά να μην ξεπεράσει τις k μονάδες	$P_{n \leq k} = 1 - (\lambda^{k+1}/\mu)$
Μέσος χρόνος αναμονής φορτηγού από την στιγμή άφιξης αν δεν εξυπηρετηθεί άμεσα	$W_a = 1/(\mu-\lambda)$

Πίνακας 2 Βασικών εξισώσεων βασικού μονοκαναλικού μοντέλου (M/M/1) (Stevenson 2008)

#### Βασικό πολυκαναλικό μοντέλο (M/M/s)

Το βασικό πολυκαναλικό μοντέλο είναι στην ουσία το ίδιο μοντέλο με το βασικό μονοκαναλικό μοντέλο. Η μόνη διαφορά είναι ότι σε αυτή την περίπτωση υπάρχουν πολλά κανάλια ή διακομιστές. Επίσης είναι κατάλληλο όταν ισχύουν οι προϋποθέσεις που αναφέρθηκαν και παραπάνω για το μονοκαναλικό μοντέλο και επιπλέον ο μέσος ρυθμός εξυπηρέτησης για όλους τους διακομιστές είναι ο ίδιος.

Τα δύο παραπάνω μοντέλα είναι αυτά που χρησιμοποιούνται κατά βάση σε κάθε μοντέλο που στηρίζεται στην θεωρία των σειρών αναμονής. Πλην αυτών υπάρχουν και διάφορες άλλες παραλλαγές όπως τα μοντέλα (M/G/1), (M/D/1),

μοντέλο προτεραιότητας, μοντέλο πεπερασμένου μήκους ουράς και μοντέλο πεπερασμένης κλήσης.

### **Μελέτη περίπτωσης με χρήση μοντέλου ουράς των Hai, Masniyom**

Η μελέτη διεξήχθη το 2016 στο υπαίθριο ανθρακωρυχείο του Cao Son στο Βιετνάμ. Το ανθρακωρυχείο βρίσκεται στην Quang στην επαρχία Ninh και έχει συνεχή λειτουργία από το 1974. Επί του παρόντος, το ορυχείο προμηθεύει άνθρακα εγχώριους χρήστες και πραγματοποιεί κάποιες εξαγωγές στην Κίνα και την Ινδία. Εν έτη 2016 που έγινε η μελέτη, η έκταση του μεταλλείου ήταν 2.120μ πλάτος και 2.260μ μήκος με το επίπεδο της επιφάνειας εξόρυξης να βρίσκεται στα -70 μέτρα. Οι παράμετροι εργασίας του μεταλλείου ήταν: 15 μέτρα το ύψος κάθε βαθμίδας, 45 μέτρα το ελάχιστο πλάτος κάθε βαθμίδας, 28°- 33° γωνία κλίσης των βαθμίδων ενώ το μέτωπο κάθε βαθμίδας είχε κλίση 45°- 65°. Το ορυχείο λειτουργούσε τουλάχιστον το 2016 που έγινε η μελέτη σε τρεις βάρδιες την ημέρα, επτά ημέρες την εβδομάδα και 330 ημέρες το χρόνο και αναμένεται να είναι σε λειτουργία έως το 2039. Το σύστημα ουράς του μεταλλείου περιλάμβανε τον φορτωτή με κάδο 30 m<sup>3</sup> και φορτηγά ωφέλιμου φορτίου 50 τόνων. Τα δεδομένα των χρόνων άφιξης και εξυπηρέτησης των φορτηγών καταγράφηκαν και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ	ΤΙΜΕΣ
Ρυθμός άφιξης φορτηγών (λ)	7 φορτηγά/ώρα
Ρυθμός εξυπηρέτησης φορτηγών (μ)	16 φορτηγά/ώρα
Κόστος κτήσης και λειτουργίας φορτωτή	239 \$
Κόστος κτήσης και λειτουργίας φορτηγού	179 \$

*Πίνακας 3 Δεδομένα χρόνων άφιξης και εξυπηρέτησης φορτηγών και κόστη (Cao Sun, Technology Report, access 2018)*

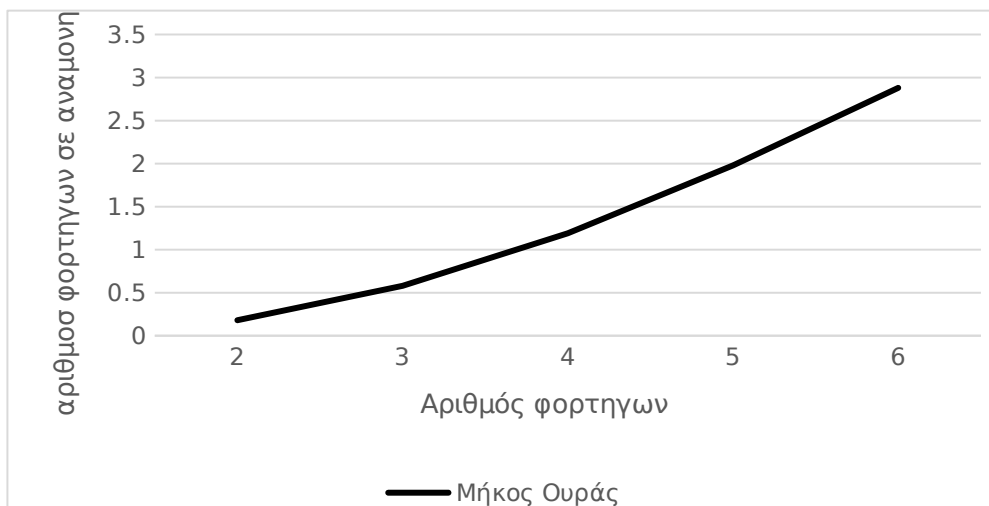
### **Αποτελέσματα και ανάλυση μοντέλου**

Το μοντέλο της θεωρίας της σειράς αναμονής που εφαρμόστηκε για το μεταφορικό σύστημα στο μεταλλείο ήταν μορφής (M/M/1) αφού υπήρχε μόνο ένας φορτωτής που είχε τον ρόλο του διακομιστή. Μετά τη διαδικασία υπολογισμού, τα αποτελέσματα που έδωσε το μοντέλο ήταν ο χρόνος αναμονής των φορτηγών για

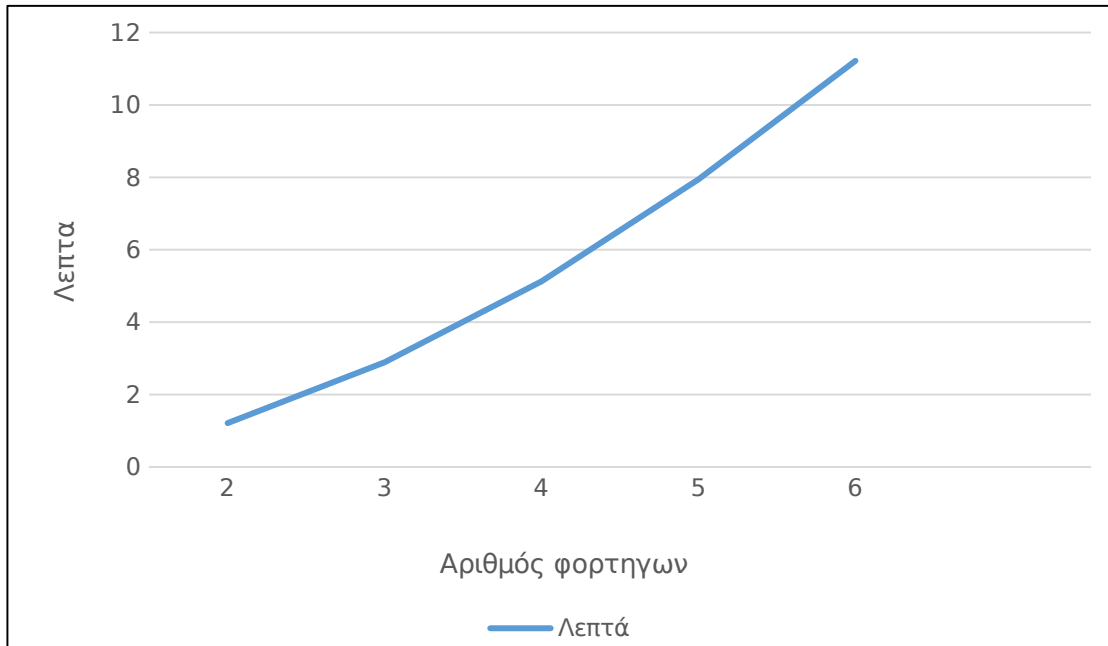
να φορτωθούν,  $W_q$ , ο βαθμός χρησιμοποίησης του διακομιστή (φορτωτή), η παραγωγικότητα του φορτωτή και το κόστος. Στο Πίνακα 4 αναφέρονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν αναλυτικά.

Μέγεθος στόλου φορτηγών	N	2	3	4	5	6
Αριθμός φορτηγών που περιμένουν να εξυπηρετηθούν (φορτηγά)	$L_q$	0.18	0.58	1.19	1.98	2.88
Αριθμός φορτηγών που βρίσκονται στο σύστημα (φορτηγά)	$L_s$	0.76	1.34	2.08	2.93	3.87
Μέσος χρόνος αναμονής φορτηγών (λεπτά)	$W_q$	1.21	2.89	5.13	7.95	11.22
Μέσος χρόνος παραμονής των φορτηγών στο σύστημα (λεπτά)	$W_s$	5.03	6.72	8.96	11.7	15.05
Χρήση φορτωτή (%)	$\eta$	57	76	89	95	98
Παραγωγή (τόνοι/ώρα)	$Q_n$	819	1090	1265	1360	1403
Κόστος φόρτωσης	$C_1$	0.29	0.22	0.19	0.18	0.17
Κόστος μεταφοράς	$C_h$	0.44	0.49	0.57	0.66	0.77
Συνολικό κόστος	$C$	0.73	0.71	0.75	0.83	0.94

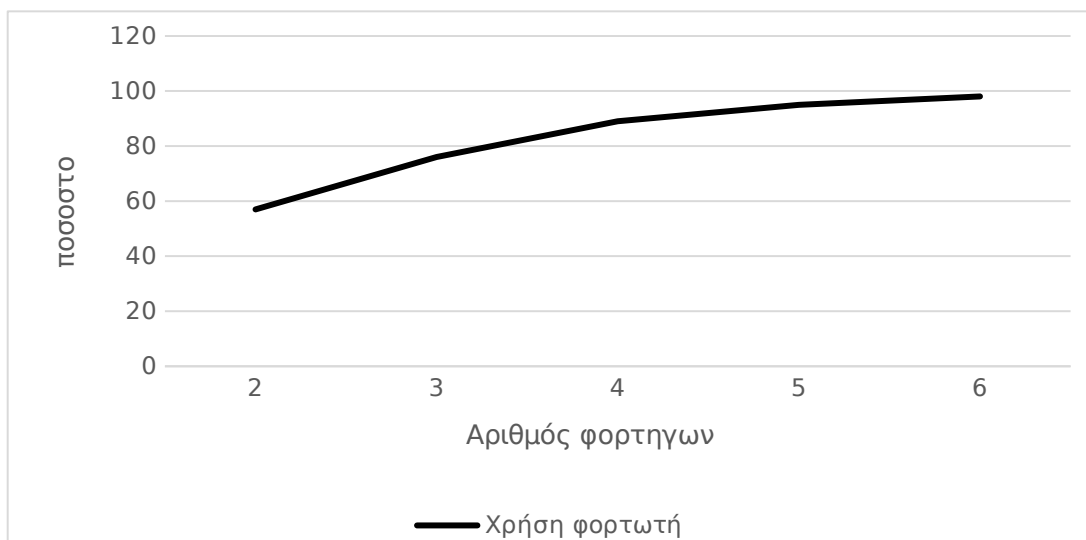
Πίνακας 4 Αποτελέσματα Μοντέλου Αγοράς. Η επίδραση που είχε η μεταβολή του πλήθους των φορτηγών στο σύστημα (μέγεθος ουράς, χρόνος αναμονής φορτηγών, χρήση φορτωτή, κόστος) μπορεί να απεικονιστεί στις Εικόνες 4-8. (Hai, et al. 2018)



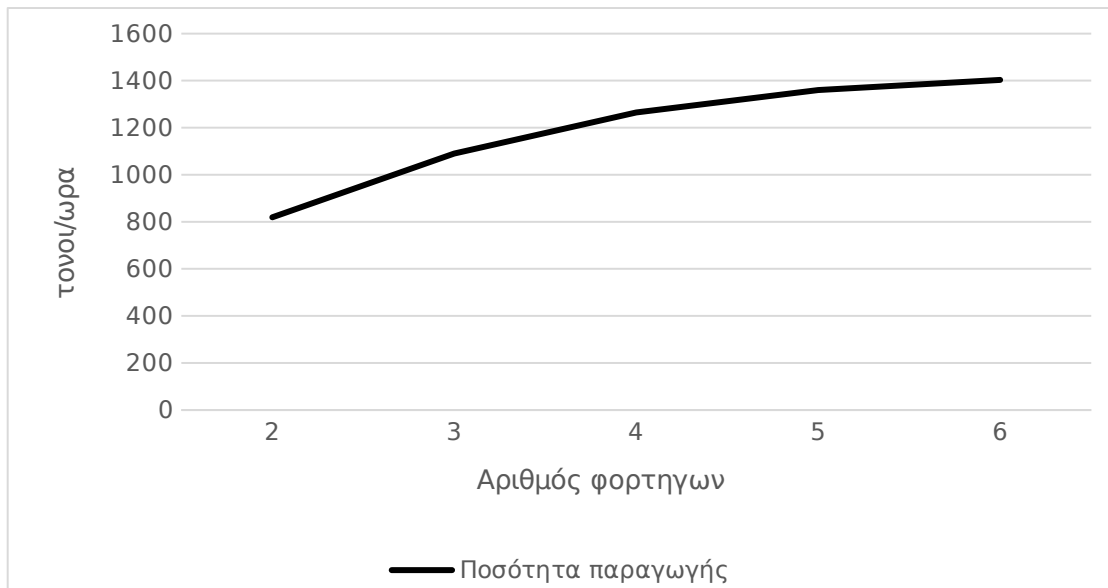
Εικόνα 4: Διάγραμμα: Η συσχέτιση του μήκους της ουράς με τον αριθμό των φορτηγών



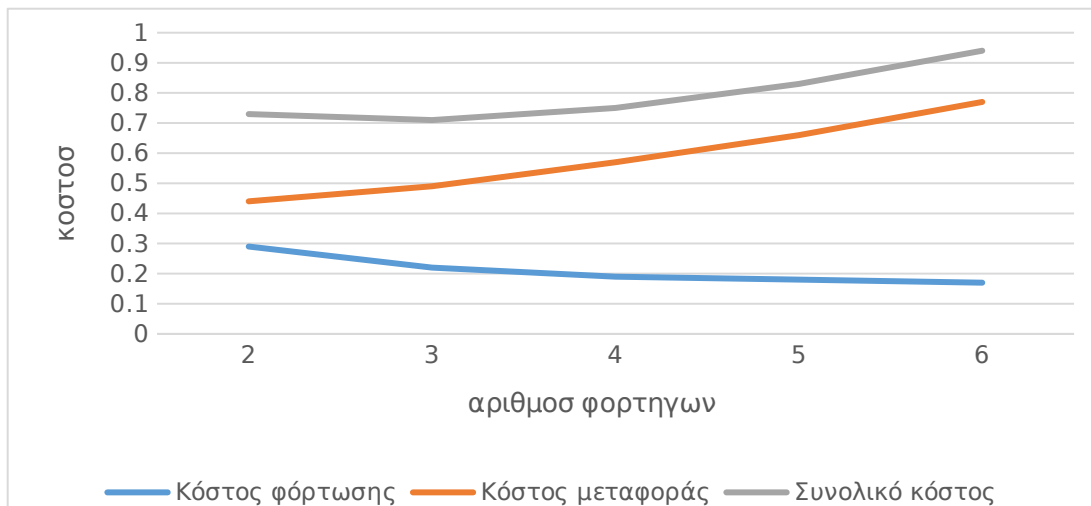
Εικόνα 5: Διάγραμμα : Η συσχέτιση του χρόνου αναμονής των φορτηγών σε σχέση με τον αριθμό τους



Εικόνα 6: Ποσοστό χρήσης φορτωτή ανάλογα με τον αριθμό των φορτηγών



Εικόνα 7: Διάγραμμα: Ποσότητα παραγωγής ανάλογα με τον αριθμό των φορτηγών



Εικόνα 8: Διάγραμμα : Συσχέτιση κόστους και αριθμού φορτηγών

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι φανερό πως όλες οι παράμετροι του μοντέλου αυξάνονταν όσο αυξανόταν και ο αριθμός των φορτηγών. Για παράδειγμα όσο περισσότερα φορτηγά υπήρχαν στο σύστημα τόσο αυξανόταν ο χρόνος αναμονής τους για φόρτωση, αλλά και το μήκος της ουράς. Από την άλλη πλευρά, αντίθετα με την αρνητική επίδραση που είχε η αύξηση του αριθμού των φορτηγών στα ίδια τα φορτηγά δεν συνέβαινε το ίδιο με τον φορτωτή αλλά και την παραγωγή. Μεγαλύτερο πλήθος φορτηγών οδηγούσε σε μεγαλύτερη παραγωγή και σε καλύτερη χρήση του φορτωτή αφού ο χρόνος αδράνειάς του σχεδόν μηδενιζόταν. Όσον αφορά στα κόστη υπάρχει μία σημαντική παρατήρηση. Η αύξηση του πλήθους των φορτηγών μείωνε το κόστος φόρτωσης, αλλά αντίθετα οδηγούσε σε αύξηση το κόστος μεταφοράς. Υπάρχει ένα σημείο στο διάγραμμα



που το άθροισμα από τα δύο κόστη ήταν το χαμηλότερο δυνατό και αυτό κατά συνέπεια έδινε και την βέλτιστη λύση για τον αριθμό των φορτηγών που στην προκειμένη περίπτωση ήταν τα 3 φορτηγά. Δηλαδή η δρομολόγηση 3 φορτηγών στον 1 φορτωτή οδηγούσε στην βέλτιστη απόδοση του μεταφορικού συστήματος σε σχέση με συνολικό κόστος.

#### *Συμπέρασμα*

Η χρήση του μοντέλου σειράς αναμονής της μορφής (M/M/1) απέδειξε τα πλεονεκτήματα του στην ανάλυση της απόδοσης του συστήματος μεταφορών. Τα απαραίτητα δεδομένα για το μοντέλο ήταν οι πληροφορίες σχετικά με τον ρυθμό άφιξης και τον ρυθμό εξυπηρέτησης των φορτηγών. Το μοντέλο κατάφερε να αποδείξει την σχέση μεταξύ παραμέτρων όπως το μήκος της ουράς, ο χρόνος αναμονής των φορτηγών, η χρησιμοποίηση του φορτωτή, η παραγωγικότητα και τέλος του κόστους με το πλήθος των φορτηγών. Όταν το μέγεθος του στόλου αυξήθηκε, το πλήθος των φορτηγών που έπρεπε να περιμένουν για να εξυπηρετηθούν από το φορτωτή και ο χρόνος παραμονής τους μέσα στο σύστημα αυξήθηκε αντίστοιχα. Το βέλτιστο πλήθος φορτηγών που αποστέλλονταν στο σύστημα στο μοντέλο ουράς περιγράφεται ως το σημείο στο οποίο το συνολικό κόστος λειτουργίας ήταν στο χαμηλότερο επίπεδο. Το σημείο όπου το κόστος λειτουργίας είναι στο χαμηλότερο επίπεδο εντοπίζεται αθροίζοντας το κόστος φόρτωσης και το κόστος μεταφοράς και συνέχεια δημιουργώντας ένα γράφημα όπως το διάγραμμα 5, στην συνέχεια εντοπίζεται το χαμηλότερο σημείο στην καμπύλη συνολικού κόστους και αντιστοιχίζεται με τον αριθμό των φορτηγών που οδηγεί στην βέλτιστη λύση για το σύστημα μεταφοράς.

Η θεωρία της σειράς αναμονής προσφέρεται για τον υπολογισμό του χρόνου αδράνειας που προκαλείται από φορτηγά που περιμένουν να εξυπηρετηθούν στο σημείο φόρτωσης. Όταν τα φορτηγά και οι φορτωτές αντιπροσωπεύονται ως διακομιστές και πελάτες σε ένα δίκτυο σειρών αναμονής, το κατάλληλο πλήθος και μέγεθος εξοπλισμού που θα έπρεπε να εφαρμοστεί στο μεταλλείο μπορεί να προσδιοριστεί, διασφαλίζοντας ότι οι ανάγκες παραγωγής μπορούν να καλυφθούν και ταυτόχρονα διατηρείται αποτελεσματική χρήση του εξοπλισμού. Ουσιαστικά η μέθοδος των σειρών αναμονής είναι μία εύκολη μέθοδος με χαμηλό κόστος που ειδικά στα τελευταία μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί δίνει πολύ ικανοποιητικά

αποτελέσματα. Βέβαια παραμένει μια μέθοδος που σε επίπεδο αξιοπιστίας είναι χαμηλότερα από άλλες μεθόδους όπως ο μαθηματικός προγραμματισμός.

### **2.2.2 Μελέτη συστήματος με χρήση στοχαστικού προγραμματισμού**

Ο στοχαστικός προγραμματισμός είναι η βάση που χρησιμοποιείται σε κάθε πρόβλημα μαθηματικής βελτιστοποίησης που εμπεριέχει σε ένα μικρό ή μεγαλύτερο βαθμό κάποια αβεβαιότητα. Ουσιαστικά ο στοχαστικός προγραμματισμός είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με αβέβαιες παραμέτρους αλλά γνωστές τις διάφορες κατανομές πιθανοτήτων. Η ουσιαστική διαφοροποίηση ενός στοχαστικού προγράμματος με ένα ντετερμινιστικό είναι ότι στην δεύτερη περίπτωση όλες οι παράμετροι είναι γνωστές εκ των προτέρων. Ο στοχαστικός προγραμματισμός είναι μία από τις ελάχιστες μεθόδους βελτιστοποίησης που μπορεί να ανταποκριθεί σε πραγματικές συνθήκες αφού η κύρια λειτουργία του είναι η εύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες που προκύπτουν από τις όχι ακριβείς παραμέτρους. Αυτό ακριβώς το πλεονέκτημα έχουν εκμεταλλευτεί διάφορες βιομηχανίες και εταιρείες σε όλο τον φάσμα της οικονομίας για να βελτιστοποιήσουν την λειτουργία τους και τα αποτελέσματά τους (Shapiro et al. 2009).

Ο στοχαστικός προγραμματισμός δηλαδή η χρήση αλγορίθμων που περιλαμβάνουν ένα βαθμό τυχαιότητας γίνεται με την χρήση ευρεστικών κανόνων και διαδικασιών, αφού ουσιαστικά ακολουθούνται διαδικασίες όπως είναι η επί του πεδίου παρατήρηση για να βρεθούν τα κατάλληλα δεδομένα. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μην μπορούν σε όλες τις περιπτώσεις οι στοχαστικοί αλγόριθμοι να βρουν την βέλτιστη λύση, ούτε και να ακολουθήσουν μία ακριβή διαδικασία. Παρόλα αυτά παραμένουν ίσως η καλύτερη δυνατή λύση για συστήματα που περιλαμβάνουν ένα βαθμό τυχαιότητας (Shapiro et al. 2009).

Πολλοί στοχαστικοί αλγόριθμοι πλέον εμπνέονται από βιολογικές ή και φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο γήινο οικοσύστημα. Αυτοί οι αλγόριθμοι ονομάζονται μεταευριστικοί και θεωρούνται αλγόριθμοι υψηλότερης τάξης αφού δίνουν την δυνατότητα στον χρήστη για εύρεση συγκεκριμένων αντικειμενικών σκοπών. Τέτοιου είδους στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι η προσομοίωση απόψησης (Simulated Annealing), η βελτιστοποίηση ανά σμήνος και οι γενετικοί αλγόριθμοι.

Κάθε στοχαστικός αλγόριθμος οποιασδήποτε μορφής είναι πρακτικά αδύνατο να δώσει δύο και πλέον φορές το ίδιο αποτέλεσμα. Κάθε χρήση στοχαστικού

αλγορίθμου δίνει ένα διαφορετικό αποτέλεσμα εξαιτίας της τυχαιότητας που τον διέπει. Το μόνο που μπορεί να κάνει ο χρήστης του αλγορίθμου για να έχει παραπλήσια αποτελέσματα με ίδια δεδομένα είναι να χρησιμοποιεί την γεννήτρια που παράγει τα τυχαία νούμερα με τέτοιο τρόπο που να ακολουθείται η ίδια ακολουθία παραγωγής τυχαίων αριθμών, αυτή η επιλογή είναι που ουσιαστικά δημιουργεί περισσότερο ισχυρούς κώδικες.

Για να μπορέσει να γίνει η οποιαδήποτε σύγκριση μεταξύ στοχαστικών προγραμμάτων πρέπει ο κάθε αλγόριθμος να εκτελεστεί πολλές φορές για να ληφθεί μία μέση τιμή. Στην συνέχεια ο μόνος σχετικά ασφαλής τρόπος σύγκρισης είναι η σύγκριση των μέσων τιμών δύο ή και παραπάνω εκτελέσεων. Αντίστοιχα πρέπει να αναφερθεί ότι μία μοναδική εκτέλεση ενός αλγορίθμου στοχαστικής προσέγγισης δεν δίνει απαραίτητα την βέλτιστη λύση στην αντικειμενική συνάρτηση. Ο κάθε αλγόριθμος θα πρέπει να εκτελεστεί αρκετές φορές για να δημιουργηθεί μία κατανομή βέλτιστων λύσεων. Το μέγιστο ή το ελάχιστο αυτής της κατανομής μπορεί εν συνεχεία να θεωρηθεί η βέλτιστη λύση και ανάλογα με την ποιότητα του κώδικα και των επαναλήψεων που έχουν διενεργηθεί να καθορίζεται και από τον αντίστοιχο βαθμό εμπιστοσύνης.

#### 2.2.2.1 Στοχαστικός προγραμματισμός δύο σταδίων (Li & Grossmann, 2020)

Ο στοχαστικός προγραμματισμός δύο σταδίων είναι ένα είδος στοχαστικού προγραμματισμού που χρησιμοποιείται περισσότερο σε προβλήματα όπου ο υπεύθυνος λήψης αποφάσεων πρέπει να λάβει αποφάσεις σε δύο στάδια (δύο διαφορετικούς χρόνους) για ένα σταθερό φαινόμενο που εμπεριέχει κάποιο βαθμό αβεβαιότητας. Η απόφαση που πρέπει να ληφθεί στο πρώτο στάδιο είναι πολύ κρίσιμης σημασίας αφού είναι μια απόφαση που πρέπει να ληφθεί με βάση ορισμένες τυχαίες παραμέτρους που λαμβάνονται από προηγούμενη εμπειρία ή κάποιου είδους έρευνα. Η απόφαση του δεύτερου σταδίου από την άλλη βασίζεται στο αποτέλεσμα του πειράματος ή σε κάτι που αναμένει αυτός που λαμβάνει τις αποφάσεις. Ο στοχαστικός προγραμματισμός δύο σταδίων είναι το πρωταρχικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της όποιας αβεβαιότητας. Θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί σε προβλήματα πολλών σταδίων αν υπάρξει διαχωρισμός σε μπλοκ των διάφορων λύσεων, κάτι που αποτελεί και το θεμέλιο του στοχαστικού προγραμματισμού πολλαπλών σταδίων.

Ουσιαστικά η βασική ιδέα του στοχαστικού προγραμματισμού δύο σταδίων είναι ότι οι (βέλτιστες) αποφάσεις πρέπει να βασίζονται σε δεδομένα που είναι διαθέσιμα τη στιγμή που λαμβάνονται οι αποφάσεις και δεν μπορούν να εξαρτώνται από μελλοντικές παρατηρήσεις. Η λογική των δύο σταδίων χρησιμοποιείται ευρέως στον στοχαστικό προγραμματισμό.

Η γενική διατύπωση του προβλήματος στοχαστικού προγραμματισμού δύο σταδίων δίνεται ως εξής:

$$\min_{x \in X} \{g(x) = f(x) + E_{\xi}[Q(x, \xi)]\}$$

Όπου  $E[Q(x, \xi)] = \sum_{k=1}^K p_k Q(x, \xi_k)$  και όπου  $Q(x, \xi)$  είναι η βέλτιστη τιμή του

δεύτερου σταδίου του προβλήματος και είναι ίση με

$$\min_y \{q(y, \xi) \mid T(\xi)x + W(\xi)y = h(\xi)\}$$

Τα κλασσικά γραμμικά προβλήματα δύο σταδίων μπορούν να διατυπωθούν ως εξής:  $\min g(x) = c^T x + E_{\xi}[Q(x, \xi)]$  με  $x \in \mathbb{R}^n$

όπου  $Ax = b$  και  $x \geq 0$  και  $Q(x, \xi)$  η βέλτιστη λύση του δεύτερου σταδίου με

$$\min_y q(\xi)^T y = T(\xi)x + W(\xi)y = h(\xi) \text{ με } y \geq 0$$

## 2.3 Μελέτη συστήματος με την χρήση μοντέλων προσομοίωσης

### 2.3.1. Γενική περιγραφή μοντέλων προσομοίωσης

Προσομοίωση ορίζεται ως η αναπαράσταση της λειτουργίας ενός συστήματος στον πραγματικό κόσμο με σκοπό τον εντοπισμό και την επίλυση πιθανών προβλημάτων που μπορεί να εμφανιστούν κατά την λειτουργία του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία της οποιασδήποτε προσομοίωσης είναι η ύπαρξη μοντέλων τα οποία αποτυπώνουν τα βασικά χαρακτηριστικά και συμπεριφορές του επιλεγμένου συστήματος ή διαδικασίας. Πολύ συχνά χρησιμοποιούνται τεχνολογίες πληροφορικής για την εκτέλεση προσομοιώσεων (Banks and Carson, 2001).

Μια προσομοίωση σε υπολογιστή είναι η αναπαράσταση μιας βιομηχανικής λειτουργίας ή διαδικασίας ή συστήματος του πραγματικού κόσμου που έχει προγραμματιστεί με τη βοήθεια λογισμικού υπολογιστή.

Τα μοντέλα προσομοίωσης ταξινομούνται γενικά στους ακόλουθους τύπους (Banks et al. 2010):

1. Στατικά έναντι δυναμικών μοντέλων. Ένα στατικό μοντέλο προσομοίωσης αναπαριστά ένα σύστημα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό σημείο, π.χ., το μοντέλο οικονομικής ζήτησης και τιμής (Gargi and Reddy, 2014). Ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης αντιπροσωπεύει ένα σύστημα που αλλάζει στο πέρασμα του χρόνου. Για παράδειγμα, η προσομοίωση ενός τραπεζικού συστήματος από τις 9:00 π.μ. έως τις 5:00 μ.μ. είναι ένα δυναμικό μοντέλο.

2. Ντετερμινιστικά έναντι στοχαστικών μοντέλων. Ένα ντετερμινιστικό μοντέλο προσομοίωσης δεν περιέχει τυχαίες μεταβλητές, π.χ., ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού, ενώ ένα μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης έχει μία ή περισσότερες τυχαίες μεταβλητές ως εισόδους και εξόδους, π.χ., ένα μοντέλο ουράς.

3. Διακριτά έναντι συνεχών μοντέλα. Ένα μοντέλο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων (DES) αντιπροσωπεύει ένα σύστημα στο οποίο οι μεταβλητές κατάστασης αλλάζουν μόνο σε ένα διακριτό σύνολο σημείων στο χρόνο. Για παράδειγμα, ένα σύστημα φορτηγού-φορτωτή είναι ένα τυπικό διακριτό σύστημα. Ένα μοντέλο συνεχούς προσομοίωσης αντιπροσωπεύει ένα σύστημα στο οποίο οι μεταβλητές κατάστασης αλλάζουν συνεχώς με την πάροδο του χρόνου, όπως ένα σύστημα που σχετίζεται με ροή υγρών.

Αν και η χρήση των μοντέλων προσομοίωσης είναι πολύ δημοφιλής στη μεταλλευτική βιομηχανία, έχει και σημαντικούς περιορισμούς. Από τη μια πλευρά, τα συστήματα εξόρυξης είναι ιδιαίτερος εξελιγμένα και δεν υπάρχει αρκετή τεχνική τεχνογνωσία και κεφάλαιο για την υποστήριξη της προσομοίωσης (Castillo και Cochran, 1987). Από την άλλη πλευρά, ειδικά όταν μελετώνται μεταλλευτικά συστήματα μεταφοράς, όπως συστήματα φορτηγών και φορτωτών, η προσομοίωση φαίνεται να είναι το πιο δημοφιλές και εύχρηστο εργαλείο. Αυτή η δημοτικότητα οφείλεται στο γεγονός ότι τα μοντέλα προσομοίωσης χειρίζονται με επιτυχία τις αβεβαιότητες στις λειτουργίες φορτηγών και φορτωτών. Άλλες

μέθοδοι, όπως ο μαθηματικός προγραμματισμός, δεν είναι ικανές να λάβουν υπόψη τις αβεβαιότητες και τις τεχνικές λεπτομέρειες ενός συστήματος.

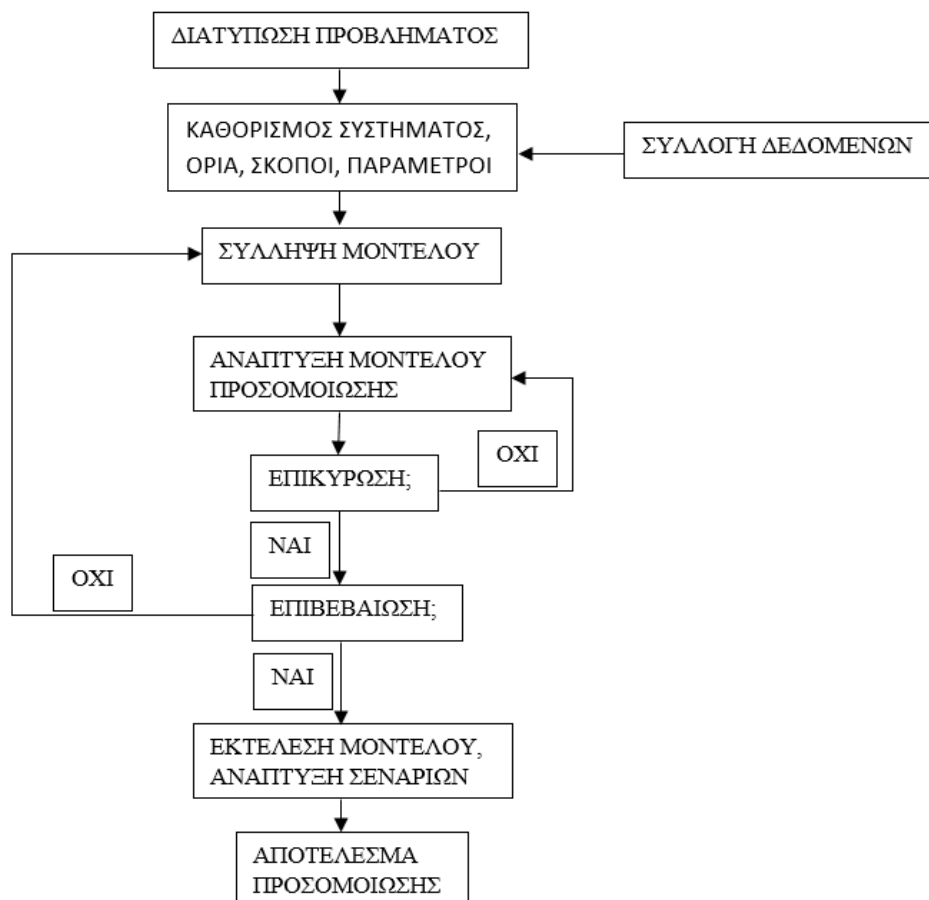
Η πλειοψηφία των υπαρχόντων μελετών που εφαρμόζουν τεχνικές προσομοίωσης αξιολογούν μόνο τις πολιτικές δρομολόγησης του συστήματος φορτηγών και φορτωτών. Ένα από τα πρώτα έργα σε αυτό το πλαίσιο είναι των Castillo και Cochran (1987). Αναλύουν ένα συμβατικό σύστημα κατανομής φορτηγών σε ένα υπαίθριο μεταλλείο χαλκού. Το πλήθος των φορτηγών και των φτυαριών είναι γνωστοί και η πολιτική σταθερής αποστολής χρησιμοποιείται για την κατανομή φορτηγών σε φορτωτές. Με βάση το παραπάνω αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης χρησιμοποιώντας το περιβάλλον SLAM II για τη σύγκριση της προτεινόμενης πολιτικής δρομολόγησης με την υπάρχουσα. Ο αλγόριθμος μεγιστοποιεί τη χρήση φορτηγών και δίνει προτεραιότητα στους φορτωτές μεταλλεύματος για τη μεγιστοποίηση της παραγωγής μεταλλεύματος.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι η πρώιμη έρευνα που έγινε από τους Sturgul και Eharrison (1987), οι οποίοι προσομοιώνουν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις κατανομής από τρία πραγματικά επιφανειακά ορυχεία στην Αυστραλία. Στην πρώτη περίπτωση, εξετάζεται η χρήση ενός συστήματος κατανομής σε ανθρακωρυχείο. Η χρήση ενός συστήματος κατανομής μπορεί να αυξήσει την παραγωγή, αλλά επιβάλλει ένα επιπλέον κόστος.

Στη δεύτερη περίπτωση, ένα υπαίθριο ορυχείο ουρανίου θεωρείται ότι θα κάνει χρήση του σωστού πλήθους φορτηγών για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Σε αυτή την περίπτωση, αντί για σύστημα κατανομής, κάθε φορτηγό εκχωρείται σε ένα συγκεκριμένο φορτωτή και επιστρέφει πάντα στον ίδιο φορτωτή.

Στην τρίτη περίπτωση μελετάται ένα ανθρακωρυχείο. Το ανθρακωρυχείο χρησιμοποιεί ένα τελεφερίκ για την απομάκρυνση των υπερκείμενων και ένα συμβατικό φορτηγό και φορτωτή για τη μεταφορά του άνθρακα. Ένας συνδυασμός φορτηγού και φορτωτή, χοάνης και ταινιοδρόμου μελετάται ως εναλλακτική. Καθορίζεται έτσι το σωστό πλήθος φορτηγών καθώς και το μέγεθος των χοανών.

## Δομή μοντέλων προσομοίωσης



Εικόνα 9: Τυπικό διάγραμμα ροής δομής μοντέλου προσομοίωσης (Banks, 2005)

Στην Εικόνα 9 φαίνεται η ενδεδειγμένη σειρά που πρέπει να ακολουθήσει κάποιος για τη σωστή δημιουργία και δόμηση ενός μοντέλου προσομοίωσης. Το πρώτο και κυριότερο στοιχείο είναι η σωστή και ακριβής διατύπωση του προβλήματος. Εν συνεχεία πρέπει να καθοριστούν όλες οι παράμετροι του συστήματος, να τεθούν τα απαραίτητα όρια και να εκφραστούν οι αντικειμενικοί σκοποί του μοντέλου. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η πλήρης και ακριβής συλλογή των δεδομένων για να αποφευχθούν λάθη και παραλείψεις. Το επόμενο βήμα είναι ιδιαίτερης σημασίας και χρήζει μεγάλης προσοχής. Η σύλληψη του μοντέλου, δηλαδή ο τρόπος που αυτό θα λειτουργεί και θα παράγει αποτελέσματα είναι τόσο κρίσιμο που σε περίπτωση λάθους θα πρέπει όλο το μοντέλο να επανασχεδιαστεί. Στη συνέχεια ακολουθεί η ανάπτυξη του μοντέλου, η επικύρωση του και τέλος η επιβεβαίωση. Αν τα παραπάνω έχουν εκτελεστεί με ορθό τρόπο μπορεί πλέον να εκτελεστεί το μοντέλο ώστε να αναπτυχθούν τα αντίστοιχα σενάρια και τέλος τα ζητούμενα αποτελέσματα.

## Προσομοίωση συστημάτων διακριτών γεγονότων

Μια προσομοίωση συστημάτων διακριτών γεγονότων (DES – Discrete Event Simulation) μοντελοποιεί τη λειτουργία ενός συστήματος ως μια ακολουθία γεγονότων διακριτών στο χρόνο. Κάθε γεγονός συμβαίνει σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή και σηματοδοτεί μια αλλαγή κατάστασης στο σύστημα. Μεταξύ διαδοχικών γεγονότων, θεωρείται ότι δε συμβαίνει οποιαδήποτε αλλαγή στο σύστημα. Έτσι, ο χρόνος προσομοίωσης μπορεί να μεταπηδήσει απευθείας στο χρόνο εμφάνισης του επόμενου γεγονότος, που ονομάζεται βήμα χρόνου στο επόμενο γεγονός.

Εκτός από την εξέλιξη του χρόνου επόμενου συμβάντος, υπάρχει επίσης μια εναλλακτική προσέγγιση, που ονομάζεται, πρόοδος σταθερού χρονικού βήματος όπου ο χρόνος χωρίζεται σε μικρά χρονικά διαστήματα και η κατάσταση του συστήματος ενημερώνεται σύμφωνα με το σύνολο των γεγονότων/δραστηριοτήτων που συμβαίνουν στο κάθε χρονικό διάστημα. Επειδή δεν χρειάζεται να προσομοιώνεται κάθε φορά το εκάστοτε τμήμα, μια προσομοίωση χρόνου επόμενου συμβάντος μπορεί συνήθως να εκτελεστεί πολύ πιο γρήγορα από μια αντίστοιχη προσομοίωση χρόνου σταθερής αύξησης.

Και οι δύο μορφές DES έρχονται σε αντίθεση με τη συνεχή προσομοίωση, στην οποία η κατάσταση του συστήματος αλλάζει συνεχώς με την πάροδο του χρόνου με βάση ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που καθορίζουν τους ρυθμούς μεταβολής των μεταβλητών κατάστασης.

### Αντικειμενική συνάρτηση – λειτουργία της προσομοίωσης

Όπως αναφέρθηκε μετά την διατύπωση του προβλήματος αυτό που πρέπει να καθοριστεί είναι οι παράμετροι του μοντέλου, να προσδιοριστούν οι μεταβλητές απόφασης και να υπάρξει η μαθηματική έκφραση της αντικειμενικής λειτουργίας του συστήματος προσομοίωσης δηλαδή να δημιουργηθεί η απαραίτητη αντικειμενική συνάρτηση. Η μαθηματική έκφραση είναι η ακόλουθη (Shapiro et al. 2009):

$$\min \sum_{a \in A} \sum_{i \in I} y_{ai} + \beta \sum_{a \in A} \sum_{i \in I} R_{ai} \quad (1)$$



$Y_{aw}$  : Ο αριθμός των καταναμημένων φορτηγών τύπου (w) στον φορτωτή (α)

B : Η αξία της ποινής που προστίθεται στην συνάρτηση του αντικειμενικού σκοπού

$R_{aw}$  : Η ποσότητα του μεταφερόμενου υλικού από τον φορτωτή (α) από τον κάθε τύπο φορτηγού (w)

Η αντικειμενική συνάρτηση αποσκοπεί στο να εντοπίζει ένα ελάχιστο αριθμό κατανομών φορτηγού τύπου (w) σε φορτωτές (α). Στην αντικειμενική συνάρτηση θετική ποινή στην τιμή (β) υπάρχει όταν το εξαγόμενο υλικό ( $R_{aw}$ ) είναι μικρότερης ποσότητας από την προγραμματισμένη παραγωγική ικανότητα (P). Διαφορετικά, η τιμή (β) τίθεται στο μηδέν. Με αυτόν τον τρόπο, η ελάχιστη τιμή λαμβάνεται ως η αναμενόμενη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση.

Το δεύτερο βήμα στην δημιουργία του μοντέλου είναι να εντοπιστούν οι περιορισμοί του συστήματος και να εκφραστούν μαθηματικά. Στο συγκεκριμένο μοντέλο υπάρχουν δύο βασικοί περιορισμοί που αφορούν την παραγωγή και την λειτουργία. Περιορισμοί παραγωγής:

$$\sum_{a \in A} \sum_{w \in W} R_{aw} \geq P$$
$$y_{aw} \geq 0, R_{aw} \geq 0, \quad \forall a \in A, \forall w \in W \quad (2),(3)$$

Όπου:

P: Η αναμενόμενη ποσότητα παραγωγής

$R_{aw}$  : Η ποσότητα του μεταφερόμενου υλικού από τον φορτωτή (α) στο φορτηγό τύπου (w).

Ο συγκεκριμένος περιορισμός θεωρείται ως ο περιορισμός που αφορά την παραγωγή και εξασφαλίζει ότι η ποσότητα που εξορύσσετε είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη ποσότητα που έχει υπολογιστεί για την λειτουργία του μεταλλείου. Η εξίσωση (3) επιβάλλει την ακεραιότητα και την μη αρνητικότητα του ακέραιου αριθμού και των συνεχών μεταβλητών απόφασης του συστήματος αντίστοιχα.

### **Περιορισμοί λειτουργίας**

Η προσομοίωση συστημάτων διακριτών γεγονότων (DES) λαμβάνεται υπόψη ως ένα είδος δυναμικού μοντέλου προσομοίωσης. Σε αυτό το μοντέλο, η κατάσταση

του συστήματος αλλάζει άμεσα σε απόκριση ρητά διακριτών γεγονότων όπως αφίξεις, αναχωρήσεις, αλλαγή των βαρδιών, αποτυχία και αδυναμία πρόσβασης στους πόρους και στις οντότητες του συστήματος. Αναπτύσσεται συνεπώς ένα μοντέλο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων για τη διαμόρφωση περιορισμών στην λειτουργία της μεταφοράς με στόχο τη βελτιστοποίηση ενός προγράμματος. Αυτή η μέθοδος βασίζεται στη δημιουργία ορισμένων οντοτήτων, περνώντας μέσω ενός δικτύου μονάδων εξυπηρέτησης. Στη διαδικασία, εάν μία μονάδα εξυπηρέτησης είναι απασχολημένη, οι οντότητες περιμένουν για να ξεκινήσουν τη δραστηριότητά τους. Επιπλέον, υπάρχουν αρκετές λογικές πύλες για να στείλουν τις οντότητες που έχουν δημιουργηθεί στον σωστό προορισμό τους (π.χ. θέση απόρριψης ή θραυστήρας μεταλλευμάτων). Μία από τις βασικές πτυχές του DES αναφέρεται στον καθορισμό της διάρκειας εργασίας για κάθε μία δραστηριότητα όπως χρόνοι εξυπηρέτησης του φορτωτή, το χρόνο που ταξιδεύει κάθε φορτηγό και τους χρόνους εκφόρτωσης του υλικού. Για να καθοριστούν οι συγκεκριμένες τιμές, συλλέγονται ιστορικά δεδομένα χρόνου σχετικά με τον κύκλο μεταφοράς δηλαδή από τους χρόνους που προκύπτουν από διαδικασίες φόρτωσης, μεταφοράς, απόρριψης και επιστροφής. Τότε, μια σωστή πιθανολογική συνάρτηση κατανομής ενσωματώνεται στα δεδομένα χρόνου.

Σε μια προσομοίωση λειτουργίας μεταφορών, υπάρχουν δύο κύριες λογικές πύλες που αποτελούνται από γεγονότα άφιξης και αναχώρησης φορτηγών. Αυτού του είδους οι λογικές πύλες χρησιμοποιούνται για διαφορετικές καταστάσεις όπως οι διαδικασίες φόρτωσης και ταξιδιού των φορτηγών. Όταν λάβει χώρα ένα συμβάν άφιξης φορτηγού, τότε είναι πιθανές δύο διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί το σύστημα μεταφορών. Στην πρώτη περίπτωση, ο φορτωτής είναι σε αδράνεια και έτοιμος να εξυπηρετήσει το φορτηγό. Στη δεύτερη περίπτωση, ο φορτωτής είναι απασχολημένος και το φορτηγό πηγαίνει υποχρεωτικά στη σχηματισμένη γραμμή ουράς. Μετά την ολοκλήρωση της εξυπηρέτησης και την αναχώρηση ενός φορτηγού, ο φορτωτής ξεκινά μία νέα διαδικασία εξυπηρέτησης εάν υπάρχει τουλάχιστον ένα φορτηγό στην ουρά. Διαφορετικά, ο φορτωτής μένει σε αδράνεια μέχρι να φτάσει άλλο φορτηγό. Γενικά, οι χρόνοι μεταξύ των αφίξεων των φορτηγών και η διάρκεια φόρτωσης λαμβάνουν τιμές από γεννήτριες τυχαίων αριθμών που ακολουθούν συναρτήσεις πιθανολογικής κατανομής.

Μέσες τιμές έχουν διαμορφωθεί για τους χρόνους εξυπηρέτησης και τους χρόνους μεταξύ των αφίξεων σύμφωνα με τις εξισώσεις (4) και (5):

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i}{m}, \quad (4)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{m}, \quad (5)$$

Όπου :

$\bar{\mu}$  : Ο μέσος χρόνος εξυπηρέτησης

$\bar{\lambda}$  : Ο χρόνος μεταξύ των αφίξεων

$\mu_i$  : Ο χρόνος εξυπηρέτησης κάθε μίας διαδικασίας φόρτωσης

$\lambda_i$  : Ο χρόνος μεταξύ των αφίξεων κάθε μίας διαδικασίας ξεχωριστά

$m$  : Ο συνολικός αριθμός διαδικασιών

#### **Διαδικασία δημιουργίας συστήματος προσομοίωσης**

Το τελικό βήμα της δημιουργίας του συστήματος αφορά την επίτευξη των βέλτιστων λύσεων. Σε αυτό το βήμα, οι μεταβλητές απόφασης ορίζονται αρχικά στο μοντέλο και στη συνέχεια εκτελείται το μοντέλο DES. Το DES συνδέεται με την αντικειμενική συνάρτηση που έχει περιγραφεί προηγουμένως και η αναμενόμενη τιμή αξιολογείται με βάση τον στόχο λειτουργίας που έχει τεθεί. Εάν έχει εκχωρηθεί ο ελάχιστος αριθμός φορτηγών στα σημεία φόρτωσης, τότε ικανοποιούνται οι αντικειμενικές απαιτήσεις λειτουργίας και οι βέλτιστες λύσεις που ελήφθησαν για το πρόβλημα της κατανομής. Αλλιώς εξετάζεται άλλος συνδυασμός μεταβλητών απόφασης και υπολογίζεται εκ νέου η αναμενόμενη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να επιτευχθεί ο βέλτιστος συνδυασμός των μεταβλητών απόφασης. Για να ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτόματα χωρίς να υπάρχει η ανάγκη για εξέταση τυχαίων σεναρίων, ένας γενετικός αλγόριθμος (GA – Genetic Algorithm) εισάγεται για την επίτευξη της καλύτερης λύσης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μία από τις κοινές μεθόδους βελτιστοποίησης για την επίλυση μοντέλων προγραμματισμού μικτών ακέραιων αριθμών. Επιπλέον, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν την δυνατότητα χρήσης λύσεων προηγουμένων

προβλημάτων από παγκόσμια κλίμακα για το πρόγραμμα βελτιστοποίησης. Είναι μία μέθοδος που βασίζεται στην αναζήτηση, η οποία δεν καταγράφει τοπικές βέλτιστες λύσεις.

Ο γενετικός αλγόριθμος περιέχει πολλές κρίσιμες και βασικές φάσεις, όπως η τιμή κωδικοποίησης, ο πληθυσμός, η επιλογή, η διασταύρωση, η μετάλλαξη και τα κριτήρια σύγκλισης (Malhotra et al. 2011, Deep et al. 2009).

### **Γενετικός αλγόριθμος**

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι εμπνευσμένοι από την βιολογία και βασίζονται στην εξέλιξη μέσω της γενετικής μετάλλαξης, φυσικής επιλογής και διασταύρωσης. Ουσιαστικά αποτελούν μια μέθοδο αναζήτησης βέλτιστης λύσης και για αυτό χρησιμοποιούνται σε προβλήματα βελτιστοποίησης όπου ο πληθυσμός εξελίσσεται προς το καλύτερο.

Η λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι σχετικά απλή. Ξεκινώντας ο αλγόριθμος δημιουργεί τυχαία αντίγραφα του γενετικού κώδικα που λέγονται χρωμοσώματα και αναπαριστούνται με ακολουθίες από bit. Στη συνέχεια αξιολογεί το κάθε χρωμόσωμα με μια συνάρτηση καταλληλότητας και εφαρμόζει διαδικασίες αναπαραγωγής όπως η επιλεκτική αναπαραγωγή (selective reproduction), η διασταύρωση (crossover) και η τυχαία μετάλλαξη (random mutation).

Ο νέος πληθυσμός που προκύπτει είναι η νέα γενιά και αποτελεί τον γενετικό κώδικα πάνω στον οποίο θα γίνει η νέα επανάληψη. Η διαδικασία της επανάληψης (αναπαραγωγή και εξέλιξη) μπορεί να τερματίσει με διάφορους τρόπους όπως μετά από ένα μέγιστο αριθμό επαναλήψεων ή όταν πάψει η αύξηση της καταλληλότητας ή ακόμα όταν βρεθεί κάποια ικανοποιητική καταλληλότητα.

Η διαδικασία της φυσικής επιλογής ξεκινά με την επιλογή των πιο ικανών ατόμων από έναν πληθυσμό. Παράγουν απογόνους που κληρονομούν τα χαρακτηριστικά των γονέων τα οποία θα προστεθούν στην επόμενη γενιά. Εάν οι γονείς έχουν καλύτερη φυσική κατάσταση, οι απόγονοί τους θα είναι καλύτεροι από τους γονείς και θα έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιβιώσουν. Αυτή η διαδικασία συνεχίζει να επαναλαμβάνεται και στο τέλος, θα βρεθεί μια γενιά με τα καλύτερα άτομα.

Αυτή η έννοια μπορεί να εφαρμοστεί και στην τεχνητή επιλογή. Έτσι για ένα πρόβλημα σε ένα σύνολο λύσεων επιλέγουμε το σύνολο των καλύτερων από αυτές και παράγουμε τις επόμενες γενεές.

Σε έναν γενετικό αλγόριθμο λαμβάνονται υπόψη πέντε φάσεις.

- Αρχικός πληθυσμός
- Ταξινόμηση με βάση μια συνάρτηση αξιολόγησης
- Επιλογή
- Διασταύρωση
- Μετάλλαξη

Η διαδικασία ξεκινά με ένα σύνολο ατόμων που ονομάζεται πληθυσμός. Κάθε άτομο είναι μια λύση στο πρόβλημα. Ένα άτομο χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο παραμέτρων (μεταβλητών) τα οποία ονομάζονται γονίδια.

Σε έναν γενετικό αλγόριθμο, το σύνολο των τιμών των γονιδίων ενός ατόμου αναπαρίσταται με ένα πίνακα. Συνήθως, χρησιμοποιούνται δυαδικές τιμές (συμβολοσειρά 1 και 0). Με βάση την κωδικοποίηση των τιμών των γονιδίων κωδικοποιείται και παράγεται το λεγόμενο χρωμόσωμα.

### **Λειτουργία αξιολόγησης (Fitness)**

Η συνάρτηση fitness καθορίζει πόσο κατάλληλο είναι ένα άτομο (την ικανότητα ενός ατόμου να ανταγωνίζεται άλλα άτομα). Ουσιαστικά με βάση μια συνάρτηση δίνεται βαθμολογία σε κάθε άτομο. Η πιθανότητα να επιλεγεί ένα άτομο για αναπαραγωγή βασίζεται στη βαθμολογία του.

### **Επιλογή**

Η ιδέα της φάσης επιλογής είναι η διαδικασία επιλογής των πιο κατάλληλων ατόμων που θα κληρονομήσουν τα γονίδιά τους στην επόμενη γενιά.

Δύο ζευγάρια ατόμων (γονείς) επιλέγονται με βάση τη βαθμολογία της κατάστασης τους. Τα άτομα με υψηλή φυσική κατάσταση έχουν περισσότερες πιθανότητες να επιλεγούν για αναπαραγωγή.

### **Crossover**

Η διασταύρωση είναι η πιο σημαντική φάση σε έναν γενετικό αλγόριθμο. Για κάθε ζευγάρι γονέων που πρόκειται να επιλεγεί για αναπαραγωγή, ένα σημείο διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία μέσα από τα γονίδια και με βάση μια διαδικασία παράγονται οι απόγονοι. Πιο συγκεκριμένα σε ένα γονίδιο μπορεί να επιλεγεί το μέγιστο, το ελάχιστο, ο μέσος όρος των τιμών ή μια άλλη συνάρτηση που παίρνει σαν είσοδο τις δύο τιμές των γονιδίων των γονέων και παράγει ένα παιδί.

### **Μετάλλαξη**

Σε ορισμένους νέους απογόνους, ορισμένα από τα γονιδιά τους μπορούν να υποβληθούν σε μετάλλαξη με μια πιθανότητα. Αυτό σημαίνει ότι μερικά από τα γονίδια θα αλλάξουν με συνήθως τυχαία διαδικασία παράγοντας ένα μεταλλαγμένο απόγονο.

### **Τερματισμός - Αποτέλεσμα**

Ο αλγόριθμος τερματίζεται εάν ο πληθυσμός συγκλίνει (δεν παράγει απογόνους που διαφέρουν σημαντικά από την προηγούμενη γενιά). Τότε λέγεται ότι ο γενετικός αλγόριθμος έχει δώσει ένα σύνολο λύσεων στο πρόβλημα.

Διαφορετικά ο αλγόριθμος τερματίζει μετά από  $N$  γενεές.

### **2.3.2. Μελέτη περίπτωσης με την χρήση μοντέλου προσομοίωσης**

Η μελέτη περίπτωσης που εξετάζεται στην συνέχεια αναφέρεται στην εργασία των Morad et al. (2019). Σκοπός της είναι η δημιουργία της βέλτιστης κατανομής για φορτηγά στο μεταλλείο χαλκού Sungun στο Ταμπρίζ του Ιράν. Το συγκεκριμένο μεταλλείο βρίσκεται στο βορειοανατολικό Ιράν. Το μεταλλείο Sungun θεωρείται το δεύτερο μεγαλύτερο μεταλλείο χαλκού στο Ιράν και εκτιμάται ότι διαθέτει ένα δισεκατομμύριο τόνους σε απόθεμα μεταλλεύματος. Η μεταφορά εντός του μεταλλείου πραγματοποιείται μέσω ενός συστήματος φορτωτή-φορτηγού. Ο εργολάβος του μεταλλείου διαχειρίζεται τη μεταφορά χρησιμοποιώντας 25 έως 30 φορτηγά ανά βάρδια. Διαφορετικά είδη δεδομένων πεδίου συλλέχθηκαν για την ανάλυση της λειτουργίας του στόλου των οχημάτων. Ο Πίνακας 5 αντιπροσωπεύει τη συγκεντρωμένη βάση δεδομένων για τη μοντελοποίηση του συστήματος λειτουργίας μεταφορών στο μεταλλείο Sungun. Σύμφωνα με τον Πίνακα 5 υπάρχουν τρεις θέσεις εργασίας που αφορούν το μέταλλευμα (θέσεις 1, 2 και 3) και μία θέση για τα στείρα (τέταρτο σημείο). Το εξορυσσόμενο υλικό

αποστέλλεται στον θραυστήρα και τα στείρα στην συνέχεια στην θέση απόρριψης, αντίστοιχα. Τα φορτηγά των 60 τόνων είναι κατανεμημένα στην θέση 3 και τα φορτηγά των 100 τόνων κατανέμονται στις θέσεις εργασίας 1, 2 και 4. Επιπλέον, ο χρόνος φόρτωσης, οι χρόνοι μεταφοράς, εκκένωσης και επιστροφής αναφέρονται σε σχέση με κάθε θέση εργασίας στον Πίνακα 5. Με βάση το χρονοδιάγραμμα παραγωγής του μεταλλείου, το σχέδιο παραγωγής δίνεται επίσης στον Πίνακα 5. Επιπλέον, ακολουθείται πολιτική σταθερής δρομολόγησης. Τα συγκεντρωθέντα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση μιας μεταφοράς σε ένα μοντέλο προσομοίωσης διακριτών γεγονότων.

Operation Features	Numerical Values		
Number of working benches	4		
Type of working benches	3 working benches of ore, 1 working bench of waste		
Number of unloading points	2		
Type of unloading points	1 ore crusher, 1 waste dump		
Capacity of loading systems	Working bench 1: Hyundai excavator: 5.1 m <sup>3</sup>		
	Working bench 2: Komatsu loader: 6.1 m <sup>3</sup>		
	Working bench 3: CAT loader: 5.4 m <sup>3</sup>		
	Working bench 4: Liebherr shovel: 18 m <sup>3</sup>		
Average truck loading times (Seconds), Average truck unloading times (Seconds)	Working bench 1 to Crusher	Loading time: 255.6	Unloading time: 50
	Working bench 2 to Crusher	Loading time: 306.6	Unloading time: 43
	Working bench 3 to Crusher	Loading time: 226.8	Unloading time: 34
	Working bench 4 to Waste Dump	Loading time: 117.6	Unloading time: 45
Average truck haul and return times (Seconds)	Working bench 1 to Crusher	Haul time: 792	Return time: 612
	Working bench 2 to Crusher	Haul time: 402	Return time: 313.8
	Working bench 3 to Crusher	Haul time: 486	Return time: 426
	Working bench 4 to Waste Dump	Haul time: 510	Return time: 384
Production plans (Tons per shift)	Working bench 1	3400	
	Working bench 2	5000	
	Working bench 3	3000	
	Working bench 4	5600	
Size of trucks (Tons)	100 and 60		

Πίνακας 5: Δεδομένα για τον στόλο των οχημάτων μεταφοράς (Amin Moniri-Morad, et al. 2019)

### Λειτουργία μοντελοποίησης με τη χρήση προσομοίωσης διακριτών γεγονότων

Η προσομοίωση λειτουργίας μεταφορών κατασκευάστηκε σε περιβάλλον MATLAB Simulink. Μια εργαλειοθήκη SimEvents χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη μιας προσομοίωσης διακριτών γεγονότων (MathWorks, 2015). Στα SimEvents, μια διαδικασία λειτουργίας μεταφορών προκύπτει μέσω ενός συνδυασμού διαφόρων μπλοκ και των στοιχείων τους, όπως η γεννήτρια οντοτήτων, η ουρά, οι διακομιστές, αναθέσεις χαρακτηριστικών, τυχαίες γεννήτριες συμβάντων, πρότυπα διαδρομής, λογικές πύλες και τέλος η λειτουργία των μπλοκ.

Σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης στο μεταλλείο, όλα τα υλικά, το σύστημα φόρτωσης και τα φορτηγά αρχικά δημιουργούνται και τοποθετούνται σε θέσεις

εργασίας. Στη συνέχεια, υλοποιούνται διαδικασίες φόρτωσης, μεταφοράς και εκκένωσης. Στη συνέχεια, τα διάφορα υλικά αποστέλλονται στους κατάλληλους προορισμούς και τα άδεια φορτηγά επιστρέφουν για την επόμενη δρομολόγησή τους.

### **Αποτελέσματα μοντελοποίησης**

Το επόμενο βήμα είναι η ολοκλήρωση του γενετικού αλγόριθμου για την επίτευξη της βέλτιστης κατανομής φορτηγών με την χρήση βελτιστοποίησης που βασίζεται στην προσομοίωση. Το απαιτούμενο πλήθος φορτηγών υπολογίστηκε λαμβάνοντας υπόψη τις λειτουργικές ετερογένειες. Μπορεί επίσης να απαιτείται διαδικασία ανακατανομής εάν ο αριθμός των διαθέσιμων φορτηγών αλλάξει λόγω ανεπιθύμητων σεναρίων όπως η εμφάνιση αστοχιών ή βλαβών. Μια εναλλακτική λύση, θα ήταν εφεδρικά φορτηγά που θα αντικαθιστούσαν τα φορτηγά που θα αντιμετώπιζαν πρόβλημα για να ανταποκριθούν στους στόχους παραγωγής. Βέβαια μία τέτοια λύση θα απαιτούσε την επένδυση αρκετά μεγαλύτερου αρχικού κεφαλαίου.

Σε αυτό το βήμα, το μοντέλο προσομοίωσης επικυρώθηκε με βάση μια πραγματική λειτουργία. Με βάση την λειτουργία της μονάδας σε μία βάρδια, ο αριθμός των 2, 1, 3 και 4 φορτηγών κατατάχθηκαν στις θέσεις εργασίας 1 έως 4, αντίστοιχα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, η ποσότητα των υλικών που μεταφέρθηκαν ήταν 2700, 7300, 3600, 8600 τόνοι ανά βάρδια από κάθε θέση εργασίας, αντίστοιχα. Αυτά τα αποτελέσματα προσαρμόστηκαν κατά προσέγγιση με τα πραγματικά που προκύπτουν όταν η μονάδα βρίσκεται σε λειτουργία. Επομένως, το κατασκευασμένο μοντέλο μπορεί να αναπτυχθεί για παρόμοιες καταστάσεις.

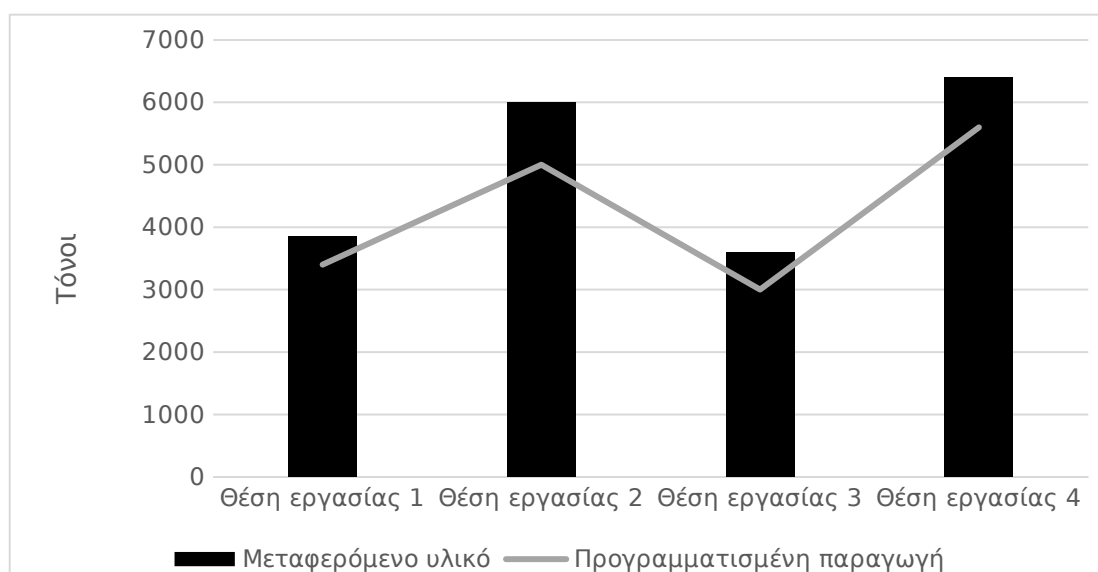
Στην επόμενη φάση εξετάστηκε το μοντέλο ώστε να βρεθεί η βέλτιστη κατανομή φορτηγών για τις διάφορες θέσεις εργασίας. Σε αυτή την περίπτωση, αναπτύχθηκε η μέθοδος SBO (Simulation Based Optimization) για το μοντέλο, προκειμένου να ανταποκρίνεται στην τρέχουσα ανάγκη για παραγωγή σε μία μόνο βάρδια. Ένα συγκεκριμένο σχέδιο παραγωγής ήταν έτοιμο για κάθε θέση εργασίας, έτσι ώστε να είναι απαραίτητο να ολοκληρωθεί κατά την διάρκεια μίας βάρδιας εργασίας. Ο Πίνακας 6 δίνει τη βέλτιστη ποσότητα φορτηγών για τις θέσεις εργασίας 1 έως 4 στο μοντέλο προσομοίωσης.



Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6, θα πρέπει να εκχωρηθούν τρία φορτηγά σε κάθε θέση εργασίας για τη διατήρηση της ελάχιστης ποσότητας της προγραμματισμένης παραγωγικότητας. Επιπλέον, υπολογίζεται ο αθροιστικός αριθμός αναθέσεων φορτηγών για τις θέσεις εργασίας 1 έως 4 ως 39, 60, 60 και 64, αντίστοιχα. Τα σχέδια παραγωγής και ο αθροιστικός αριθμός αναθέσεων φορτηγών είναι για μία βάρδια εργασίας. Το γράφημα δείχνει την ποσότητα του μεταφερόμενου υλικού και τους στόχους παραγωγής για την κάθε θέση εργασίας. Η ποσότητα των μεταφερόμενων υλικών είναι μεγαλύτερη από την προγραμματισμένη παραγωγική ικανότητα. Έτσι, οι περιορισμοί παραγωγής ικανοποιούνται από έναν ελάχιστο αριθμό κατανεμημένων φορτηγών.

Θέσεις εργασίας	Αριθμός αναθέσεων	Ιδανικός αριθμός φορτηγών
1	39	3
2	60	3
3	60	3
4	64	3

Πίνακας 6: Βελτιστοποίηση απόδοσης κατανομής φορτηγών στο σύστημα φόρτωσης- μεταφοράς



Εικόνα 10: Αποτελέσματα χρήσης μεθόδου SBO για διαφορετικές θέσεις εργασίας



## Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης οδηγούν στην εύρεση της βέλτιστης κατανομής των φορτηγών στις αντίστοιχες θέσεις εργασίας σε σχέση με υφιστάμενους λειτουργικούς και παραγωγικούς περιορισμούς στο μεταλλείο. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να αναλυθεί το μοντέλο προσομοίωσης για να αποκαλυφθούν τα εμπόδια και τα σημεία συμφόρησης κατά την λειτουργία της μεταφορικής διαδικασίας στο μεταλλείο. Ο Πίνακας 7 περιγράφει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για τη χρήση φορτωτή, τους χρόνους αδράνειας και τους χρόνους αναμονής για το φορτηγό.

Σύμφωνα με τον Πίνακα 7, η υψηλότερη και η χαμηλότερη χρήση των συστημάτων φόρτωσης συμπίπτουν με τη δεύτερη και τέταρτη θέση εργασίας (79,9 και 32,6 τοις εκατό), αντίστοιχα. Στη συνέχεια λαμβάνεται υπόψη η αξιοποίηση του συστήματος φόρτωσης που θεωρείται ως ένα από τα σημαντικότερα σημεία συμφόρησης, δημιουργώντας σοβαρό πρόβλημα στην αποτελεσματική οργάνωση της μεταφοράς.

Στην Εικόνα 11 ο μέσος αθροιστικός χρόνος που βρίσκεται ο φορτωτής σε αδράνεια και οι χρόνοι αναμονής των φορτηγών υπολογίζονται για κάθε θέση εργασίας κατά τη διάρκεια μίας βάρδιας.

Σύμφωνα με την Εικόνα 11, οι μέγιστοι και οι ελάχιστοι χρόνοι αδράνειας του φορτωτή σχετίζονται με την τέταρτη και την δεύτερη θέση. Αντίθετα, ο μέγιστος και ο ελάχιστος χρόνος αναμονής του φορτηγού συμπίπτουν με το δεύτερο και τέταρτο σημείο. Οι αναλύσεις αποκαλύπτουν ότι ο λόγος των χρόνων αδράνειας φορτωτή προς τους χρόνους αναμονής φορτηγού υπολογίζεται 4.13, 0.76, 8.1 και 13.8 για τις θέσεις εργασίας 1 έως 4, αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του SBO, θα ήταν χρήσιμο να εξεταστεί το ενδεχόμενο δρομολόγησης των οχημάτων σε πραγματικό χρόνο σαν στρατηγική για το σύστημα μεταφοράς.

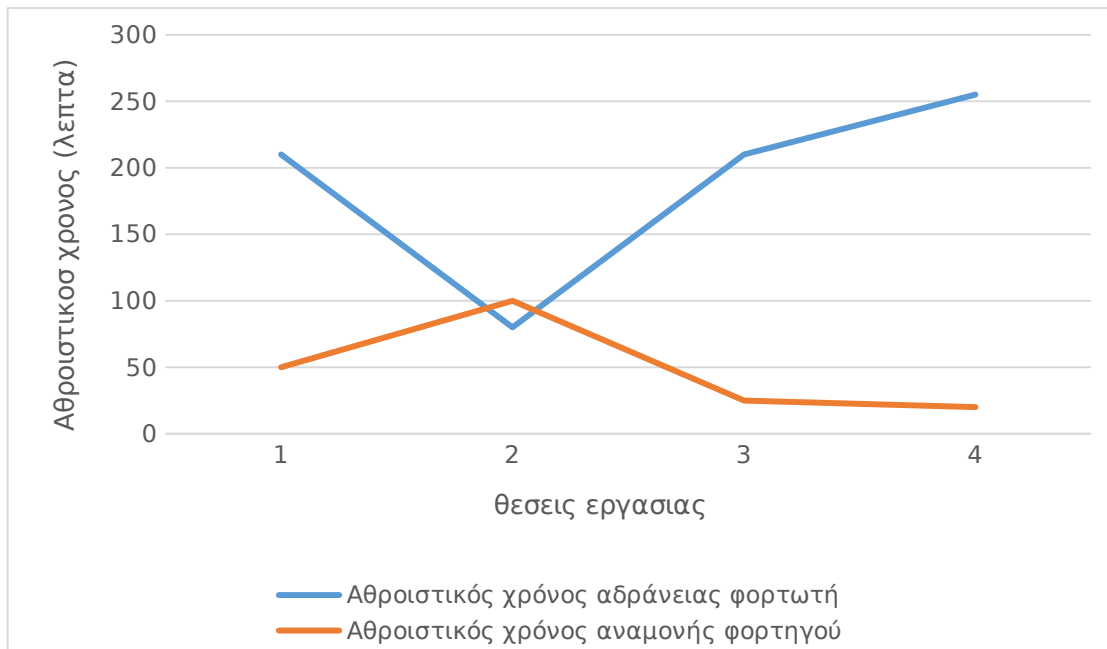
Έτσι, τα χρονοδιαγράμματα παραγωγής του μεταλλείου επιτυγχάνονται με μικρότερο μέγεθος στόλου οχημάτων και βελτιώνεται η αποδοτικότητα των φορτωτών.

	Αξιοποίηση Συστήματος Φόρτωσης			Μέσοι Χρόνοι Αδράνειας Συστήματος Φόρτωσης		
Θέσεις εργασίας	Μέση τιμή (%)	Κατανομή	Παράμετροι	Μέση τιμή (Ωρες)	Κατανομή	Παράμετροι
1	49.2	Λογαριθμολογιστική (Λ.Λ.)	$\alpha = 32.46$ $\beta = 0.428$	0.0895 (5.37 λεπτά)	Λ.Λ.	$\alpha = 19.7$ $\beta = 0.089$
2	79.9	Weibull	$\alpha = 53.79$ $\beta = 0.807$	0.021 (1.26 λεπτά)	Λ.Λ.	$\alpha = 17.039$ $\beta = 0.021$
3	44.3	Κανονική	$\mu = 0.443$ $\sigma = 0.05$	0.0568 (3.4 λεπτά)	Λ.Λ.	$\alpha = 28.12$ $\beta = 0.057$
4	32.6	Λ.Λ.	$\alpha = 44.75$ $\beta = 0.33$	0.0659 (4 λεπτά)	Λ.Λ.	$\alpha = 30.31$ $\beta = 0.066$

Πίνακας 7: Ανάλυση κατασκευής μοντέλου προσομοίωσης

Μέσοι Χρόνοι Αναμονής Φορτηγών			
Θέσεις εργασίας	Μέση τιμή (Ωρες)	Κατανομή	Παράμετροι
1	0.0217 (1.3 λεπτά)	Λ.Λ.	$\mu = -3.921$ $\sigma = 0.428$
2	0.0277 (1.66 λεπτά)	Λ.Λ.	$\mu = 10.66$ $\sigma = 0.0273$
3	0.007 (0.42 λεπτά)	Λ.Λ.	$\alpha = 3.08$ $\beta = 0.0059$
4	0.0049 (0.29 λεπτά)	Λ.Λ.	$\alpha = 4.65$ $\beta = 0.0045$

Πίνακας 7: Ανάλυση κατασκευής μοντέλου προσομοίωσης



Εικόνα 11: Διάγραμμα : Μέσοι αθροιστικοί χρόνοι αδράνειας φορτωτή και αναμονής φορτηγού

### Συμπεράσματα μελέτης περίπτωσης

Η μελέτη περίπτωσης που παρουσιάστηκε επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για τη βέλτιστη κατανομή των φορτηγών σε ένα σύστημα φόρτωσης και μεταφοράς. Από αυτή την άποψη, μια μέθοδος βελτιστοποίησης που βασίζεται σε προσομοίωση προτάθηκε με βάση τον ταυτόχρονο συνδυασμό των τεχνικών βελτιστοποίησης και προσομοίωσης. Σε αυτή την προσέγγιση, ένα αποδεκτό επίπεδο λειτουργικής πολυπλοκότητας και αβεβαιοτήτων ελήφθησαν υπόψη για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτή η διαδικασία οδήγησε στη δημιουργία μιας ρεαλιστικής κατανομής των φορτηγών σε ένα δυναμικό περιβάλλον. Για την ανάλυση του μοντέλου, το μεταλλείο χαλκού Sungun θεωρήθηκε ως πραγματική μελέτη περίπτωσης.

Στη μελέτη περίπτωσης, ένας ελάχιστος αριθμός φορτηγών μεταφοράς εκχωρήθηκε σε κάθε μία θέση εργασίας και ουσιαστικά, η προγραμματισμένη παραγωγή επιτεύχθηκε για το μεταλλείο με βάση το σύστημα παραγωγής που αυτό έχει. Τρία φορτηγά διατέθηκαν σε κάθε θέση εργασίας ως η βέλτιστη λύση. Η ποσότητα των μεταφερόμενων υλικών ήταν 3900, 6000, 3600 και 6400 τόνοι από το κάθε σημείο, αντίστοιχα. Επιπλέον, μεθοδολογία που αναπτύχθηκε έχει τη δυνατότητα να αναλύει λεπτομέρειες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης, των χρόνων αναμονής φορτηγών και των χρόνων αδράνειας του συστήματα φόρτωσης.

Για παράδειγμα, το επίπεδο αξιοποίησης των φορτωτών ήταν 49.2, 79.9, 44.3 και 32.6, υποδεικνύοντας ότι το σύστημα μεταφορών δεν λειτουργεί αποτελεσματικά. Σύμφωνα με τους δείκτες λειτουργίας, τα διάφορα σημεία συμφόρησης εντοπίστηκαν για το σύνολο της μεταλλευτικής μονάδας. Τέλος, η βελτίωση των αδυναμιών του στόλου των οχημάτων με την χρήση μιας πολιτικής δρομολόγησης σε πραγματικό χρόνο συνίσταται για την αύξηση της αποδοτικότητας και της παραγωγικότητας του συστήματος.

Σε γενικότερο πλαίσιο είναι κοινώς αποδεκτό ότι η χρήση μοντέλων προσομοίωσης στην μεταλλευτική βιομηχανία άλλαξε σε πολύ μεγάλο βαθμό τον τρόπο λειτουργίας αυτής. Σήμερα είναι απαραίτητη προϋπόθεση για κάθε βιομηχανία και ιδιαίτερα στον μεταλλευτικό κλάδο να κάνει χρήση εργαλείων προσομοίωσης με στόχο την σωστότερη αρχική σχεδίαση και φυσικά την επίτευξη της καλύτερης δυνατής λειτουργίας. Τα μοντέλα προσομοίωσης έχουν καταφέρει να αυξήσουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την αποδοτικότητα στα μεταλλεία σε όλες τις φάσεις λειτουργίας και φυσικά και στην φάση της φόρτωσης και μεταφοράς. Οι χειριστές γνωρίζουν εκ των προτέρων πια βήματα θα πρέπει να ακολουθήσουν έτσι ώστε να μην υπάρχουν καθυστερήσεις, τα όποια λάθη εντοπίζονται πολύ γρηγορότερα και μπορούν να εκλείψουν με την σωστή ανάλυση τους σε ένα μοντέλο προσομοίωσης και φυσικά ίσως το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της προσομοίωσης είναι η πολύ μεγάλη συνεισφορά της στην μείωση του κόστους λειτουργίας αφού ο εξοπλισμός χρησιμοποιείται πολύ πιο αποδοτικά. Φυσικά η χρήση των διάφορων μοντέλων προσομοίωσης δεν αποτελεί πανάκεια αφού κανένα, όσο εξελιγμένο και να είναι, δεν μπορεί να αποτυπώσει ούτε και να προβλέψει πλήρως τις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν σε ένα μεταλλείο και φυσικά δεν μπορεί να προβλέψει τυχαία γεγονότα.

## **2.4 Προβλήματα στην διαδικασία μεταφοράς εντός των μεταλλείων**

### **2.4.1 Γενικά προβλήματα στις μεταλλευτικές μεταφορές**

Τα κύρια προβλήματα που αναφέρονται είναι:

- Η κλιματική κρίση που βιώνει ο πλανήτης επηρεάζει άμεσα την λειτουργία των μεταλλείων και περισσότερο από όλα τις μεταφορές. Καθώς η θερμοκρασία της Γης αυξάνεται, οι καιρικές διαταραχές συμβαίνουν με μεγαλύτερη συχνότητα. Οι φυσικές καταστροφές όπως οι τυφώνες, οι

καταιγίδες, οι κατολισθήσεις και οι κυκλώνες έχουν δει τον αριθμό τους να αυξάνεται με ραγδαίο τρόπο. Οι εποχές των βροχών μετατοπίζονται από το κανονικό τους πρόγραμμα. Κατά τη διάρκεια των κυμάτων καύσωνα, οι πυρκαγιές καταστρέφουν ολόκληρες περιοχές. Το λιώσιμο των πάγων και οι καταρρακτώδεις καταιγίδες αυξάνουν τα επίπεδα των υδάτων των ωκεανών και των ποταμών, αυξάνοντας τον κίνδυνο πλημμύρας. Τα παραπάνω καθιστούν πολύ πιο δύσκολη την μεταφορά εντός ενός μεταλλείου. Οι εσωτερικοί δρόμοι καταστρέφονται, ο εξοπλισμός φθείρεται στις ακραίες θερμοκρασίες και συνθήκες πολύ γρηγορότερα, ενώ φαινόμενα όπως οι πλημμύρες και φυσικά οι κατολισθήσεις βάζουν σε άμεσο κίνδυνο τόσο τους χειριστές όσο και τον εξοπλισμό. Παράλληλα τα μέτρα που λαμβάνουν οι κυβερνήσεις για την κλιματική αλλαγή μέσω της μείωσης των ρύπων αναγκάζουν τα ορυχεία να προχωρούν σε μεγάλες επενδύσεις κεφαλαίου για τον εκσυγχρονισμό του στόλου χωρίς πολλές φορές να έχουν αποσβέσει προηγούμενες αγορές.

- Η έλλειψη ανθρώπινου δυναμικού είναι μια άλλη μεγάλη πρόκληση για τον τομέα των μεταφορών της εξορυκτικής βιομηχανίας. Ανάλογα με την περιοχή όπου πραγματοποιείται το έργο εξόρυξης αλλάζει και η δυνατότητα εύρεσης εργαζομένων αφού το γεωπολιτικό περιβάλλον είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την προθυμία των εργαζομένων να εργαστούν σε πολιτικά ασταθείς περιοχές. Η μεταφορά προϊόντων εξόρυξης σε μια περιοχή όπου η κοινωνική αποδοχή του έργου παραμένει υπό αμφισβήτηση μπορεί να είναι ένα επικίνδυνο και πολύπλοκο έργο.
- Η παγκόσμια οικονομική κατάσταση αναμένεται να επηρεάσει την μεταλλευτική βιομηχανία και συνεπώς και τις μεταφορές στο άμεσο μέλλον. Αναμφίβολα, οι επενδύσεις στην εξορυκτική βιομηχανία συσχετίζονται με την προσφορά και τη ζήτηση της αγοράς για έναν συγκεκριμένο φυσικό πόρο. Με την παγκόσμια ζήτηση να καταρρέει είναι πολύ πιθανό να δημιουργηθεί σοβαρό ζήτημα βιωσιμότητας για πολλές μεταλλευτικές μονάδες. Στην προσπάθεια αντιμετώπισης μίας τέτοιας κατάστασης η μείωση του στόλου των οχημάτων και συνεπώς η μείωση του απαραίτητου προσωπικού είναι συνήθως μια από τις πρώτες λύσεις. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη φθορά για τον εξοπλισμό που θα παραμείνει ενεργός, μεγαλύτερες και ίσως λιγότερο αποδοτικές βάρδιες, ενώ αντίστοιχα σε περίπτωση συνολικής μείωσης της

παραγωγής μεγάλο μέρος του εξοπλισμού θα χρειαστεί να μπει σε κατάσταση μακράς αποθήκευσης με άμεση συνέπεια η κάθε εταιρεία να στερείται της δυνατότητας απόσβεσης της αρχικής επένδυσης σε αυτό τον εξοπλισμό. Τέλος με τα διαθέσιμα κεφάλαια να είναι σημαντικά μειωμένα είναι αδύνατο να υπάρξει εκσυγχρονισμός του στόλου μεταφοράς με νέα οικονομικότερα και αποδοτικότερα οχήματα.



*Εικόνα 12: Κατολίσθηση με 4 νεκρούς και καταστροφή εξοπλισμού στο μεταλλείο Haryana στην Ινδία (Hindustan Times)*

#### **2.4.2 Το βασικό πρόβλημα στα συστήματα μεταφοράς**

Το βασικότερο πρόβλημα στα συστήματα μεταφοράς στα μεταλλεία δεν έχει άμεση σχέση με εξωτερικούς παράγοντες όπως αυτοί περιεγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Αντιθέτως προκύπτει από την ίδια την λειτουργία του συστήματος. Βασικός σκοπός κάθε συστήματος μεταφοράς, όχι μόνο στον μεταλλευτικό κλάδο, είναι να επιτελεί την λειτουργία του με το μικρότερο δυνατό κόστος, αλλά ταυτόχρονα να αυξάνεται στο μέγιστο η παραγωγικότητα. Στην πραγματικότητα η δρομολόγηση φορτηγών σε υπαίθρια μεταλλεία φαίνεται να είναι μια απλοποίηση των άλλων προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων με κάποια βασικά χαρακτηριστικά όμως να διαφέρουν πολύ, όπως (Alarie et al. 2002):

- Τα μεταλλεία είναι κλειστά συστήματα, δηλαδή, οι θέσεις φόρτωσης και εκκένωσης παραμένουν στην ίδια θέση για μεγάλο χρονικό διάστημα (γενικά, τουλάχιστον για μια βάρδια 8 έως 12 ωρών).



- Οι διάρκειες κίνησης των οχημάτων είναι μικρές συγκριτικά με τη διάρκεια της βάρδιας (10 έως 25 λεπτά).
- Η συχνότητα αφίξεων σε κάθε σημείο φόρτωσης είναι υψηλή (κάθε 3 έως 5 λεπτά).
- Εάν το μέγεθος του στόλου είναι μεγάλο, γενικά εμφανίζονται σειρές αναμονής φορτηγών.
- Η σύνθετη συνδυαστική πτυχή του προβλήματος λόγω των πολλών φορτηγών που συνήθως λειτουργούν σε ένα μεταλλείο (το σύστημα δρομολόγησης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τη θέση όλων των φορτηγών κατά την αντιστοίχισή τους σε μονάδες φόρτωσης).

Είναι δεδομένο λοιπόν πως για να επιτευχθούν και τα δύο, δηλαδή τόσο η μείωση του κόστους όσο και η αύξηση της παραγωγικότητας, είναι απαραίτητο να υπάρχει σύγχρονος εξοπλισμός με αυξημένες δυνατότητες και ταυτόχρονα ένα καλά οργανωμένο σύστημα δρομολόγησης. Οι πρώτες μελέτες που έγιναν την δεκαετία του 1960 δεν συμφωνούσαν στο αν είναι σημαντικότερη η οργάνωση ή η τεχνολογία για την αύξηση της παραγωγικότητας. Ο Neul το 1966 υποστήριξε ότι αν και η σωστή και ομαλή προσέλευση των χωματοουργικών οχημάτων στις θέσεις φόρτωσης είναι σημαντική, ο μόνος ασφαλής τρόπος αύξησης της παραγωγικότητας ήταν μέσω του εκσυγχρονισμού του στόλου, δηλαδή με τη χρήση μεγαλύτερων, ταχύτερων και πιο σύγχρονων οχημάτων και μηχανημάτων. Αντίθετα οι Morgan και Peterson το 1968 υποστήριζαν ότι ο νέος εξοπλισμός δεν αποτελεί από μόνος του κριτήριο για την αύξηση της παραγωγικότητας, αφού τα συστήματα μεταφοράς διακρίνονται από την στοχαστικότητα τους και συνεπώς είναι πιο σημαντική η σωστή κατανομή των φορτηγών στους φορτωτές.

Οι ερευνητές που ασχολήθηκαν με τα συστήματα μεταφοράς στα μεταλλεία την δεκαετία του 1970 συμφώνησαν με την άποψη των Morgan και Peterson και εστίασαν τις προσπάθειές τους στο πως θα βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά του συστήματος. Διαπιστώθηκε πως η σταθερή δρομολόγηση οχημάτων σε θέσεις φόρτωσης χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τα δυναμικά χαρακτηριστικά που προκύπτουν εκείνη την στιγμή, οδηγούσε στο σχηματισμό σειρών αναμονής και συνεπώς σε καθυστερήσεις. Οι Crosson et al. (1977) σε ερευνά τους εντόπισαν πως τα χωματοουργικά οχήματα δαπανούσαν το 12% του χρόνου λειτουργίας τους αναμένοντας στις θέσεις φόρτωσης. Ενώ οι Barnes et al. (1979) διαπίστωσαν πως

οι χρόνοι αναμονής καθορίζονται αποκλειστικά από την προσαρμογή του στόλου των χωματουργικών οχημάτων στους φορτωτές και τον δυναμικό χαρακτήρα που έχει η κάθε φάση του κύκλου μεταφοράς.

Όλες οι παραπάνω μελέτες, σε συνδυασμό με τις μελέτες που έγιναν στη συνέχεια, καταλήγουν ουσιαστικά στο ίδιο συμπέρασμα. Ο μόνος ασφαλής τρόπος αύξησης την παραγωγικότητας είναι μέσω μιας δυναμικής δρομολόγησης των οχημάτων κατά τη διάρκεια της βάρδιας. Αυτή η λύση μπορεί να αντιμετωπίσει κάθε πρόβλημα που προκύπτει, όπως βλάβες του μεταφορικού εξοπλισμού, προβλήματα στο δίκτυο των δρόμων, ζητήματα που προκύπτουν στις θέσεις φόρτωσης και εκκένωσης, ακόμα και ανάγκη παροδικής μεταβολής του τρόπου λειτουργίας του μεταλλείου.

Τα παραπάνω καταδεικνύουν ότι η χρήση συστημάτων δυναμικής δρομολόγησης πέρα από το ότι αντιμετωπίζει άμεσα όποιο ζήτημα προκύπτει, ταυτόχρονα επιτυγχάνει την καλύτερη δυνατή χρήση του μηχανικού εξοπλισμού. Αντίθετα, οι διάφοροι μέθοδοι εκ των προτέρων σχεδιασμού του συστήματος μεταφοράς, όπως είναι η χρήση μοντέλων προσομοίωσης, η δημιουργία μοντέλων με βάση τη θεωρία των σειρών αναμονής ή με βάση τον γραμμικό προγραμματισμό, δεν μπορούν να προβλέψουν και, συνεπώς, ούτε να αντιμετωπίσουν τυχόν προβλήματα που προκύπτουν κάθε στιγμή. Ο στοχαστικός τους χαρακτήρας αποτελεί πολύ σημαντικό πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων και για αυτό είναι πάρα πολύ σημαντικό να εφαρμόζονται στο σχεδιασμό των συστημάτων μεταφοράς, αν και δεν επιλύουν όλα τα προβλήματα του συστήματος.

Είναι προφανές ότι η μεγιστοποίηση της απόδοσης ενός συστήματος μεταφοράς σε ένα μεταλλείο επιτυγχάνεται όταν δεν υπάρχουν καθυστερήσεις, δηλαδή όταν οι χρόνοι αναμονής και αδράνειας των χωματουργικών οχημάτων και των φορτωτών αντίστοιχα ελαχιστοποιούνται. Αυτό επιτυγχάνεται αρχικά με τον ορθό σχεδιασμό του συστήματος και εν συνεχεία ακόμα πιο χρήσιμη είναι η δυναμική δρομολόγηση με τη χρήση συστημάτων δρομολόγησης με βάση τις συνθήκες που επικρατούν εκείνη την στιγμή στο μεταλλείο.

#### **2.4.3 Τα συστήματα δρομολόγησης ως λύση στο βασικό πρόβλημα**

Ο κύριος σκοπός των συστημάτων δρομολόγησης φορτηγών είναι η αύξηση της παραγωγικότητας του εξοπλισμού. Δεδομένου ότι η παραγωγικότητα μετριέται σε όγκο ή μάζα που μετακινείται στη διάρκεια του χρόνου, οι αυξήσεις της

παραγωγικότητας γίνονται κατά βάση με τη μείωση της διάρκειας του κύκλου φορτηγού και φορτωτή. Αυτή η μείωση μπορεί να επιτευχθεί αν υπάρξει μεγαλύτερη παραγωγικότητα με την χρήση του ήδη υπάρχοντος λειτουργικού εξοπλισμού ή, σε διαφορετική περίπτωση, με την παραμονή στα ίδια επίπεδα παραγωγής αλλά με τη χρήση μικρότερου στόλου οχημάτων. Επίσης τα συστήματα δρομολόγησης έχουν και ως στόχο τη διατήρηση της ποιότητας του προϊόντος και την ελαχιστοποίηση των φαινομένων των διάφορων καθυστερήσεων. Φυσικά πρέπει οι μακροπρόθεσμοι στόχοι σχεδιασμού του μεταλλείου να διατηρούνται και ο υπεύθυνος σχεδιασμού να μην στοχεύει αποκλειστικά στην βραχυπρόθεσμη αύξηση της παραγωγικότητας.

Ένα σημαντικό δευτερεύον πλεονέκτημα για τα συστήματα δρομολόγησης φορτηγών, είναι η τακτική απόκτηση λεπτομερών δεδομένων για τους χρόνους του κύκλου μεταφοράς. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων των αλλαγών στη λειτουργία της εξόρυξης. Για παράδειγμα, το κόστος των σταδιακών βελτιώσεων στις υποδομές των μεταφορών θα μπορούσε να συγκριθεί με την εξοικονόμηση που προκύπτει από τη μείωση της διάρκειας ταξιδιού. Εφόσον τα συστήματα παρακολούθησης και δρομολόγησης καταγράφουν όλες τις αυξήσεις χρόνου για όλες τις κινητές μονάδες, οι μέσοι χρόνοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ακριβείς και ευαίσθητες στατιστικές μελέτες κόστους.

Υπάρχει μια σειρά από βασικές λειτουργίες κοινές σε όλα τα συστήματα αποστολής. Σήμερα πολλά μεταλλεία που χρησιμοποιούν ως μέθοδο μεταφοράς ένα σύστημα φορτηγών και φορτωτών διαθέτουν και κάνουν χρήση ενός συστήματος δυναμικής δρομολόγησης.

Ένα σύστημα δυναμικής δρομολόγησης συλλέγει δεδομένα από τον εξοπλισμό που λειτουργεί στο μεταλλείο, τα αναλύει, τα συγκρίνει με το τρέχον σχέδιο βάρδιας του μεταλλείου και στη συνέχεια κατευθύνει τον εξοπλισμό σε θέσεις και δραστηριότητες που θα επιτρέψουν στην εκμετάλλευση να επιτύχει τους στόχους της με τον πιο αποδοτικό τρόπο.

Το πρόγραμμα απόκτησης δεδομένων ενός μεταλλείου συλλέγει πληροφορίες από τον κινητό εξοπλισμό και τους επόπτες πεδίου. Οι δύο κύριοι τύποι δεδομένων είναι ο χρόνος και η κίνηση υλικού, δηλαδή πόσος χρόνος χρειάστηκε για να μετακινηθεί το υλικό Α από τη θέση X στη θέση Y. Οι δευτερεύουσες

πληροφορίες σχετίζονται με την κατανάλωση καυσίμου, τη διάρκεια των καθυστερήσεων κ.λπ.

Τα δεδομένα παρουσιάζονται στον υπεύθυνο για το πρόγραμμα μεταφοράς του μεταλλείου με δύο μορφές. Τα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούνται για τη λήψη άμεσων αποφάσεων στην τρέχουσα βάρδια. Ενώ τα συνοπτικά δεδομένα ταξινομούνται σε αναφορές με βάση την κάθε βάρδια. Οι αναφορές βάρδιας χρησιμοποιούνται στη συνέχεια μαζί με το σχέδιο εξόρυξης για το σχεδιασμό των μεταφορών σε κάθε βάρδια.

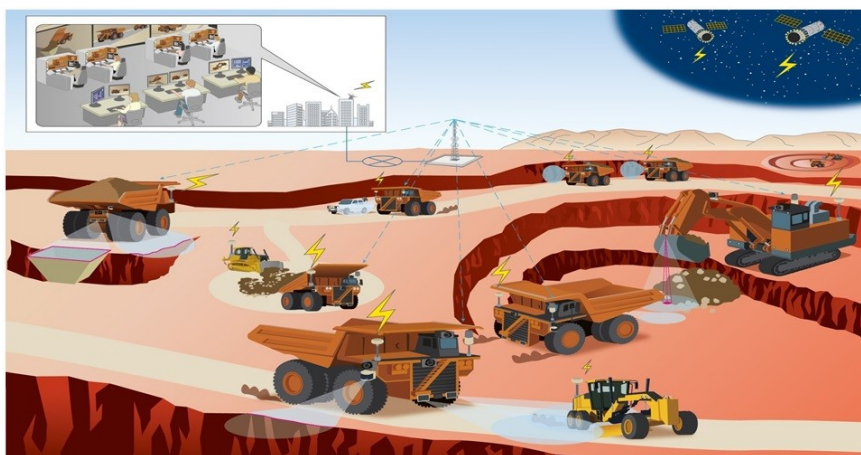
Τα δεδομένα που συλλέγονται σε πραγματικό χρόνο και οι στόχοι που ορίζονται από το σχέδιο της βάρδιας χρησιμοποιούνται από το πρόγραμμα δρομολόγησης για τη διαμόρφωση των κατάλληλων οδηγιών δρομολόγησης για τον κινητό εξοπλισμό.

Υπάρχουν τρεις τύποι συστημάτων δυναμικής δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται σήμερα:

1. *Χειροκίνητος*: Ένα αμιγώς χειροκίνητο σύστημα είναι αυτό στο οποίο οι επόπτες βάρδιας του μεταλλείου συλλέγουν δεδομένα από το πεδίο κατά βάση με οπτική παρατήρηση, αλλά και με φωνητικά μηνύματα από τους χειριστές των μηχανημάτων. Στην ουσία ο επόπτης είναι αυτός που καθορίζει στο σύνολό της την πολιτική δρομολόγησης των οχημάτων για το μεταλλείο. Αυτό είναι και το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτού του συστήματος, αφού είναι πρακτικά αδύνατο ο επόπτης να διαπιστώσει σε πραγματικό χρόνο τις επιδόσεις του μεταφορικού εξοπλισμού, είτε γιατί δεν μπορεί να έχει άμεση οπτική επαφή με όλο το πεδίο είτε γιατί δεν μπορεί να εκτιμήσει την πραγματική κατάσταση λόγω πρόσκαιρων γεγονότων, με αποτέλεσμα να αργεί να λάβει αποφάσεις και πολλές φορές αυτές να μην βασίζονται αποκλειστικά στη λογική. Αυτή η μέθοδος παρά το ότι είναι αναχρονιστική και δεν εξυπηρετεί το σκοπό της σωστής κατανομής του στόλου, και επίσης μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά σφάλματα, χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα από ένα μεγάλο αριθμό μεταλλείων λόγω του πολύ χαμηλού κόστους.
2. *Χειροκίνητος με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (ημιαυτόματο)*: Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί έναν υπολογιστή με λειτουργικό σύστημα μη πραγματικού χρόνου για να βοηθήσει τους επόπτες να ταξινομήσουν τα δεδομένα που έχουν συλλέξει σε κατάλληλους πίνακες. Τα δεδομένα

συλλέγονται μέσω φωνητικών μηνυμάτων (χρήση ασυρμάτων) και ένας χειριστής υπολογιστή πληκτρολογεί χειροκίνητα τα δεδομένα στον υπολογιστή. Ο υπολογιστής αποθηκεύει και συνοψίζει τα δεδομένα και, όταν απαιτείται, προτείνει μια οδηγία δρομολόγησης. Αυτή η οδηγία αναμεταδίδεται στο πεδίο μέσω του ασυρμάτου. Αυτός ο τύπος συστήματος χρησιμοποιήθηκε στις πρώτες μέρες της δυναμικής δρομολόγησης φορτηγών (Hauck, 1972). Μέχρι και την δεκαετία του 1990 συνέχιζε να υπάρχει χρήση τέτοιου συστήματος αποστολής λόγω της απλότητας και του χαμηλού κόστους τους (Bonates και Lizotte, 1988) αλλά και λόγω των μέχρι τότε δυνατοτήτων των υπολογιστών. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι η αδυναμία του να χειριστεί μεγάλο αριθμό μηνυμάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα.

3. *Αυτόματη δυναμική δρομολόγηση*: Ένα σύστημα αυτόματης δυναμικής δρομολόγησης συνδυάζει την αυτόματη παρακολούθηση με ένα πρόγραμμα υπολογιστή που περιέχει έναν αλγόριθμο δρομολόγησης, ο οποίος εκτιμά τον βέλτιστο προορισμό για κάθε μονάδα εξοπλισμού. Τα μηνύματα δρομολόγησης αποστέλλονται απευθείας στη μονάδα χρησιμοποιώντας το σύστημα επικοινωνίας δεδομένων. Ο προορισμός εμφανίζεται σε ένα τερματικό δεδομένων που βρίσκεται στην καμπίνα του χειριστή του εξοπλισμού. Σκοπός των αυτόματων συστημάτων δρομολόγησης είναι να μειωθούν στο ελάχιστο οι χρόνοι αναμονής των μονάδων φόρτωσης και μεταφοράς μέσω του ακριβούς ελέγχου τους. Ταυτόχρονα πρέπει όμως να εξασφαλίζεται ότι ο σχεδιασμός της παραγωγής ακολουθείται πιστά και τηρείται η ενδεδειγμένη σχέση εκμετάλλευσης (Crosson et al. 1977). Τα αυτόματα συστήματα απάλλαξαν τις μεταλλευτικές μονάδες από την ανάγκη για χρήση επόπτη στο πεδίο και συνεπώς από τα προβλήματα που αυτή δημιουργούσε. Είναι γεγονός πως το κόστος απόκτησης ενός αυτόματου συστήματος δρομολόγησης είναι αρκετά μεγάλο για να μπορέσει να το αποσβέσει μια μικρή μεταλλευτική μονάδα. Συνεπώς είναι ένα σύστημα που απευθύνεται κατά βάση σε μεγαλύτερα μεταλλεία που απαιτούν μεγάλο στόλο για την λειτουργία τους και μπορούν να αποσβέσουν αυτό το κόστος μέσω του κέρδους που θα αποκομίσουν με την αύξηση της παραγωγής και τη μείωση του στόλου.



Εικόνα 13: Απεικόνιση συστήματος αυτόματης δυναμικής δρομολόγησης σε ανοιχτό μεταλλείο  
(hitachiglobal.com access 2022)

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της χρησιμότητας που έχει ένα σύστημα δυναμικής δρομολόγησης των οχημάτων σε ένα μεταλλείο είναι το μεταλλείο Assarel-Medet, μία σημαντική εκμετάλλευση χαλκού που βρίσκεται στην επαρχία Παζαρτζίκ της Βουλγαρίας, όπου εξορύσσονται περίπου 13 εκατομμύρια τόνοι μεταλλεύματος χαλκού κάθε χρόνο. Η χαμηλή συγκέντρωση χαλκού στο συγκεκριμένο μεταλλείο ανάγκασε την εταιρεία που το εκμεταλλεύεται να αναζητήσει τρόπους για την αύξηση της παραγωγής του. Η λύση ήταν το μεταλλείο να αποκτήσει ένα σύστημα αυτόματης δυναμικής δρομολόγησης και διαχείρισης του στόλου το 2005 για να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της εκσκαφής και της μεταφοράς των υλικών.

Λίγο μετά την απόκτηση και την χρήση του συστήματος, η εταιρεία που διαχειρίζεται το μεταλλείο εντόπισε μια σειρά από σημαντικά οφέλη:

- 4,5% αύξηση στο μέσο μέγεθος φορτίου, ενώ περιορίστηκαν φαινόμενα υπερφορτώσεων των φορτηγών.
- Η παραγωγικότητα των οδηγών των φορτηγών αυξήθηκε κατά 3,5% ανά βάρδια .
- Η παραγωγικότητα των χειριστών των φορτωτών αυξήθηκε κατά 5,5%.
- Ο συνολικός ρυθμός εκσκαφής αυξήθηκε κατά 10,5% ανά ώρα.
- Όλα τα λειτουργικά κόστη παρουσίασαν μείωση. Ως συνέπεια της χρήσης του συστήματος σε συνδυασμό με την αντικατάσταση του παλαιότερου εξοπλισμού, το μεταλλείο κατάφερε να μειώσει το κόστος των εργασιών εκσκαφής και μεταφοράς κατά περισσότερο από 3%, αυξάνοντας παράλληλα το εξορυσσόμενο υλικό κατά περίπου 16% (wecomine.com access 2022)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα δεύτερο παράδειγμα δυναμικής δρομολόγησης, που δεν αφορά τη δρομολόγηση των οχημάτων στις θέσεις φόρτωσης αλλά στις θέσεις ανεφοδιασμού. Είναι γεγονός πως οι χρόνοι ανεφοδιασμού, συντήρησης και επισκευών είναι χρόνοι που τα οχήματα βρίσκονται σε αδράνεια και συνεπώς έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην παραγωγικότητα και τη σωστή λειτουργία του κύκλου μεταφοράς. Είναι λοιπόν απαραίτητο να υπάρχουν συστήματα αυτόματης δρομολόγησης και για άλλες θέσεις όπου χρειάζεται να βρεθούν τα οχήματα κατά τη διάρκεια μιας βάρδιας, όπως είναι η θέση ανεφοδιασμού.

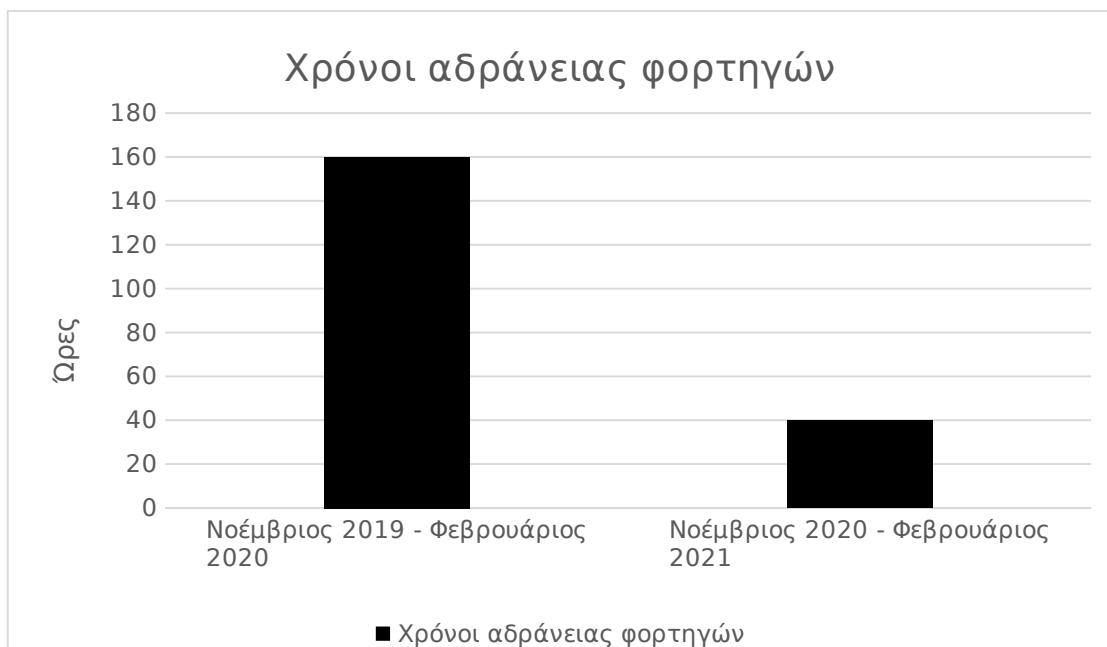
Ένα τέτοιο σύστημα χρησιμοποιεί το ορυχείο Sierra Gorda. Το ορυχείο Sierra Gorda χρησιμοποιεί μια αυτοματοποιημένη υπηρεσία δρομολόγησης για να χειριστεί τον ανεφοδιασμό του στόλου του που αποτελείται από 58 φορτηγά οχήματα Komatsu 930E. Μέσω της αυτοματοποίησης τροφοδοσίας καυσίμου, το ορυχείο αύξησε τους μέσους όγκους πλήρωσης από 3.400 λίτρα σε 3.900 λίτρα σε κάθε ανεφοδιασμό, με πρόβλεψη αυτό το νούμερο να φτάσει τα 4.200 λίτρα μέχρι το 2025. Με ρυθμό κατανάλωσης 260 λίτρων την ώρα, κάθε φορτηγό έχει πλέον τη δυνατότητα να παραμείνει στην παραγωγή κατά μέσο όρο 1,92 ώρες περισσότερο πριν χρειαστεί εκ νέου ανεφοδιασμό.

Η χρήση της αυτοματοποιημένης δρομολόγησης επέτρεψε επίσης στο μεταλλείο της Sierra Gorda να μειώσει τους χρόνους αναμονής στις θέσεις ανεφοδιασμού καυσίμων κατά 10%, συρρικνώνοντας περαιτέρω τον χρόνο αδράνειας των οχημάτων. Τέλος, η αυτοματοποιημένη δρομολόγηση επέτρεψε στην εταιρεία να ανακατευθύνει τους εργαζόμενους που ήταν υπεύθυνοι για τη δρομολόγηση των οχημάτων για ανεφοδιασμό σε άλλες εργασίες, εξοικονομώντας πόρους για την πρόσληψη νέου προσωπικού. (wecomine.com access 2022)

Με βάση τα παραπάνω παρουσιάζεται ένα τελευταίο παράδειγμα, που είναι όμως ενδεικτικό του πόσο χρήσιμο μπορεί να είναι ένα σύστημα αυτόματης δυναμικής δρομολόγησης για την επίλυση του βασικού προβλήματος σε ένα σύστημα φόρτωσης και μεταφοράς. Ένα πολύ μεγάλο μεταλλείο σιδήρου στην Βραζιλία εντόπισε ότι τα φορτηγά δαπανούσαν πολλές ώρες σε κατάσταση αδράνειας, αφού βρίσκονταν για επισκευή, μεταξύ Νοεμβρίου 2019 και Φεβρουαρίου 2020 λόγω προβλημάτων των ελαστικών που σχετίζονταν με την αύξηση της θερμοκρασίας και τη διακύμανση της πίεσης των ελαστικών κατά τη διάρκεια των κύκλων μεταφοράς. Αυτό ισοδυναμούσε με 161 μη παραγωγικές ώρες ή 2 εκατομμύρια

δολάρια σε απώλειες στο διάστημα αυτών των 4 μηνών. Το παραπάνω φαινόμενο δεν είναι σπάνιο στα μεταλλεία, αφού οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και ειδικά οι υψηλές θερμοκρασίες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες σε συνδυασμό με την ποιότητα του οδικού δικτύου μπορεί να επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό την πίεση και την φθορά των ελαστικών.

Το μεταλλείο προσπάθησε να βελτιώσει τη χρήση και την απόδοση των φορτηγών περιορίζοντας τα ζητήματα που προκύπτουν από τα ελαστικά. Για να το επιτύχει αυτό έκανε χρήση ενός συστήματος αυτόματης δυναμικής δρομολόγησης που όταν εντόπιζε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες κατεύθυνε το όχημα στην συντομότερη διαδρομή με σκοπό τα ελαστικά να μην αναπτύξουν υψηλές θερμοκρασίες και να μην επηρεαστεί η πίεσή τους. Με την έναρξη χρήσης του συστήματος η μεταλλευτική μονάδα εντόπισε πολύ σημαντικά πλεονεκτήματα αφού το μεταλλείο σημείωσε σημαντική μείωση στις μη παραγωγικές ώρες των φορτηγών λόγω προβλημάτων των ελαστικών, από 161 ώρες σε 129 ώρες τους πρώτους 4 μήνες και επίσης αυξήθηκε η μεταφορική ικανότητα του συστήματος σε σιδηρομετάλλευμα κατά 115 τόνους την ώρα, το οποίο κατά τη διάρκεια 6 μηνών προσέφερε στο μεταλλείο πρόσθετα έσοδα 3,4 εκατομμυρίων δολαρίων. (modularmining.com access 2022)



Εικόνα 14: Διάγραμμα : Χρόνοι αδράνειας φορτηγών λόγω προβλημάτων στα ελαστικά πριν και μετά την χρήση συστήματος αυτόματης δρομολόγησης (modularmining.com)



## **2.5 Κόστος μεταφοράς σε υπαίθρια μεταλλεία**

### **2.5.1. Κόστος μεταφοράς**

Όταν οι φορείς εκμετάλλευσης υπαίθριων μεταλλείων προσπαθούν να ενισχύσουν τα κέρδη, συχνά στρέφονται σε μέτρα που βελτιώνουν και αυξάνουν το ρυθμό εξόρυξης πρώτων υλών. Αν και αυτό μπορεί στην αρχική φάση εκμετάλλευσης να είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την αύξηση του κέρδους, στην πορεία η αποδοτικότητα μειώνεται και συνεπώς είναι απαραίτητη η αναζήτηση νέων τρόπων για την βελτιστοποίηση των διαδικασιών υποστήριξης και μεταφοράς, έτσι ώστε με την πάροδο του χρόνου να αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό η αποδοτικότητα ενός μεταλλείου.

Η κυριότερη διαδικασία που κάθε μεταλλευτική επιχείρηση προσπαθεί να βελτιώσει είναι το σύστημα μεταφορών. Ένα καλά οργανωμένο σύστημα μεταφοράς μπορεί να αυξήσει κατά πολύ την απόδοση και πιθανώς να εξαλείψει εντελώς το χρόνο διακοπής λειτουργίας και αδράνειας ενός μεταλλείου. Κάθε έμπειρος χειριστής που εργάζεται σε ένα μεταλλείο γνωρίζει ότι αυτοί οι δύο αρνητικοί παράγοντες, η κακή απόδοση και ο χρόνος διακοπής λειτουργίας συχνά οδηγούν σε αυξημένο λειτουργικό κόστος και επιβράδυνση των διαδικασιών εξόρυξης.

Η αναποτελεσματικότητα και ο χρόνος διακοπής λειτουργίας μπορεί να προέρχονται από πολλές λειτουργίες ενός μεταλλείου, αλλά συχνά οι μεταφορές είναι ο κυριότερος και ταυτόχρονα ο πιο επιβαρυντικός παράγοντας. Επίσης, εάν υπάρχουν τεχνικά προβλήματα με τα συστήματα μεταφοράς, θα πρέπει να αναμένονται σημαντικές καθυστερήσεις στις διαδικασίες εκσκαφής και μεταφοράς

Ένα βελτιστοποιημένο σύστημα μεταφορών μπορεί να λύσει όλα αυτά τα προβλήματα και επιπλέον να παράσχει στο μεταλλείο νέες δυνατότητες.

Οι προσπάθειες βελτίωσης και αύξησης της αποδοτικότητας του συστήματος μεταφοράς σε ένα μεταλλείο περιλαμβάνουν τα εξής:

- Τη βελτίωση των χαρακτηριστικών των μηχανημάτων, με σκοπό τη μεγαλύτερη αξιοπιστία αυτών αλλά και την αυξημένη απόδοση.
- Την αύξηση της μεταφορικής ικανότητας των μονάδων μεταφοράς.

- Τη συνδυασμένη χρήση διάφορων συστημάτων φόρτωσης και μεταφοράς έτσι ώστε να επωφελείται η μεταλλευτική μονάδα από τα πλεονεκτήματα κάθε συστήματος.
- Τη χρήση νέων τεχνολογιών, όπως η χρήση αυτόνομων οχημάτων, η χρήση δικτύων 5G για την ταχύτερη μεταφορά δεδομένων μεταξύ οχημάτων και κέντρου ελέγχου, ώστε να μειώνονται οι άσκοπες μετακινήσεις που αυξάνουν το λειτουργικό κόστος και, τέλος, η χρήση οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων με σκοπό την αποφυγή του υψηλού κόστους των ορυκτών καυσίμων.

Στις παραπάνω προτάσεις για την βελτιστοποίηση της απόδοσης υπάρχει ένας σημαντικός αστερίσκος που προκύπτει από την ανάγκη υψηλών αρχικών επενδύσεων για την απόκτηση των συγκεκριμένων δυνατοτήτων. Συνεπώς είναι απαραίτητο να εξεταστούν και λύσεις που αυξάνουν την απόδοση και μειώνουν το λειτουργικό κόστος μιας μονάδας χωρίς να χρειάζονται νέες επενδύσεις κεφαλαίου από μία επιχείρηση. Για τον σκοπό αυτό είναι πολύ σημαντικό να υπάρχει ένα σύγχρονο και καλά οργανωμένο σύστημα αυτόματου ελέγχου και εποπτείας των μεταλλευτικών εργασιών στα πρότυπα αντίστοιχων συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε μεγάλες βιομηχανικές μονάδες. Οι πρώτες προσπάθειες για την εφαρμογή τέτοιων συστημάτων στη μεταλλευτική βιομηχανία ξεκίνησαν περίπου το 1960 (Naplatanov et al. 1977).

Στις περισσότερες υπαίθριες εκμεταλλεύσεις επιλέγεται το σύστημα μεταφοράς να αποτελείται από χωματουργικά οχήματα λόγω της μεγαλύτερης ευελιξίας που αυτά προσφέρουν αλλά και λόγω του μικρότερου κόστους λειτουργίας. Παρόλα αυτά η αρχική κτήση των οχημάτων συνοδεύεται από ένα υψηλό κόστος το οποίο πρέπει να μπορεί να αποσβεστεί κατά τη διάρκεια χρήσης τους. Για αυτό λόγο πρέπει να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση του στόλου των οχημάτων και ο πλήρης εξορθολογισμός των μεταλλευτικών διεργασιών με σκοπό ακόμα και εκμεταλλεύσεις σε κοιτάσματα με μικρή περιεκτικότητα να έχουν τη δυνατότητα επίτευξης κερδοφορίας.

Λόγω των στοχαστικών χαρακτηριστικών που έχει κάθε μεταλλευτική διεργασία, δεν είναι εφικτό να δημιουργηθεί και να εφαρμοστεί ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα ελέγχου των χωματουργικών οχημάτων γιατί αυτό θα απαιτούσε το σύστημα να λειτουργεί με ντετερμινιστικό τρόπο και ως συνέπεια αυτού θα ήταν να μην ανταποκρίνεται στις πραγματικές καταστάσεις. Γενικότερα, δεν θα ήταν

λάθος να αναφερθεί ότι ο σωστός τρόπος λειτουργίας ενός συστήματος μεταφοράς πρέπει να βασίζεται σε τρέχοντα δεδομένα, όπως αυτά που υφίστανται μια συγκεκριμένη στιγμή στο μεταλλείο, και σε ένα βαθμό στην πρόσφατη ιστορία των διάφορων μεταλλευτικών διεργασιών.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι ο στόχος που έχει κάθε μεταλλευτική εταιρεία τουλάχιστον όσον αφορά στο σύστημα φόρτωσης και μεταφοράς είναι η επίτευξη της μέγιστης εφικτής αποδοτικότητας του συστήματος και ταυτόχρονα η διατήρηση του κόστους σε επίπεδα που να επιτρέπουν την κερδοφορία.

Το κόστος ενός συστήματος μεταφοράς αποτελεί το άθροισμα του κόστους κτήσης, του μισθολογικού κόστους, του κόστους λειτουργίας, καθώς και του κόστους κίνησης και παραγωγής (Wilmeth et al. 1958).

- Το κόστος κτήσης είναι προφανές ότι δεν έχει άμεση σχέση με την λειτουργία του συστήματος, καθώς αφορά μόνο στον ημερολογιακό χρόνο κατοχής των μηχανημάτων και αποτελείται από τις αποσβέσεις, τους φόρους και τους τόκους της επένδυσης σε μηχανικό εξοπλισμό.
- Το κόστος μισθοδοσίας ή κόστος προσωπικού αφορά αποκλειστικά στη μισθοδοσία των εργαζομένων που απαιτούνται για την λειτουργία του συστήματος όπως χειριστές, τεχνίτες, μηχανικοί και λοιπό προσωπικό που είναι απαραίτητο για την συντήρηση και επισκευή του μηχανικού εξοπλισμού.
- Το κόστος λειτουργίας είναι ουσιαστικά το κόστος των αναλώσιμων (καύσιμα, λιπαντικά) καθώς και το πρόσθετο κόστος που προκύπτει από την φθορά του μηχανολογικού εξοπλισμού λόγω της λειτουργίας του. Το συγκεκριμένο κόστος επηρεάζεται κυρίως από τον χρόνο λειτουργίας των μηχανημάτων και σε πολύ μικρότερο βαθμό από την παραγωγικότητα του συστήματος.
- Το κόστος κίνησης και παραγωγής είναι το κόστος που προκύπτει από την κίνηση των οχημάτων και των φθορών που αυτή προκαλεί και αφορά φθορές στα ελαστικά, στις αναρτήσεις, στην καρότσα των χωματουργικών οχημάτων ή στον κάδο των φορτωτών.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως τα δύο πρώτα είναι ουσιαστικά ανεξάρτητα από τη λειτουργία του συστήματος, αφού επιβαρύνουν την επιχείρηση ακόμα και όταν αυτό δεν είναι σε λειτουργία. Αντίθετα, τα δύο τελευταία έχουν σχέση και επηρεάζονται από τη λειτουργία του μεταφορικού συστήματος. Είναι λοιπόν

φανερό ότι για να προφυλαχθεί η οικονομική βιωσιμότητα του μεταλλείου θα πρέπει τα παραπάνω κόστη να είναι τα κατά το δυνατόν μικρότερα.

Πρέπει να επιλέγεται μηχανολογικός εξοπλισμός που να ταιριάζει στη φύση του έργου και στις ανάγκες παραγωγής έτσι ώστε το κόστος να παραμένει σε ελεγχόμενο επίπεδο. Είναι απαραίτητο να υπάρχει ολοκληρωμένη οικονομική μελέτη από πλευράς μεταλλείου για την ανάγκη απόκτησης νέου μηχανολογικού εξοπλισμού ή αν είναι προτιμότερο να υπάρξει αγορά μεταχειρισμένου υλικού ή ακόμα και ενοικίαση. Το παραπάνω είναι δυνατόν να μεταβάλλει σε μεγάλο βαθμό το αρχικό κόστος κτήσης.

Το μισθολογικό κόστος πρέπει να παραμένει σε χαμηλό επίπεδο, όχι βέβαια εις βάρος των εργαζομένων. Η χρήση αυτόνομων οχημάτων και συστημάτων θα μειώσει τις ανάγκες σε προσωπικό. Ενώ και η χρήση νέου εξοπλισμού θα βοηθήσει στην ελαχιστοποίηση της απασχόλησης πολλών ατόμων στα διάφορα τμήματα συντήρησης και επισκευής.

Όσον αφορά στα υπόλοιπα δύο κόστη είναι φανερό πως η βελτιστοποίηση και αύξηση της παραγωγής του συστήματος είναι ο πλέον ενδεδειγμένος τρόπος ώστε αυτά να μειωθούν.



Εικόνα 15: Διάγραμμα : Απεικόνιση της κατανομής του κόστους στις διάφορες λειτουργίες ενός μεταλλείου (Bagherpour et al. 2007)



Εικόνα 16: Διάγραμμα : Απεικόνιση κατανομής αρχικού κεφαλαίου για την απόκτηση του μεταλλευτικού εξοπλισμού (Bagherpour et al. 2007)

Τα δύο παραπάνω γραφήματα (Εικόνα 15 και Εικόνα 16) είναι μια επιβεβαίωση του σημαντικού κόστους της λειτουργίας φόρτωσης και μεταφοράς ενός μεταλλείου τόσο πριν την έναρξη της λειτουργίας του όσο και κατά τη διάρκεια αυτής.

#### 2.5.2. Νέες τεχνολογίες και η συνεισφορά τους στο κόστος μεταφοράς

Τεχνολογίες όπως η αυτοματοποίηση, η χρήση αυτόνομων οχημάτων και ρομπότ, η εξ αποστάσεως λειτουργία του μεταλλείου και φυσικά η ψηφιοποίηση μπορούν να προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στις διάφορες μεταλλευτικές επιχειρήσεις. Η εξ αποστάσεως λειτουργία ενός μεταλλείου μπορεί να μειώσει τόσο το κόστος κεφαλαίου όσο και το κόστος λειτουργίας, αφού απαιτείται μικρότερος αριθμός εργαζομένων, δεν απαιτούνται πολλές υποδομές για την εξυπηρέτηση των εργαζομένων και φυσικά το κόστος μεταφοράς τους είναι πολύ μικρότερο.

Η χρήση αυτόνομων οχημάτων όπως φορτωτές και εκσκαφείς αναπτύσσεται ραγδαία τα τελευταία χρόνια. Ήδη μεγάλες εταιρείες όπως η Caterpillar και η Komatsu προμηθεύουν τέτοια οχήματα σε διάφορα μεταλλεία. Μέχρι και τον Φεβρουάριο του 2020 παραπάνω από 459 αυτόνομα φορτηγά μεταφοράς χρησιμοποιούνταν σε όλο τον κόσμο. (GlobalData, Development of autonomous trucks in the global mining sector, 2020). Το νούμερο είναι σχετικά μικρό αφού είναι λιγότερο από το 1% του παγκόσμιου στόλου αλλά η ετήσια αύξηση του

ξεπερνά το 30%, με τις προβλέψεις να μιλούν για ακόμα μεγαλύτερα νούμερα στο μέλλον με σκοπό το 2050 παραπάνω από τα μισά οχήματα του μεταλλευτικού κλάδου να είναι αυτόνομα. Σε γενικές γραμμές, εκτός από τα οφέλη στην ασφάλεια, ο αυτόνομος εξοπλισμός, όπως οι αυτόνομοι φορτωτές, ενισχύει την παραγωγικότητα και μειώνει το λειτουργικό κόστος, αυξάνοντας τη χρήση του εξοπλισμού (λόγω της συνεχούς λειτουργίας), μειώνοντας τη μεταβλητότητα στο αποτέλεσμα παραγωγής και βελτιώνοντας τις επιδόσεις ελαστικών και εξαρτημάτων με αποτέλεσμα την μικρότερη φθορά τους και συνεπώς λιγότερες ανάγκες συντήρησης και επισκευής.

Συνοπτικά τα πλεονεκτήματα των αυτόνομων οχημάτων είναι:

- Μπορεί να λειτουργούν 24/7.
- Δεν απαιτούνται διαλείμματα.
- Μεγαλύτερη αξιοπιστία.
- Μείωση ανθρώπινων λαθών.
- Αύξηση παραγωγικότητας έως και 20%.
- Αύξημένη αποτελεσματικότητα στις διάφορες λειτουργίες του μεταλλείου.
- Δεν υπάρχει χρόνος αδράνειας, καθώς δεν υπάρχει αλλαγή βάρδιας.
- Δεν απαιτείται η παρουσία ανθρώπων σε επικίνδυνες περιοχές.
- Βελτιωμένη κατανάλωση καυσίμου κατά 4% με 25-50% μειωμένο χρόνο αδράνειας.
- Βελτιώνει την παραγωγικότητα των μεταλλωρύχων και την ασφάλεια του ανθρώπινου δυναμικού.
- Νέες δεξιότητες και ευκαιρίες για τις ομάδες εξόρυξης και συντήρησης.

(Πηγή: <https://globalroadtechnology.com> access 2022)

### *Ψηφιοποίηση*

Λόγω της ψηφιοποίησης των διαδικασιών, των προόδων στο IoT (Internet of Things) και της συγκέντρωσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, οι μεταλλευτικές μονάδες διαθέτουν τεράστιο όγκο δεδομένων σχετικά με την παραγωγή, τις διαδικασίες και την απόδοση των μηχανών, μεταξύ άλλων. Μέσω προηγμένων μεθόδων ανάλυσης, είναι δυνατός ο μετασχηματισμός αυτών των πληροφοριών επιτρέποντας τη χρήση τους για καλύτερο σχεδιασμό δραστηριοτήτων και για την υποστήριξη γρήγορων και αποτελεσματικών διαδικασιών λήψης αποφάσεων για τη λειτουργία. Μπορούν επίσης να αναπτυχθούν μοντέλα πρόβλεψης για τη

βελτίωση της συντήρησης του εξοπλισμού, βελτιώνοντας επομένως την παραγωγικότητα.

### *Ηλεκτροκίνηση*

Ο περισσότερος κινητός εξοπλισμός στις εργασίες εξόρυξης τροφοδοτείται ιστορικά από κινητήρες εσωτερικής καύσης, που χρησιμοποιούν κατά βάση καύσιμο ντίζελ. Ενώ ο αντίκτυπος των αρνητικών πλευρών αυτών των κινητήρων μπορεί να είναι ανεκτός σε υπαίθρια μεταλλεία, σε υπόγεια μεταλλεία, όπου ο αερισμός μπορεί να αντιπροσωπεύει έως και το 25-40% του συνολικού ενεργειακού κόστους, η κατάσταση είναι διαφορετική. Τα διάφορα οχήματα ντίζελ εκπέμπουν καυσαέρια που περιέχουν μια σειρά από ρύπους, όπως άκαυστους υδρογονάνθρακες (HC), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NOx) και σωματίδια ντίζελ (DPM). Επιπλέον, παράγεται μεγάλη ποσότητα θερμότητας. Όλα αυτά τα στοιχεία αυξάνουν τη ζήτηση για ροή φρέσκου αέρα προκειμένου να διασφαλιστεί ένα κατάλληλο περιβάλλον εργασίας για τους χειριστές και τον εξοπλισμό, έχοντας σημαντικό αντίκτυπο στο κόστος.

Επιπλέον, λόγω της αυξανόμενης ευαισθητοποίησης για το περιβάλλον και την ασφάλεια στη βιομηχανία, οι κανονισμοί σχετικά με τα επιτρεπτά επίπεδα ρύπων έχουν γίνει αυστηρότεροι τις τελευταίες δεκαετίες και είναι πιθανό να γίνουν ακόμη πιο αυστηροί στο μέλλον. Ταυτόχρονα, μετά την εξάντληση των ρηχών κοιτασμάτων, η εξόρυξη μετακινείται σε βαθύτερες τοποθεσίες, επιδεινώνοντας τις συνθήκες θερμοκρασίας.

Παρόλο που ορισμένες μέθοδοι παροχής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν χρησιμοποιηθεί εδώ και πολύ καιρό, οι κύριες μονάδες εξοπλισμού ενός μεταλλείου, όπως οι φορτωτές και οι εκσκαφείς, συνεχίζουν να λειτουργούν με κινητήρες εσωτερικής καύσης. Την σημερινή εποχή όμως με τις περιβαλλοντικές συνθήκες που έχουν διαμορφωθεί (οι μεταλλευτικές επιχειρήσεις πληρώνουν μεγάλα ποσά για δικαιώματα ρύπων) και το υψηλό κόστος των ορυκτών καυσίμων είναι αναγκαίο τα παραπάνω οχήματα να αντικατασταθούν με οχήματα που χρησιμοποιούν καθαρότερες και πιθανότατα φθηνότερες μορφές ενέργειας.

Σε γενικές γραμμές, τα κύρια πλεονεκτήματα του ηλεκτροκίνητου έναντι του πετρελαιοκίνητου εξοπλισμού είναι η υψηλότερη ενεργειακή απόδοση, η

μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (και, επομένως, χαμηλότερες απαιτήσεις στόλου κατά τη διάρκεια ζωής του ορυχείου), οι χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης, η μειωμένη παραγωγή ρύπων, θερμότητας και θορύβου και το συνολικά χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Από την άλλη πλευρά, ο ηλεκτροκίνητος εξοπλισμός παρουσιάζει συνήθως υψηλότερο κόστος κεφαλαίου και, ανάλογα με τον τύπο, μπορεί να παρουσιάζει κάποια άλλα μειονεκτήματα όπως χαμηλή αυτονομία και αργή φόρτιση. Επίσης, οι ειδικές συνθήκες λειτουργίας ενός μεταλλείου μπορεί να επηρεάσουν την απόφαση για την χρήση μίας συγκεκριμένης τεχνολογίας, π.χ. υπαίθριο μεταλλείο έναντι υπόγειου, αποστάσεις μεταφοράς, βάθος και κλιματικές συνθήκες, τιμές ντίζελ και ηλεκτρικής ενέργειας. Για τους λόγους αυτούς, πρέπει να διενεργείται ολοκληρωμένη τεχνοοικονομική αξιολόγηση σε κάθε περίπτωση.

Ήδη τα τελευταία χρόνια, καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια στην έρευνα και ανάπτυξη όσον αφορά τον ηλεκτροκίνητο εξοπλισμό, ιδίως με την χρήση μπαταριών και την χρήση κυψελών υδρογόνου. Αυτές οι δύο τεχνολογίες έχουν προς το παρόν τις μεγαλύτερες δυνατότητες αντικατάστασης του εξοπλισμού ντίζελ, λόγω της υψηλής ευελιξίας τους, εκτός φυσικά από τα πλεονεκτήματα ασφάλειας και περιβάλλοντος που έχουν ήδη αναφερθεί. Παρά την αργή αντικατάσταση των διάφορων μεταλλευτικών οχημάτων είναι πρακτικά αδύνατο να παραμείνει η μεταλλευτική βιομηχανία δέσμη των ορυκτών καυσίμων γιατί το κόστος λειτουργίας τους και συντήρησης με την πάροδο του χρόνου θα είναι μη διαχειρίσιμο.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3.1 Εισαγωγή στην γλώσσα προγραμματισμού Python

Η γλώσσα προγραμματισμού Python δημιουργήθηκε τον Δεκέμβριο του 1989 από τον Guido Van Rossum στο ερευνητικό κέντρο CWI της Ολλανδίας. Ο αρχικός σκοπός της δημιουργίας της ήταν η καλύτερη διαχείριση ενός συστήματος που είχε σχέση με τις διακοπές των Χριστουγέννων. Γρήγορα όμως εξαιτίας κυρίως της λεγόμενης 4<sup>ης</sup> Βιομηχανικής Επανάστασης και των αναγκών που αυτή δημιούργησε για εύκολες και εύχρηστες γλώσσες προγραμματισμού απέκτησε μεγάλη δημοφιλία και ουσιαστικά κατέστη μία από τις βασικές γλώσσες προγραμματισμού. Πρόκειται για μία σχετικά εύκολη γλώσσα που στηρίζεται σε ένα ανοιχτό περιβάλλον, είναι αρκετά εύχρηστη και ιδιαιτέρως αποτελεσματική με συνέπεια να χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών από πολύ απλές έως και πολύ σύνθετες.

Πιο αναλυτικά τα πλεονεκτήματα της Python είναι τα ακόλουθα:

1. Είναι μία δυναμική γλώσσα, δηλαδή κάθε δομή δεδομένων (αριθμοί, ακολουθίες, ακολουθία κειμένου, δυαδική ακολουθία, αντιστοίχιση, συλλογή) που υποστηρίζει μπορεί να δημιουργηθεί και να αλλάξει δυναμικά κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Αυτό προσφέρει ευελιξία στον χρήστη αφού τα δεδομένα δεν είναι προκαθορισμένα και μπορούν να αλλάξουν ανάλογα με τις ανάγκες.
2. Είναι δωρεάν για κάθε χρήση (εμπορική ή προσωπική) και διανέμεται ελεύθερα.
3. Είναι μία γλώσσα υψηλού επιπέδου που πρακτικά κάνει την χρήση αρκετά εύκολη αφού οι συντακτικοί και γραμματικοί κανόνες για την σύνταξη του προγράμματος είναι αρκετά κοντά στην ανθρώπινη γλώσσα.
4. Είναι διερμηνευόμενη που σημαίνει ότι κάθε εκτέλεση προγράμματος σε γλώσσα Python γίνεται με την βοήθεια ενός διερμηνευτή που ελέγχει αρχικά την ορθότητα του κώδικα και στην συνέχεια τον εκτελεί. Σε κάθε γλώσσα προγραμματισμού ο κώδικας γράφεται αρχικά σε μορφή ενός απλού κειμένου (πηγαίος κώδικας) και ουσιαστικά είναι οι οδηγίες που πρέπει να εκτελέσει ο υπολογιστής. Για να μπορέσει όμως ο υπολογιστής να εκτελέσει αυτές τις

εντολές θα πρέπει να μεταφραστούν σε μια γλώσσα που κατανοεί ο υπολογιστής. Αυτή την διαδικασία την αναλαμβάνει ο διερμηνευτής ή ο μεταγλωττιστής οι οποίοι διατίθενται μέσω ενός ολοκληρωμένου περιβάλλοντος ανάπτυξης λογισμικού (IDE) ή μέσω του λειτουργικού συστήματος του υπολογιστή. Ο μεταγλωττιστής ελέγχει όλο τον πηγαίο κώδικα για συντακτικά λάθη, αν δεν εντοπίσει κάποιο ολοκληρώνει την μεταγλώττιση μετατρέποντας τον πηγαίο κώδικα σε ένα αρχείο με δυαδικό κώδικα που μπορεί να εκτελεστεί από τον υπολογιστή. Ο διερμηνευτής αντίθετα λειτουργεί με διαφορετικό τρόπο. Ελέγχει κάθε εντολή ξεχωριστά, την μεταφράζει και τέλος την εκτελεί πριν προχωρήσει στην επόμενη εντολή. Αν εντοπίσει λάθος θα σταματήσει στο σημείο που το εντόπισε. Στην Python τα προγράμματα εκτελούνται με την χρήση διερμηνευτή και όχι μεταγλωττιστή.

5. Είναι αντικειμενοστραφής. Είναι μία γλώσσα προσανατολισμένη στα αντικείμενα. Έχει χαρακτηριστικά αντικειμενοστραφούς γλώσσας αν και δεν εφαρμόζει πλήρως τα χαρακτηριστικά της, αφού εφαρμόζει μια χαλαρή πολιτική σε ένα από τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αντικειμενοστραφών γλωσσών που είναι η ενθυλάκωση.
6. Είναι μία γλώσσα γενικού σκοπού αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχεδόν για κάθε πρόβλημα και να καλύψει τις όποιες απαιτήσεις για αυτό και υπάρχει μεγάλη χρήση της σε όλους τους κλάδους.
7. Είναι μια γλώσσα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλα τα λειτουργικά συστήματα χωρίς να χρειάζεται αλλαγές. Η μόνη περίπτωση αλλαγών είναι αν έχει γίνει χρήση κάποιας βιβλιοθήκης η οποία αλλάζει χαρακτηριστικά ανάλογα με το λειτουργικό σύστημα.
8. Μπορεί να ενσωματώνει υπηρεσίες οι οποίες είναι έτοιμα συστήματα που υλοποιούνται σε Python. Κυρίως είναι συστήματα που αφορούν την εγκατάσταση και λειτουργία διαδικτυακών υπηρεσιών όπως διακομιστές ιστοσελίδων και υπηρεσίες cloud.
9. Χρησιμοποιεί πολλαπλά προγραμματιστικά υποδείγματα ενσωματώνοντας πολλαπλές λειτουργίες δίνοντας έτσι πλήρη ελευθερία στον προγραμματιστή για το ποια χαρακτηριστικά θα χρησιμοποιεί κάθε φορά.
10. Είναι υλοποιήσιμη σε πολλές εκδοχές όπως (Cython, Jython, Iron Python, Brython, Pyjs) η κάθε μία εκ των οποίων εξυπηρετεί και άλλο σκοπό ενώ

είναι μια γλώσσα που προσφέρει μεγάλη ποικιλία βιβλιοθηκών ανάλογα με τις ανάγκες.

11. Τέλος, είναι μία γλώσσα επεκτάσιμη αφού μπορεί πολύ εύκολα να συνεργαστεί και με άλλες γλώσσες προγραμματισμού. (Σαμαράς και Τσιπλίδης, 2019)

### **3.2. Γενική περιγραφή μοντέλων CCP (Chance Constrained Program)**

Ο στοχαστικός προγραμματισμός, όπως έχει ήδη αναφερθεί, ανήκει στον μαθηματικό προγραμματισμό για την αντιμετώπιση της θεωρίας και των μεθόδων που ενσωματώνουν στοχαστικές παραλλαγές σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Η μέθοδος προγραμματισμού υπό τυχαίους περιορισμούς (CCP) είναι μια από τις κύριες προσεγγίσεις για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης κάτω από διάφορες αβεβαιότητες. Είναι μια διατύπωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που διασφαλίζει ότι η πιθανότητα να ικανοποιηθεί ένας συγκεκριμένος περιορισμός είναι πάνω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Με άλλα λόγια, περιορίζει την εφικτή περιοχή έτσι ώστε το επίπεδο εμπιστοσύνης της λύσης να είναι υψηλό. Ο προγραμματισμός υπό τυχαίους περιορισμούς παρέχει σχετικά ισχυρές λύσεις, ωστόσο, είναι συχνά δύσκολο να επιλυθεί.

Η βελτιστοποίηση υπό τυχαίους περιορισμούς είναι ιδιαίτερα σημαντική στη μηχανική και τη χρηματοοικονομική, όπου οι αβεβαιότητες στην τιμή, τη ζήτηση, την προσφορά, τη συναλλαγματική ισοτιμία, την ανακύκλωση και τον ρυθμό τροφοδοσίας είναι κοινές. Ορισμένες κλασικές εφαρμογές της μεθόδου περιλαμβάνουν τη διαχείριση ταμιευτήρων νερού και τη διαχείριση οικονομικού κινδύνου. Πιο πρόσφατα, η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί στην πλοήγηση μη επανδρωμένων αυτόνομων οχημάτων, καθώς και στη βέλτιστη παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας (Ackoij, Wim et al. 2011)

Σε ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, η αβεβαιότητα μπορεί να εφαρμοστεί στο δεξί ή στο αριστερό σκέλος κάθε περιορισμού. Ωστόσο, ένας συνδυασμός εφαρμογής αβεβαιότητας και στις δύο πλευρές μπορεί επίσης να είναι εφικτός. Ανεξάρτητα από το πού βρίσκεται η αβεβαιότητα στο μοντέλο, ο κύριος σκοπός είναι η μετατροπή του πιθανολογικού περιορισμού σε ισοδύναμη

ντετερμινιστική μορφή. Η γενική μορφή ενός πιθανολογικού περιορισμού στα προγράμματα CCP είναι η εξής:

$$P\left\{\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i x_i \leq \tilde{b}\right\} \geq (1 - \alpha)$$

$$(x_i \geq 0, \quad 0 \leq \alpha < 1, \quad i = 1, \dots, n) \quad (1)$$

όπου  $x_i$  είναι οι μεταβλητές απόφασης και  $\alpha$  είναι ο βαθμός εμπιστοσύνης ότι ο περιορισμός της ανισότητας ικανοποιείται. Υπάρχουν αναφορές στην βιβλιογραφία που αναφέρεται σε ένα  $(1 - \alpha)$  ως το όριο της παραβίασης του περιορισμού. Το διάνυσμα συντελεστή  $a_i$  και η παράμετρος  $b$  είναι στοχαστικά με καθορισμένη κατανομή πιθανότητας. Η θεωρία πιθανοτήτων έχει εφαρμοστεί για τη μετατροπή της ανισότητας πιθανοτήτων σε ντετερμινιστικό ισοδύναμο. Στην συνέχεια, ενσωματώνεται μια παράμετρος αβεβαιότητας  $b_i$  στη δεξιά πλευρά για κάθε  $e_i \in \{1, \dots, n\}$  σύμφωνα με μια κανονική κατανομή με μέση τιμή  $E(\tilde{b})$  και διακύμανση  $Var(\tilde{b})$ . Η κανονική κατανομή μετατρέπεται στην τυπική κανονική κατανομή στην ανισότητα (1) αφαιρώντας τον μέσο όρο από τον αριθμητή και διαιρώντας τους με την τυπική απόκλιση ως εξής:

$$P\left(\sum_{i=1}^n a_i x_i \leq \tilde{b}\right) = P\left(\frac{\tilde{b} - E(\tilde{b})}{\sqrt{Var(\tilde{b})}} \geq \frac{\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i x_i - E(\tilde{b})}{\sqrt{Var(\tilde{b})}}\right), \quad (2)$$

Το δεξί σκέλος της εξίσωσης μπορεί να απλοποιηθεί ως εξής:

$$P\left(\sum_{i=1}^n a_i x_i \leq \tilde{b}\right) = F\left(-\frac{\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i x_i - E(\tilde{b})}{\sqrt{Var(\tilde{b})}}\right), \quad (3)$$

Όπου το  $F$  είναι η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής της τυπικής κανονικής κατανομής. Επομένως:

$$F\left(-\frac{\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i x_i - E(\tilde{b})}{\sqrt{Var(\tilde{b})}}\right) \geq (1 - \alpha), \quad (4)$$

Σύμφωνα με τον πίνακα της τυπικής κανονικής κατανομής για τις τιμές του  $z$ , θεωρείται ότι  $F(Z_{1-\alpha}) = 1 - \alpha$ . Άρα, η ανισότητα (4) δικαιολογείται αν και μόνο αν:

$$-\frac{\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i x_i - E(\tilde{b})}{\sqrt{Var(\tilde{b})}} \geq Z_{1-\alpha} \quad (5)$$

Τότε ο ισοδύναμος ντετερμινιστικός περιορισμός γράφεται ως:

$$\sum_{i=1}^n \tilde{a}_i x_i \leq E(\tilde{b}) - Z_{1-\alpha} \sqrt{Var(\tilde{b})}, \quad (6)$$

Αντίστοιχα για την περίπτωση της αβεβαιότητας στο αριστερό σκέλος του περιορισμού, είναι:

$$\sum_{i=1}^n E(\tilde{a}_i) x_i + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sum_{i=1}^n Var(\tilde{a}_i)(x_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n Cov(\tilde{a}_i, \tilde{a}_j) x_i x_j} \leq b \quad (7)$$

Σε ειδικές περιπτώσεις, αν οι παράμετροι  $\alpha_i$  και  $\alpha_j$  είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη κάθε  $e_{ij} \in \{1, \dots, n\}$ , η συνδιακύμανση των παραμέτρων ( $Cov(\alpha_i, \alpha_j)$ ) θα είναι μηδέν. Επομένως, ο ισοδύναμος ντετερμινιστικός περιορισμός γράφεται ως εξής:

$$\sum_{i=1}^n E(\tilde{a}_i) x_i + Z_{1-\alpha} \sqrt{\sum_{i=1}^n Var(\tilde{a}_i)(x_i)^2} \leq b \quad (8)$$

Παρόμοια μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί στην περίπτωση που υπάρχει αβεβαιότητα και στις δύο πλευρές του περιορισμού. Η γραμμική προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μετατροπή της μη γραμμικής εξίσωσης σε γραμμική μορφή. Προφανώς, οποιαδήποτε άλλη κατανομή μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί αντί της κανονικής κατανομής για τη μετατροπή πιθανολογικών περιορισμών σε ντετερμινιστικές μορφές (Shapiro 2009).

### *Προγραμματισμός στόχων*

Ο προγραμματισμός στόχων είναι μια προσέγγιση για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν πολλαπλοί στόχοι για να επιτευχθούν. Ο προγραμματισμός στόχων διακρίνεται από την ικανότητα να εξισορροπεί τις απαραίτητες αντισταθμίσεις που πρέπει να γίνουν όταν υπάρχουν αντικρουόμενοι στόχοι. Είναι ουσιαστικά μια μέθοδος εξαγωγής του καλύτερου δυνατού αποτελέσματος ώστε να επιτυγχάνεται στο μεγαλύτερο δυνατό επίπεδο ο βασικός στόχος. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης που μοντελοποιούνται με βάση το μοντέλο του προγραμματισμού στόχων έχουν παρόμοιο τρόπο ανάπτυξης με

αυτόν που αναπτύσσονται τα μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού. Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο είναι ότι το μοντέλο προγραμματισμού στόχου είναι ικανό να εξυπηρετεί πολλαπλούς και συχνά μη συγκρίσιμους στόχους (π.χ. στόχοι που αναφέρονται σε διαφορετικές διαστάσεις ή δεν έχουν το ίδιο σύστημα μονάδων) και μάλιστα μπορεί να το κάνει με συγκεκριμένη σειρά προτεραιότητας (ιεραρχία).

Η σειρά προτεραιότητας αυτή καθορίζεται με βάση την αξία που έχει ο κάθε στόχος, δηλαδή ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Η συγκεκριμένη δυνατότητα που παρέχει ο προγραμματισμός στόχων, δηλαδή η ιεράρχηση των στόχων, βοηθά στην αντιμετώπιση όλων των στόχων που δεν μπορούν επιτευχθούν πλήρως ή δεν μπορούν να επιτευχθούν ταυτόχρονα με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνονται πάντα οι σημαντικότεροι στόχοι σε σύγκριση με τους λιγότερο σημαντικούς.

Ο προγραμματισμός στόχων γενικότερα μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση ή γενίκευση του γραμμικού προγραμματισμού με σκοπό τη διαχείριση πολλαπλών, συνήθως αντικρουόμενων, αντικειμενικών συναρτήσεων. Σε κάθε μία από αυτές τις συναρτήσεις δίνεται ένας στόχος ή μια τιμή στόχου που πρέπει να επιτευχθεί. Οι ανεπιθύμητες αποκλίσεις από αυτό το σύνολο των τιμών στόχου ελαχιστοποιούνται στη συνέχεια με μία συνάρτηση επιτυχίας. Αυτή η συνάρτηση μπορεί να είναι ένα διάνυσμα ή ένα σταθμισμένο άθροισμα που καθορίζεται από την μεταβλητή που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα. Ο προγραμματισμός στόχων χρησιμοποιείται για την εκτέλεση τριών τύπων ανάλυσης:

- Για τον καθορισμό των απαιτούμενων πόρων για την επίτευξη ενός επιθυμητού συνόλου στόχων.
- Για τον προσδιορισμό του βαθμού επίτευξης των στόχων με βάση τους διαθέσιμους πόρους.
- Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε συνθήκες που υπάρχουν διάφορες ποσότητες πόρων και μη σύμφωνη προτεραιοποίηση των στόχων.

*Προγραμματισμός στόχων υπό τυχαίους περιορισμούς (CCGP)*

Προερχόμενος από το CCP, ο προγραμματισμός στόχων υπό τυχαίους περιορισμούς (CCGP) είναι ουσιαστικά ένας συνδυασμός CCP και προγραμματισμού στόχων.

Η μέθοδος προγραμματισμού στόχων υπό τυχαίους περιορισμούς είναι ένας πολύ καλός τρόπος για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης λόγω της ανθεκτικότητας της. Επιτρέπει σε κάποιον να ορίσει ένα επιθυμητό επίπεδο εμπιστοσύνης και να λάβει υπόψη του την ανταλλαγή μεταξύ δύο ή περισσότερων στόχων. Ωστόσο, μπορεί να είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιλυθεί. Οι διάφορες πιθανολογικές συναρτήσεις είναι συχνά δύσκολο να διατυπωθούν, ειδικά για τα μη γραμμικά προβλήματα. Μικρές αποκλίσεις από την πραγματική συνάρτηση μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές αλλαγές στη βέλτιστη λύση.

Περαιτέρω επιπλοκές προστίθενται όταν οι μεταβλητές με και χωρίς αβεβαιότητα δεν μπορούν να αποσυνδεθούν. Λόγω αυτών των ζητημάτων, δεν υπάρχει ενιαία προσέγγιση για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων. Η πιο κοινή προσέγγιση είναι ο μετασχηματισμός των περιορισμών πιθανότητας σε ντετερμινιστικές συναρτήσεις αποσυνδέοντας τις μεταβλητές με και χωρίς αβεβαιότητα.

### **3.3 Στόχος του προγράμματος**

Ο στόχος του προγράμματος που αναπτύχθηκε είναι η βελτίωση ενός συστήματος μεταφορών σε ένα υπαίθριο μεταλλείο. Σκοπός είναι να εντοπίζει το βέλτιστο πλήθος οχημάτων που πρέπει να υπάρχουν στο σύστημα ώστε να επιτυγχάνονται οι μικρότεροι δυνατοί χρόνοι αδράνειας και το μικρότερο δυνατό κόστος.

Οι παράμετροι όπως ο χρόνος λειτουργίας για κάθε φορτηγό ή φορτωτή, καθώς και η σχέση μεταξύ τους που μετράτε με παραμέτρους όπως ο χρόνος φόρτωσης, ο χρόνος ταξιδιού, η μεταφορική ικανότητα των οχημάτων κ.α. παίζουν καθοριστικό ρόλο για όλα τα μεταφορικά συστήματα και συνεπώς το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε λαμβάνει υπόψη και αυτούς τους παράγοντες.

Ακόμα και σε ένα ιδανικό σύστημα, όπου όλοι οι φορτωτές λειτουργούν συνεχώς και τα φορτηγά φτάνουν στις θέσεις φόρτωσης και εκκένωσης σε σταθερά χρονικά διαστήματα (χωρίς αδρανείς ή μη παραγωγικούς χρόνους), υπάρχουν θέματα βελτιστοποίησης αφού η επίδραση που σχετίζεται με τον πολύ μεγάλο αριθμό παραμέτρων που εμπλέκονται κάνουν το πρόβλημα ιδιαίτερα πολύπλοκο. Στα συστήματα που ανταποκρίνονται σε μεγάλο βαθμό σε πραγματικές συνθήκες, όπου υφίστανται διαφορετικοί χρόνοι όσο και περισσότερες περιπτώσεις αβεβαιότητας (καθυστερήσεις, προβλήματα στη μεταφορά κ.α.), τα πράγματα γίνονται ιδιαίτερα πιο δύσκολα.

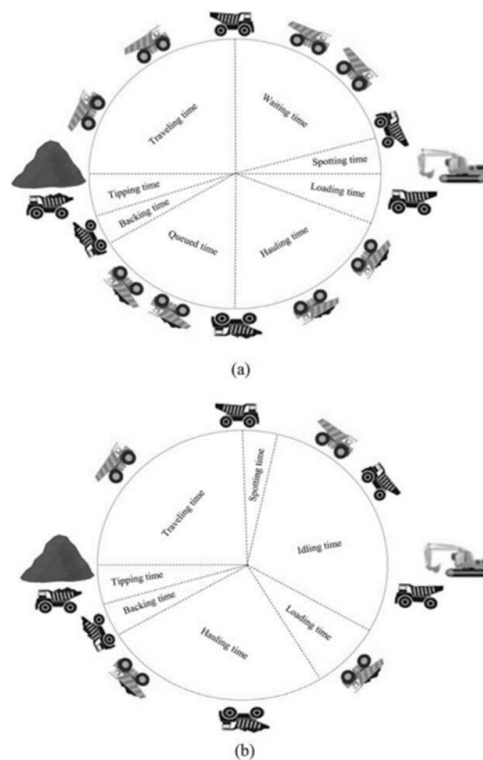
Το παραπάνω έχει σαν συνέπεια να δημιουργούνται αναντιστοιχίες μεταξύ φορτηγών και φορτωτών (δεν υπάρχει η κατάλληλη ισορροπία μεταξύ των στόλων), με αποτέλεσμα να εμφανίζονται φαινόμενα πλεονάζοντος ή ελλειμματικού στόλου φορτηγών. Η εικόνα 17 απεικονίζει τον κύκλο του μεταφορικού συστήματος σε υπαίθρια μεταλλεία σε περιπτώσεις με πλεόνασμα φορτηγών και σε περιπτώσεις με έλλειμα φορτηγών, αντίστοιχα. Στη συγκεκριμένη εικόνα ο χρόνος ταξιδιού (travelling time) αναφέρεται στον χρόνο που το φορτηγό κινείται χωρίς φορτίο προς τον φορτωτή. Ο χρόνος αναμονής (waiting time) αναφέρεται στο χρόνο που το άδειο φορτηγό περιμένει στην θέση φόρτωσης. Ο χρόνος αδράνειας (idling time) αναφέρεται στον χρόνο που ένας φορτωτής περιμένει να αφιχθεί ένα άδειο φορτηγό. Ο χρόνος ελιγμών (spotting time) είναι ο χρόνος που ένα κενό φορτηγό χρειάζεται για να τοποθετηθεί σε κατάλληλη θέση για φόρτωση. Ο χρόνος φόρτωσης (loading time) είναι ο χρόνος που είναι απαραίτητος για να φορτωθεί πλήρως ένα άδειο φορτηγό από έναν φορτωτή. Ο χρόνος μεταφοράς (hauling time) είναι χρόνος που δαπανά έναν έμφορτο φορτηγό από την θέση φόρτωσης στην θέση εκκένωσης. Ο χρόνος αναμονής στην ουρά (queued time) είναι ο χρόνος που ένα φορτωμένο φορτηγό περιμένει στη θέση εκκένωσης. Ο χρόνος αναστροφής (backing time) αναφέρεται στο χρόνο που ένα φορτωμένο φορτηγό χρειάζεται για να τοποθετηθεί κατάλληλα για την διαδικασία της εκκένωσης. Ο χρόνος ανατροπής (tipping time) τέλος αναφέρεται στον χρόνο εκκένωσης ενός φορτωμένου φορτηγού στον χώρο απόθεσης.

Τόσο το φαινόμενο του υπερμεγέθους στόλου φορτηγών όσο και αυτού του ελλειμματικού έχουν σοβαρό αντίκτυπο στους χρόνους ταξιδιού και μεταφοράς. Και οι δύο εικόνες του γραφήματος δείχνουν ότι το μεγαλύτερο ποσοστό χαμένου χρόνου λειτουργίας των φορτηγών και των εκσκαφών δημιουργείται κατά την αναμονή για φόρτωση. Στην περίπτωση μεταλλείων με πλεόνασμα φορτηγών οι φορτωτές να εξαντλούν τις δυνατότητες τους και αντίστοιχα τα φορτηγά αναγκάζονται να περιμένουν για να εξυπηρετηθούν με αποτέλεσμα το σχηματισμό σειράς αναμονής. Αντίστοιχα, σε ένα μεταλλείο όπου υπάρχει έλλειμα φορτηγών, οι φορτωτές περιμένουν μέχρι να αφιχθεί κάποιο φορτηγό και έτσι δημιουργούνται μεγάλοι χρόνοι αδράνειας.



Τα δύο παραπάνω αν συμβαίνουν επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την παραγωγικότητα του μεταλλείου και φυσικά τη λειτουργία του κύκλου μεταφοράς. Η σωστή αντιστοίχιση των δύο στόλων βοηθάει στην αποτελεσματική οργάνωση του κύκλου μεταφοράς και στην μείωση του χαμένου χρόνου έτσι ώστε να αυξάνεται η παραγωγικότητα και να μειώνονται τα κόστη.

Επομένως, πέρα από τους προφανείς σκοπούς της αύξησης της παραγωγικότητας και της μείωσης του κόστους, το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε προσφέρει στον χρήστη (σχεδιαστή του κύκλου μεταφοράς) την δυνατότητα να απαλλαγεί από φαινόμενα όπως τα παραπάνω, και έτσι να εξοικονομήσει σημαντικούς οικονομικούς πόρους(αποφυγή αγοράς πλεονάζοντος εξοπλισμού, μικρότερες ανάγκες προσωπικού κ.α.).



Εικόνα 17: Σχηματική απεικόνιση της αναντιστοίχιας των στόλων των φορητών και των φορτωτών. (α) Λειτουργία συστήματος μεταφοράς με πλεονάζοντα αριθμό φορητών. (β) Λειτουργία συστήματος μεταφοράς με έλλειμα φορητών. (Mohtasham et al. 2021)

### 3.4 Ανάπτυξη και δομή μοντέλου CCGP

Η αρχική προσπάθεια επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη ενός παρεμφερούς προγράμματος με αυτό των Mehmaz et al. (2019) με σκοπό την εν συνεχεία σύγκρισή τους για την εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων. Αυτό δεν κατέστη δυνατό λόγω της εμφάνισης σημαντικών ζητημάτων όπως ήταν η έλλειψη

δεδομένων για να μπορέσει να γίνει η σύγκριση. Συνεπώς επιλέχθηκε η ανάπτυξη ενός μοντέλου εκ του μηδενός που θα εξυπηρετούσε τους αντικειμενικούς σκοπούς που περιεγράφηκαν παραπάνω. Η πρώτη βασική απόφαση που ελήφθη ήταν με βάση ποια προσέγγιση θα αναπτυχθεί το μοντέλο CCGP.

Οι προσεγγίσεις που δόθηκαν για το πρόβλημα ήταν δύο. Η μία προσέγγιση που δόθηκε σαν λύση για την δημιουργία του προγράμματος ήταν αυτή των γενετικών αλγορίθμων ή της λύσης με χρήση τυχαίων συνόλων λύσεων όπου στόχος είναι μέσα από την εκτέλεση τους να επιλεγεί η βέλτιστη λύση σύμφωνα με ένα κριτήριο (αντικειμενική συνάρτηση evaluation). Στην περίπτωση του προβλήματος των συστημάτων μεταφοράς στα μεταλλεία το κριτήριο είναι το κόστος και ο χρόνος.

Η δεύτερη προσέγγιση που δόθηκε ήταν με χρήση του λεγόμενου προγραμματισμού στόχων όπου χρησιμοποιείται γραμμικός προγραμματισμός σε σειρά λύσεων ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι που θέτει ένα πρόβλημα μέσα σε ένα εύρος αποδεκτών τιμών.

Με βάση τη βιβλιογραφία τα τελευταία χρόνια όμως δίνεται σαν πιο αποτελεσματική λύση η χρήση γενετικών αλγορίθμων, σε σχέση με τον γραμμικό προγραμματισμό, δηλαδή απόλυτα στοχαστικές προσεγγίσεις, ειδικά όταν οι παράμετροι είναι πάρα πολλές, π.χ. όταν υπάρχει πάρα πολύ μεγάλος στόλος φορτηγών, σημείων φόρτωσης και εκφόρτωσης.

Παράδειγμα τέτοιας μελέτης είναι η μελέτη «The Genetic Algorithm for Truck Dispatching Problems in Surface Mine» των (Ming & He, 2010. Η οποία μαζί με την βιβλιογραφία που την συνοδεύει προτείνει σαν πιο βέλτιστη λύση σε τέτοια προβλήματα την προσέγγιση των γενετικών αλγορίθμων όπως αντίστοιχα και η μελέτη «A Genetic Algorithm for Truck Dispatching in Mining» του Cox, (2017), όπως και η «An Integer Programming Approach for Truck-Shovel Dispatching Problem in Open-Pit Mines» των Zhang & Xia (2015).

### **Εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων στο μοντέλο που δημιουργήθηκε**

Στο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε δημιουργήθηκε ένα σύστημα όπου λαμβάνει τις παραμέτρους από ένα γραφικό περιβάλλον WEB και στη συνέχεια παράγει λύσεις μέχρι να καταλήξει στη βέλτιστη λύση με χρήση των γενετικών αλγορίθμων.

Για την εύρεση της λύσης ισχύει η παρακάτω λογική:

Η λύση του προβλήματος παράγεται με βάση μια στοχαστική διαδικασία όπου αρχικά παράγεται σειρά από τυχαίες λύσεις και στην συνέχεια με μια λογική βελτιστοποίησης παράγονται νέες λύσεις που είναι καλύτερες από τις προηγούμενες και τελικά προκύπτει μετά από μια σειρά επαναλήψεων η τελική βέλτιστη λύση. Η λογική βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε είναι αυτή των γενετικών αλγορίθμων όπως αναφέρθηκε.

Πιο συγκεκριμένα σαν λύση θεωρείται μια σειρά από αντιστοιχίσεις φορτηγών με σημεία φόρτωσης και εκφόρτωσης. Για παράδειγμα μια λύση είναι ο Πίνακας 8 που περιγράφει ακριβώς ποια βήματα πρέπει να ακολουθήσει κάθε φορτηγό για να επιτευχθεί η βέλτιστη λύση.

Φορτηγό	Σημείο Φόρτωσης-Εκφόρτωσης
1	Φ1
2	Φ2
3	Φ3
4	Φ4
1	E1
2	E2
3	E3
4	E4
1	Φ2
2	Φ3
3	Φ1
4	Φ4
1	E2
2	E1
3	E3
4	E4
...	...

--	--

Πίνακας 8: Δομή Εξαγωγής Λύσεων

Η σειρά αυτή δίνει μια λύση όταν τελικά οι εναλλαγές αυτές εκπληρώσουν τις απαιτήσεις, δηλαδή όλα τα σημεία εκφόρτωσης έχουν λάβει τις ποσότητες από τα σημεία φόρτωσης που έχουν οριστεί από τον εκάστοτε χρήστη του προγράμματος για να καλύπτουν τις ανάγκες παραγωγής του μεταλλείου.

Με βάση αυτή τη σειρά υπολογίζονται οι χρόνοι για τις μεταβάσεις από σημείο Φ στο σημείο E, δηλαδή από σημείο φόρτωσης σε σημείο εκφόρτωσης, καθώς και οι χρόνοι αναμονής για κάθε φορτηγό, και ο συνολικός χρόνος για την ολοκλήρωση του κύκλου μεταφοράς.

Σαν κύρια συνάρτηση εκτίμησης της λύσης θεωρείται ο συνολικός χρόνος για την διεκπεραίωση των απαιτήσεων του προβλήματος, δηλαδή για την ολοκλήρωση όλων των απαιτήσεων που έχει ορίσει ο χρήστης. Σε περίπτωση που δύο λύσεις δώσουν ίσο χρόνο, τότε στην εκτίμηση της βέλτιστης λύσης παίζει ρόλο ο χρόνος αναμονής των φορτηγών.

Τελικά προκύπτει η παρακάτω δομή για την εξαγωγή της λύσης:

1. Αρχικά λαμβάνεται μια σειρά από  $\mu$  λύσεις :

$$\Lambda_1, \Lambda_2, \Lambda_3, \dots, \Lambda_\mu$$

2. Ταξινομούνται οι λύσεις με βάση το συνολικό χρόνο
3. Από τις πρώτες  $\mu/3$  λύσεις αλλάζει τυχαία από τον κώδικα σε K σημεία η σειρά των φορτηγών σε A λύσεις και παράγονται A νέες λύσεις. Υπολογίζεται έτσι ο νέος χρόνος και τελικά προκύπτει μια νέα γενιά από λύσεις.
4. Το πρόγραμμα ταξινομεί τις λύσεις εκ νέου και επαναλαμβάνει την διαδικασία για N φορές.
5. Στο τέλος σαν καλύτερη λύση λαμβάνεται η τελευταία λύση πριν τον τερματισμό του κώδικα, αφού είναι αυτή που έχει πετύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα.

Για την εισαγωγή των δεδομένων στο σύστημα υπάρχει κατάλληλο γραφικό περιβάλλον WEB, όπου ο χρήστης δίνει τις τιμές ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκμετάλλευσης και τα δεδομένα του μεταλλείου. Έχει επιλεγεί αρχικά το σύστημα

να δίνει κάποιες τυχαίες τιμές, οι οποίες δεν είναι δεσμευτικές και αλλάζουν κατά τη βούληση του χρήστη. Το περιβάλλον εισαγωγής των δεδομένων φαίνεται στις Εικόνες 19 και 20.

# Σύστημα Φορτηγών - Φορτωτών

Βελτιστοποίηση Μεταφορών

Παρακαλώ εισάγετε δεδομένα

Πλήθος Φορτηγών (από 1 έως 250):

Πλήθος Φορτωτών (από 1 έως 250):

Θέσεις εκφόρτωσης (από 1 έως 250):

[Συνέχεια >](#)

Εικόνα 18: Αρχική σελίδα γραφικού περιβάλλοντος για την εισαγωγή των βασικών δεδομένων

## Χρόνοι φόρτωσης φορτηγών (sec/τόνο)

Φορτηγό 1

Φορτηγό 2

Φορτηγό 3

Φορτηγό 4

Φορτηγό 5

## Μέγιστη ποσότητα φορτίου φορτηγών (τόνους)

Φορτηγό 1

Φορτηγό 2

Φορτηγό 3

Φορτηγό 4

Φορτηγό 5

## Χρόνοι εκφόρτωσης φορτηγών (sec/τονο)

Φορτηγό 1

Φορτηγό 2

Φορτηγό 3

Φορτηγό 4

Φορτηγό 5

Εικόνα 19: Δεύτερη σελίδα του γραφικού περιβάλλοντος για την εισαγωγή δεδομένων

**Μέση ταχύτητα φορτηγών (m/s)**

Φορτηγό 1

Φορτηγό 2

Φορτηγό 3

Φορτηγό 4

Φορτηγό 5

**Απόσταση φορτωτών από θέση εκφόρτωσης (m)**

	θέση Εκφ 1	θέση Εκφ 2	θέση Εκφ 3	θέση Εκφ 4	θέση Εκφ 5
Φορτωτής 0	<input type="text" value="6830,37"/>	<input type="text" value="8958,48"/>	<input type="text" value="4176,62"/>	<input type="text" value="1315,77"/>	<input type="text" value="9147,05"/>
Φορτωτής 1	<input type="text" value="3170,38"/>	<input type="text" value="2286,81"/>	<input type="text" value="8655,44"/>	<input type="text" value="6474,01"/>	<input type="text" value="7041,22"/>
Φορτωτής 2	<input type="text" value="5399,28"/>	<input type="text" value="7499,30"/>	<input type="text" value="6182,07"/>	<input type="text" value="6652,58"/>	<input type="text" value="9648,87"/>
Φορτωτής 3	<input type="text" value="6213,88"/>	<input type="text" value="2443,98"/>	<input type="text" value="5658,63"/>	<input type="text" value="8737,42"/>	<input type="text" value="5065,24"/>
Φορτωτής 4	<input type="text" value="6151,61"/>	<input type="text" value="10787,32"/>	<input type="text" value="8997,38"/>	<input type="text" value="4787,72"/>	<input type="text" value="10845,07"/>

**Απαιτήσεις θέσεις εκφόρτωσης από φορτωτές**

	Σημείο Εκφ 1	Σημείο Εκφ 2	Σημείο Εκφ 3	Σημείο Εκφ 4	Σημείο Εκφ 5
Φορτωτής 0	<input type="text" value="11,02"/>	<input type="text" value="4,00"/>	<input type="text" value="8,17"/>	<input type="text" value="3,59"/>	<input type="text" value="9,11"/>
Φορτωτής 1	<input type="text" value="6,37"/>	<input type="text" value="3,00"/>	<input type="text" value="5,61"/>	<input type="text" value="4,20"/>	<input type="text" value="10,21"/>
Φορτωτής 2	<input type="text" value="8,51"/>	<input type="text" value="11,22"/>	<input type="text" value="4,31"/>	<input type="text" value="3,29"/>	<input type="text" value="4,32"/>
Φορτωτής 3	<input type="text" value="3,63"/>	<input type="text" value="8,81"/>	<input type="text" value="6,96"/>	<input type="text" value="2,79"/>	<input type="text" value="11,92"/>
Φορτωτής 4	<input type="text" value="2,80"/>	<input type="text" value="7,64"/>	<input type="text" value="7,12"/>	<input type="text" value="3,56"/>	<input type="text" value="6,80"/>

Εικόνα 20: Συνέχεια δεύτερης σελίδας γραφικού περιβάλλοντος για την εισαγωγή δεδομένων

Πατώντας την επιλογή αποστολή για ανάλυση, εκτελείται ο αλγόριθμος και προκύπτουν όλες οι βέλτιστες λύσεις για κάθε επανάληψη, καθώς και οι χρόνοι αναμονής και ο συνολικός χρόνος του κύκλου. Τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν και σε άλλα προγράμματα, όπως το excel, και να χρησιμοποιηθούν σε πρόσθετες αναλύσεις.

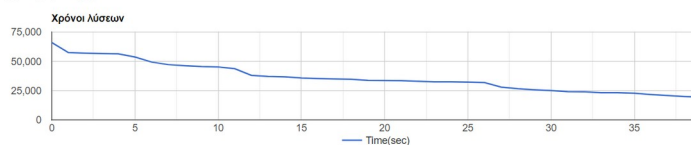
Η γραφική παράσταση της βελτίωσης των λύσεων που παράγονται σε σχέση με τον χρόνο φαίνεται στην Εικόνα 21, όπως δίνεται από το πρόγραμμα.

### Αποτελέσματα

#### Χρόνοι λύσεων - Αυξουσα Ταξινόμηση

19444 - 19946 - 20755 - 21637 - 22739 - 23196 - 23208 - 23925 - 24089 - 25058 - 25692 - 26630 - 28003 - 31873 - 32288 - 32440 - 32523 - 32981 - 33528 - 33627 - 33715 - 34675 - 34935 - 35309 - 35747 - 36824 - 37184 - 38038 - 43688 - 45242 - 45532 - 46237 - 47194 - 49390 - 53676 - 56364 - 56623 - 56988 - 57507 - 66072 -

#### Διάγραμμα χρόνων λύσεων



#### Καλύτερη Λύση Αναλυτικά

- Φορτηγό 0 από σημείο φόρτωσης 0 σε σημείο φόρτωσης 4
- Φορτηγό 2 από σημείο φόρτωσης 2 σε σημείο φόρτωσης 4
- Φορτηγό 2 από σημείο φόρτωσης 2 σε σημείο φόρτωσης 3
- Φορτηγό 3 από σημείο φόρτωσης 0 σε σημείο φόρτωσης 2
- Φορτηγό 0 από σημείο φόρτωσης 1 σε σημείο φόρτωσης 2
- Φορτηγό 4 από σημείο φόρτωσης 4 σε σημείο φόρτωσης 0
- Φορτηγό 4 από σημείο φόρτωσης 2 σε σημείο φόρτωσης 2
- Φορτηγό 4 από σημείο φόρτωσης 4 σε σημείο φόρτωσης 1
- Φορτηγό 2 από σημείο φόρτωσης 3 σε σημείο φόρτωσης 2
- Φορτηγό 3 από σημείο φόρτωσης 1 σε σημείο φόρτωσης 3
- Φορτηγό 2 από σημείο φόρτωσης 2 σε σημείο φόρτωσης 0

Εικόνα 21: Απεικόνιση αποτελέσματος προγράμματος

Εν συνεχεία μπορούν να εξαχθούν και άλλα πολύ σημαντικά δεδομένα, όπως οι χρόνοι αναμονής κάθε φορτηγού, οι χρόνοι λειτουργίας των φορτωτών, η χιλιομετρική απόσταση που έχουν διανύσει τα φορτηγά, ο χρόνος που τα φορτηγά βρίσκονται σε κάθε θέση εκφόρτωσης και, τέλος, το βέλτιστο πλήθος φορτηγών για την ελαχιστοποίηση της διάρκειας του μεταφορικού κύκλου.

## Αναλυτικοί Χρόνοι

### Χρόνοι Χρήσης κάθε φορτηγού

Φορτηγό	Χρόνος Χρήσης(sec)	Χρόνος Αναμονής(sec)	Ποσοστό Χρήσης(%)
0	11750	1767	86.93
1	17393	652	96.39
2	6973	1537	81.94
3	16432	653	96.18
4	12833	2875	81.70

### Χρόνοι Χρήσης κάθε Σημείου Φόρτωσης

Σημείο Φόρτωσης	Χρόνος(sec)
0	5900
1	7662
2	3557
3	2790
4	1395

Εικόνα 22: Αναλυτικοί χρόνοι κάθε φορτηγού κ σημείου φόρτωσης

### Χρόνοι Χρήσης κάθε θέσης Εκφόρτωσης

Σημείο Εκφόρτωσης	Χρόνος(sec)
0	4994
1	7328
2	8898
3	7347
4	2139

Εικόνα 23: Αναλυτικοί χρόνοι χρήσης κάθε θέσης εκφόρτωσης

### 3.5 Ανάπτυξη μοντέλου με χρήση της γλώσσας Python

#### Προβλήματα στην ανάπτυξη του μοντέλου

Το αρχικό και βασικό πρόβλημα στην υλοποίηση του μοντέλου ήταν το πέρασμα των παραμέτρων. Η υλοποίηση θα μπορούσε να γίνει σε ένα κλασικό command line περιβάλλον όπου σειριακά ο υπολογιστής θα απαιτούσε από τον χρήστη να ορίσει τις τιμές. Παρόλα αυτά μια τέτοια διαδικασία είναι για τον χρήστη δύσχρηστη και χρονοβόρος.

Δεύτερη προσέγγιση ήταν να ορίζονται οι παράμετροι σε ένα φύλλο excel ή csv, το οποίο στη συνέχεια διαβάζεται από την python και αυτή με την σειρά της το χρησιμοποιεί για την επίλυση. Ο τρόπος αυτός έχει το πλεονέκτημα ότι ένα πείραμα μπορεί να εκτελεστεί όσες φορές επιθυμεί ο χρήστης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Δηλαδή μπορεί να ανατρέξει στα δεδομένα αυτά όσες φορές θέλει. Επίσης μπορεί να δημιουργήσει όσα διαφορετικά δεδομένα θέλει που ουσιαστικά ορίζουν ξεχωριστά προβλήματα. Το μειονέκτημα παρόλα αυτά αυτής της διαδικασίας είναι ότι τα δεδομένα δημιουργούνται εφόσον ο χρήστης ακολουθήσει ακριβώς το format του αρχείου που θα οριστεί για την συμπλήρωση των δεδομένων. Σε περίπτωση λάθους τότε το πρόγραμμα της python δεν μπορεί να διαβάσει τα δεδομένα. Όμως τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης είναι πάρα πολλά και η πιθανότητα λάθους πολύ μεγάλη. Για μείωση της πιθανότητας λάθους ο χρήστης είναι σημαντικό να μπορεί να χρησιμοποιεί μια πιο τυποποιημένη μορφή με έλεγχο για τυχόν λάθη.

Τρίτη περίπτωση ήταν η δημιουργία ενός γραφικού περιβάλλοντος εργασίας (GUI) που θα είναι εύχρηστο για την εισαγωγή δεδομένων, θα μπορεί να εξάγει και να εισάγει αρχεία δεδομένων με μορφή που θα καθορίζει το περιβάλλον και τελικά θα οδηγεί στην εκτέλεση του αλγόριθμου για βελτιστοποίηση δίνοντας τα αποτελέσματα με μια κατανοητή οπτικοποιημένη μορφή.

Με βάση τα παραπάνω και όπως αναπτύχθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο επιλέχθηκε η χρήση GUI (γραφικού περιβάλλοντος) τόσο για την εισαγωγή των δεδομένων όσο και για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Για το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος WEB Interface στα πρότυπα των ιστοσελίδων. Η δυνατότητα αυτή δίνεται με την χρήση της βιβλιοθήκης του Flask που είναι κατάλληλη για την δημιουργία ενός server WEB από την Python και τελικά με χρήση περιβαλλόντων όπως της HTML και της JAVASCRIPT μπορεί



εύκολα να δημιουργηθεί περιβάλλον εργασίας κατάλληλο για την καλύτερη και ευκολότερη δυνατή χρήση της εφαρμογής.

### **Τεχνολογίες που χρησιμοποιήθηκαν κατά την ανάπτυξη του μοντέλου**

Τελικά λόγω της απαίτησης του περιβάλλοντος GUI με WEB χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω τεχνολογίες :

#### **HTML/CSS / Bootstrap**

Η HTML/CSS/Bootstrap είναι βασικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την δημιουργία ιστοσελίδων και έτσι βοηθούν να δημιουργηθεί ένα πολύ εύχρηστο και όμορφο περιβάλλον για τον χρήστη στα πρότυπα των ιστοσελίδων στο Internet.

#### **JAVASCRIPT / JQUERY**

Η Javascript χρειάζεται για το περιβάλλον εργασίας για να παράγονται δυναμικά οι πίνακες για τους χρόνους των φορτηγών και φορτωτών όπως και για την αποστολή των στοιχείων στην Python

#### **PYTHON / Flask**

Η Python ουσιαστικά είναι η γλώσσα που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση και τελικά την παραγωγή των αποτελεσμάτων που στέλνονται πάλι στο περιβάλλον HTML/CSS/Bootstrap/javascript για να οπτικοποιηθούν. Το Flask είναι βιβλιοθήκη της Python που κάνει τον υπολογιστή να λειτουργεί σαν webserver και έτσι μπορεί να δημιουργήσει επικοινωνία μεταξύ του περιβάλλοντος HTML/CSS/Bootstrap/javascript (Front end) με το περιβάλλον της Python (Back end). Ουσιαστικά το Flask είναι ο ενδιάμεσος κρίκος και η γέφυρα μεταξύ των Frontend και Backend.

Στην συνέχεια έπρεπε να εντοπιστούν οι βασικές μεταβλητές εισόδου και εξόδου, που συνθέτουν το πρόβλημα και είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη του μοντέλου. Αυτές είναι :

1. Πλήθος φορτωτών (Εισόδου)
2. Πλήθος φορτηγών (Εισόδου)
3. Θέσεις εκφόρτωσης (Εισόδου)
4. Απαιτήσεις σε υλικό θέσεων εκφόρτωσης σε κάθε σημείο (Εισόδου)
5. Ωφέλιμο φορτίο για κάθε φορτηγό (Εισόδου)

6. Χρόνος φόρτωσης φορτηγού (Εισόδου)
7. Χρόνος εκφόρτωσης κάθε φορτηγού (Εισόδου)
8. Μέση ταχύτητα κάθε φορτηγού (Εισόδου)
9. Απόσταση κάθε φορτωτή από τα σημεία εκφόρτωσης (Εισόδου)
10. Συνολικός χρόνος ολοκλήρωσης μεταφορικού κύκλου (Εξόδου)
11. Χρόνος αναμονής κάθε φορτηγού (Εξόδου)
12. Χρόνος χρήσης κάθε φορτηγού (Εξόδου)
13. Χρόνος χρήσης κάθε φορτωτή (Εξόδου)
14. Χρόνος χρήσης κάθε σημείου εκφόρτωσης από τα φορτηγά (Εξόδου)

Το επόμενο βήμα ήταν η ανάπτυξη του αλγορίθμου. Το πρόγραμμα λειτουργεί όπως αναφέρθηκε με τη χρήση της βιβλιοθήκης flask όπου με βάση το URL στην σελίδα που επισκέπτεται ο χρήστης εμφανίζεται το αντίστοιχο αποτέλεσμα. Στην συνέχεια ακολουθούν κάποια ενδεικτικά τμήματα του αλγορίθμου που περιγράφουν τον βασικό τρόπο λειτουργίας του. Πιο συγκεκριμένα υπάρχει το παρακάτω routing :

#εμφάνιση της αρχικής σελίδας

```
@app.route("/")
```

```
def firstpage():
```

```
    return render_template('index.html')
```

# εμφάνιση σελίδας πληροφοριών

```
@app.route("/info")
```

```
def infopage():
```

```
    return render_template('info.html')
```

# φόρτωμα των αρχείων js και css για την σελίδα

```
@app.route("/static/<file>")
```

```
def jsfile(file):
```

```
    return send_file("./static/"+file)
```

# η σελίδα που θα εκτελέσει την επεξεργασία και θα εμφανίσει τα αποτελέσματα

```
@app.route("/results", methods = ['POST', 'GET'])
```

```
def results():
```

# φορτώνει τις παρακάτω μεταβλητές

# αριθμός φορτηγών f αντιστοιχεί στην μεταβλητή nh

```
f=int(request.form['f'])
```

```

# αριθμός σημείων φόρτωσης (loaders) e που αντιστοιχεί στην μεταβλητή ns
    e=int(request.form['e'])
# αριθμός προορισμών se - σημείων εκφόρτωσης nd
    se=int(request.form['se'])
# χρόνος φόρτωσης κάθε φορτηγού TFi για ποσότητα 1 αντιστοίχιση με την
μεταβλητή Sih
    print(e,se)
    TF=[]
    for i in range(f):
        TF.append(float(request.form['tf'+str(i)]))
# χρόνος εκφόρτωσης κάθε φορτηγού TFi για ποσότητα 1
    TEF=[]
    for i in range(f):
        TEF.append(float(request.form['tef'+str(i)]))
# ταχύτητα κάθε φορτηγού
    U=[]
    for i in range(f):
        U.append(float(request.form['u'+str(i)]))
# απόσταση του φορτωτή i από το σημείο εκφόρτωσης j SE
    SE=[]
    for i in range(e):
        tmp=[]
        for j in range(se):
            tmp.append(float(request.form['se'+str(i)+"_"+str(j)]))
        SE.append(tmp)
# ανάγκη υλικών με ποσότητα από φορτωτή i στο σημείο εκφόρτωσης j SSE (αυτό
εξασφαλίζει διαφορετικά υλικά από κάθε φορτωτή
    SSE=[]
    for i in range(e):
        tmp=[]
        for j in range(se):
            tmp.append(float(request.form['sse'+str(i)+"_"+str(j)]))
        SSE.append(tmp)

```

Οι γραμμές κώδικα που ακολουθούν αποτελούν το προγραμματιστικό τμήμα όπου έγινε χρήση γενετικών αλγορίθμων.

```
# διαδικασία παραγωγής λύσης
```

```
SOLS=[]
```

```
#παράγεται αρχικά ένας αρχικός πληθυσμός λύσεων
```

```
# για κάθε λύση δίνουμε την σειρά που τα φορτηγά θα έρθουν σε κάθε φορτωτή και θα πάνε σε κάποια θέση εκκένωσης
```

```
for i in range(40):
```

```
    # το σύνολο των μετακινήσεων
```

```
    L=[]
```

```
    #για κάθε λύση παίρνουμε
```

```
    #1000 διαφορετικές μετακινήσεις (κατά μέγιστο)
```

```
        # το k Φορτηγό να πάει στο fort φορτωτή και να καταλήξει στον efort σημείο εκφόρτωσης
```

```
        for j in range (1000):
```

```
            k=rd.randint(0,f-1)
```

```
            fort=rd.randint(0, e-1)
```

```
            efort=rd.randint(0,se-1)
```

```
            L.append([k,fort,efort])
```

```
        #προσθέτουμε το σύνολο των μετακινήσεων στην κάθε περίπτωση και έχουμε το σύνολο SOLS που είναι οι πιθανές λύσεις
```

```
        SOLS.append(L)
```

```
    #γίνεται αξιολόγηση των λύσεων
```

```
        # για κάθε λύση δημιουργούμε ένα ev που είναι ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης όλων των μετακινήσεων
```

```
        # μέχρι να εκπληρωθεί η απαίτηση ότι όλα τα σημεία εκφόρτωσης πήραν τις απαιτούμενες ποσότητες από
```

```
        # τα σημεία φόρτωσης
```

```
        E=[]
```

```
    for s in SOLS:
```

```
        #γίνεται η αξιολόγηση δηλαδή λαμβάνουμε το πόσος είναι ο χρόνος μετακίνησης όλων των φορτηγών
```

```
        ev=evaluate(s,f,e,se,TF,TEF,U,SE,SSE)
```

```
    print(ev)
```

```

        # προσθέτουμε στο σύνολο των αξιολογήσεων E τις αξιολογήσεις που
αντιστοιχούν σε κάθε λύση του
        # συνόλου SOLS
        E.append(ev)
        #παίρνουμε ταξινομημένες τις λύσεις με βάση το evaluate της κάθε μίας
        NSOLS = [s1 for e1,s1 in sorted(zip(E, SOLS))]
        #παίρνουμε την λύση
        EE = [e1 for e1,s1 in sorted(zip(E, SOLS))]
        #με την συνάρτηση getSol παίρνουμε τα αποτελέσματα των λύσεων και
τελικά παίρνουμε την τελική λύση
        tel=getSol(NSOLS[0],f,e,se,TF,TEF,U,SE,SSE);
        return render_template('results.html', ff=EE, ee=tel)

```

Η ανάλυση και τελικά η μετακίνηση στις λύσεις γίνεται με τον παρακάτω αλγόριθμο

```

# Η συνάρτηση αυτή εξάγει μια λύση
def getSol(s, f,e,se,TF1,TEF1,U1,SE1,SSE):
#η λύση παίρνει όλες τις μετακινήσεις και τις εφαρμόζει
# και υπολογίζει τον χρόνο μετακίνησης και το συνολικό μήκος των μετακινήσεων
# το πλήθος των μετακινήσεων
#τα μεγέθη που μετρούνται
        endsol=[]
#ορίζει το σύνολο των απαιτήσεων
        SSE1=[]
        for i in range(e):
                L=[]
                for j in range(se):
                        L.append(SSE[i][j])
                SSE1.append(L)
#παίρνει όλους τους φορτωτές
        F=[]
        for i in range(f):
                F.append(())
#για κάθε μετακίνηση k της μεταφοράς s παίρνει κάθε φορτηγό k[0] που ξεκινά
loader k[1] και που ξεφορτώνει k[2] και τα βάζει στο σύνολο F

```

```

for k in s:
    # στο F κάθε μετακίνησης ενός φορτηγού βάζει τις παρακάτω μετακινήσεις
    # k[1] δηλαδή τη μετακίνηση, το 0 έκανε φόρτωση ή 1 εκφόρτωση
    # 0 την ποσότητα που αρχικά μετέφερε, από που ξεκινά k[0] και που
καταλήγει
    # αν είναι -1 είναι στην φάση μετακίνησης
    F[k[0]].append([k[1],0,0,TF1[k[0]],k[2]])
    F[k[0]].append([k[2],1,0,TEF1[k[0]],k[1]])
    tu=float(SE1[k[1]][k[2]]/U1[k[0]]+1)
    F[k[0]].append([-1,2,0,0, SE1[k[1]][k[2]])
    # αρχικοποιεί το σύνολο QE και QSE που είναι οι ποσότητες φόρτωσης και
εκφόρτωσης
    tm=0
    QE=[]
    for i in range(e):
        QE.append(())
        QSE=[]
    for i in range(se):
        QSE.append(())
    # για κάθε μετακίνηση για κάθε φορτηγό προσθέτουμε ποσότητα QE από το
σημείο φόρτωσης και
    # αφαιρούμε QSE ποσότητα ώστε στο τέλος να μην υπάρχει άλλη ποσότητα που
να απαιτείται στην αντίστοιχη
    # θέση εκκένωσης και έτσι έχουμε το αποτέλεσμα μας δηλαδή πόσες από τις
μετακινήσεις που ορίσαμε στην τυχαία λύση
    # θα χρησιμοποιηθούν
    while(True):
        try:
            for i in range(f):
                # για κάθε φορτηγό υπολογίζει τις μετακινήσεις του
                if(F[i][0][1]==0 and F[i][0][2]==0):
                    QE[F[i][0][0]].append(i)
                if(F[i][0][1]==1 and F[i][0][2]==0):
                    QSE[F[i][0][0]].append(i)

```

```

if(F[i][0][2]==F[i][0][3]):
    #αν 0 φορτώνει
if(F[i][0][1]==0):
    QSE[F[i][0][0]].pop(0)
    #αν 1 ξεφορτώνει
if(F[i][0][1]==1):
    k1=F[i][0][0]
    k2=F[i][0][4]
    #ξεφορτώνει
    SSE1[k2][k1]=SSE1[k1][k2]-1
    # στην τελική λύση προσθέτουμε το φορτηγό i να μετακινηθεί
    από το k1 φορτωτή στην k2 θέση εκκένωσης
    endsol.append([i,k1,k2])
    #παιρνουμε στο QSE για την μετακίνηση
    QSE[F[i][0][0]].pop(0)
    F[i].pop(0)
continue
F[i][0][2]=F[i][0][2]+1
tm=tm+1
# υπολογίζεται ο συνολικός όγκος φορτω-εκφορτώσεων σε τόνους
ss=0
for i in range(e):
    for j in range(se):
        ss=ss+SSE1[i][j]
        #πάνω από κάποιο χρόνο maxtime σταματά για να μην έχουμε πολύ
        μεγάλους χρόνου εκτέλεσης
        if(tm>maxtime):
            break
        #αν στην λύση δεν έχουμε άλλες φορτω-εκφορτώσεις τότε σταματά
        if(ss==0):
            break
except:
    tm=tm+1
    if(tm>maxtime):

```

**break**  
**pass**  
**return** endsol



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### 4.1 Εισαγωγή

Μετά την ανάπτυξη του προγράμματος ο επόμενος στόχος ήταν να γίνει η εφαρμογή του με βάση κάποια πραγματικά δεδομένα από μία υπαίθρια εκμετάλλευση έτσι ώστε αρχικά να φανεί η ουσιαστική του χρησιμότητα σε πραγματικές συνθήκες αλλά και να εντοπιστούν πιθανές μελλοντικές διορθώσεις που απαιτούνται.

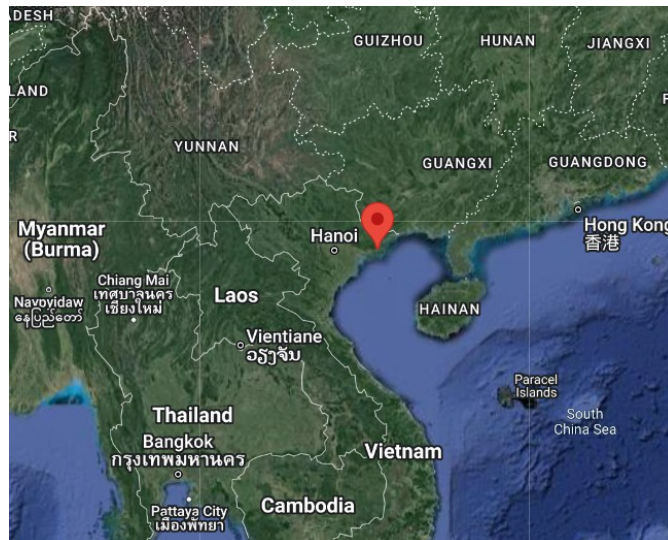
Η υπαίθρια εκμετάλλευση που επιλέχθηκε ήταν αυτή του Cao Son στο Βιετνάμ (Εικόνα 24). Το βασικό κριτήριο επιλογής αυτού του ανθρακωρυχείου ήταν ότι παρείχε δημόσια αρκετά από τα δεδομένα λειτουργίας του και έτσι ήταν εφικτό να βρεθούν τα απαραίτητα δεδομένα εισόδου ώστε να μπορεί να υλοποιηθεί το πρόγραμμα.

Τα άγωνα μεταφέρονται σε εξωτερικές αποθέσεις μέσω δύο διαδικασιών:

- 1) απευθείας στην απόθεση με φορτηγά και
- 2) με ταινιόδρομο.

Το ορυχείο τα τελευταία χρόνια έχει επιλέξει την μεγαλύτερη χρήση του ταινιοδρόμου σε σύγκριση με την χρήση φορτηγών (Πίνακας 9).

Το συγκεκριμένο ανθρακωρυχείο παρά το ότι έχει τοποθετήσει σύστημα εντοπισμού κάθε φορτηγού σε πραγματικό χρόνο, έχοντας έτσι την δυνατότητα της δυναμικής δρομολόγησης κάθε φορτηγού στην αντίστοιχη θέση επίτευξης της μέγιστης παραγωγικότητας, δεν επιλέγει αυτή την μέθοδο αφού με βάση τα κριτήρια λειτουργίας του η χρήση ιμάντα μεταφοράς σε συνδυασμό με ένα μικρότερο αριθμό φορτηγών είναι η αποτελεσματικότερη επιλογή. Η παρούσα επιλογή του ορυχείου είναι η στρατηγική της σταθερής δρομολόγησης κάθε φορτηγού στην αρχή της βάρδιας σε ένα συγκεκριμένο φορτωτή και σε μία συγκεκριμένη θέση εκκένωσης και αυτό το φορτηγό λειτουργεί με τον συγκεκριμένο φορτωτή για όλη την διάρκεια της βάρδιας.



Εικόνα 24: Τοποθεσία του ορυχείου εντός του Βιετνάμ



Εικόνα 25: Δορυφορική απεικόνιση του ορυχείου

Το ανθρακωρυχείο του Cao Son χαρακτηρίζεται από την παλαιότητα του μεταφορικού εξοπλισμού αφού πολλά από τα οχήματα προέρχονται από την Σοβιετική Ένωση ή αυτά που είναι από χώρες της Δύσης είναι μοντέλα που έχουν σταματήσει να παράγονται αρκετά χρόνια. Η παλαιότητα του εξοπλισμού έχει σαν συνέπεια πολλά από τα οχήματα να έχουν χαμηλή αξιοπιστία, αφού παρουσιάζουν συνεχώς βλάβες και η εύρεση ανταλλακτικών είναι ιδιαίτερος δύσκολη.

Είναι χαρακτηριστικό πως οι δύο βασικοί τύποι φορτωτών που χρησιμοποιεί το ορυχείο ο σοβιετικός ΕΚΓ – 4,6 ΕΚΓ – 5Α και ο σοβιετικός ΕΚΓ – 8Ι είχαν το 2018 καθαρούς χρόνους λειτουργίας 32 % και 38 % αντίστοιχα σε σύγκριση με

τον συνολικό χρόνο λειτουργίας του ορυχείου. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στον στόλο των φορτηγών, αφού από τα περίπου 150 φορτηγά που είναι θεωρητικά διαθέσιμα υπολογίζεται ότι λειτουργικά είναι περίπου τα 100 και αυτά επίσης παρουσιάζουν υψηλούς μη παραγωγικούς χρόνους λόγω βλαβών.

ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΕΙΡΩΝ ΕΚ. Κ.Μ.	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΠΟΥ ΜΕΤΑΚΙΝΗΘΗΚΕ ΜΕ ΦΟΡΤΗΓΑ ΕΚ. Κ.Μ.	ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΠΟΥ ΜΕΤΑΚΙΝΗΘΗΚΕ ΜΕ ΙΜΑΝΤΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΚ. Κ.Μ.
2014	33210	33210	-
2015	33200	33200	-
2016	25800	25800	-
2017	25700	12700	13000 (50,58 %)
2018	21700	4700	17000 (78,34 %)

Πίνακας 9: Πίνακας συνολικής ποσότητας στείρων και τρόπου μεταφοράς αυτών (Vinacomin 2018):

## 4.2 Δεδομένα εκτέλεσης πειράματος και παραδοχές

Το μοντέλο στη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία είχε σαν στόχο αρχικά να εντοπίσει αν ο τρόπος λειτουργίας του ανθρακωρυχείου κατά την διάρκεια μίας βάρδιας 8 ωρών είναι αποτελεσματικός και σε δεύτερη φάση αν πρόκυπτε το συμπέρασμα ότι δεν υπήρχε η ζητούμενη επίτευξη των παραγωγικών στόχων κατά την διάρκεια της βάρδιας, να εντοπιστούν πιθανοί τρόποι για την λύση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Το δυσκολότερο σημείο στην εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας ήταν η εύρεση και συλλογή των δεδομένων αφού η επί τόπου παρατήρηση ήταν αδύνατη και τα δημόσια διαθέσιμα δεδομένα δεν κάλυπταν το σύνολο των αναγκών αλλά μόνο τα απολύτως απαραίτητα για την εκτέλεση του προγράμματος. Η πειραματική διαδικασία για αυτό το λόγο βασίστηκε στα δεδομένα λειτουργίας του μεταλλείου για το έτος 2018 αφού μεταγενέστερα δεδομένα δεν κατέστη εφικτό να εντοπιστούν.

Με βάση την βιβλιογραφία που βρέθηκε εντοπίστηκε όπως αναφέρθηκε ότι αριθμός των φορτηγών που ήταν σε λειτουργία το 2018 στο μεταλλείο ήταν

περίπου 100 και αντίστοιχα ο αριθμός των φορτωτών που βρίσκονταν σε λειτουργική κατάσταση περίπου 10. Οι αριθμοί αυτοί αποτέλεσαν και την βάση εκτέλεσης της πειραματικής διαδικασίας. Επίσης το ορυχείο διέθετε 4 θέσεις εκφόρτωσης, δύο για τον άνθρακα και δύο για το στείρο. Η μέση απόσταση των φορτωτών από τις θέσεις εκφόρτωσης ήταν τα 4 χιλιόμετρα ενώ η παραγωγή για το 2018 ήταν 4 εκατομμύρια τόνοι.

Η πρώτη παραδοχή που έγινε λόγω μη ύπαρξης δεδομένων ήταν ότι το ορυχείο λειτουργεί 300 μέρες τον χρόνο, ενώ σε ημερήσια βάση όπως αναφέρει η εταιρία λειτουργίας έχει 3 βάρδιες για την φόρτωση και μεταφορά των στείρων και 2 βάρδιες για την φόρτωση του άνθρακα. Από τα παραπάνω δεδομένα υπολογίστηκε ότι η μέση ημερήσια απαίτηση σε χρήσιμο υλικό ήταν 13.300 τόνοι, άρα 6.650 τόνοι ανά βάρδια, και αντίστοιχα, αφού οι θέσεις εκφόρτωσης του χρήσιμου υλικού είναι δύο, απαίτηση για 3.325 τόνους άνθρακα σε κάθε θέση εκφόρτωσης ανά βάρδια. Επίσης υπολογίστηκε πως η ημερήσια μέση ποσότητα στείρων που έπρεπε να μεταφερθεί ήταν 25.700 τόνοι αφού η ετήσια παραγωγή στείρων για το 2018 ήταν 7.7 εκατομμύρια τόνοι.

Από τα παραπάνω προέκυψε ότι η απαίτηση ποσότητας στείρων που έπρεπε να φορτωθούν ανά βάρδια ήταν 8.566 τόνοι. Όμως με βάση τον Πίνακα 9 λιγότερο από το 22 % των στείρων μετακινήθηκε με την χρήση φορτηγών άρα οι απαιτήσεις σε κάθε βάρδια για μεταφορά με φορτηγά ήταν 1900 τόνοι και συνεπώς σε κάθε θέση εκφόρτωσης 950 τόνοι. Οι θέσεις εκφόρτωσης 1 και 2 ορίστηκαν ως θέσεις εκφόρτωσης του άνθρακα, ενώ οι θέσεις 3 και 4 ως θέσεις εκφόρτωσης του στείρου.

Στην συνέχεια με βάση τα δεδομένα που ήταν διαθέσιμα εντοπίστηκε η διάκριση των 100 φορτηγών σε τύπους και αυτή η αναλογία χρησιμοποιήθηκε σε όλη την έκταση της πειραματικής διαδικασίας. Από τα 100 φορτηγά μεταφοράς τα 50 ήταν ωφέλιμου φορτίου 55 τόνων (50%), τα 25 ήταν ωφέλιμου φορτίου 58 τόνων (25%), τα 10 ήταν ωφέλιμου φορτίου 32 τόνων (10%), τα 10 ήταν ωφέλιμου φορτίου 36 τόνων (10%) και τέλος τα 5 ήταν ωφέλιμου φορτίου 96 τόνων (5%). Επίσης βρέθηκε ότι η μέση χωρητικότητα των κάδων των φορτωτών ήταν τα 8 κυβικά μέτρα.

Οι χρόνοι φόρτωσης για τα φορτηγά όταν φορτώνονται από φορτωτές με κάδο 8 κυβικών μέτρων υπολογίστηκαν σε 66 δευτερόλεπτα για τα φορτηγά των 55

τόνων, σε 69,6 δευτερόλεπτα για τα φορτηγά των 58 τόνων, σε 38,4 δευτερόλεπτα για τα φορτηγά των 32 τόνων, σε 43,2 δευτερόλεπτα για τα φορτηγά των 36 τόνων και τέλος σε 115,2 δευτερόλεπτα για τα φορτηγά των 96 τόνων. Οι παραπάνω υπολογισμοί προέκυψαν με βάση την βιβλιογραφία που βρέθηκε αφού ο μέσος χρόνος φόρτωσης ενός φορτηγού 100 τόνων από έναν φορτωτή με κάδο 8 κυβικών μέτρων ήταν 2 λεπτά. Αντίστοιχα ο χρόνος εκφόρτωσης για τα φορτηγά 55 και 58 τόνων ορίστηκε σε 20 δευτερόλεπτα, ο χρόνος εκφόρτωσης των φορτηγών 32 και 36 τόνων σε 15 δευτερόλεπτα και ο χρόνος εκφόρτωσης των φορτηγών των 96 τόνων σε 40 δευτερόλεπτα (Caterpillar 2022). Τέλος ορίστηκε η μέση ταχύτητα των φορτηγών χωρίς φορτίο στα 14,5 χιλιόμετρα/ώρα ( 4,5 μέτρα/δευτερόλεπτο) και με τον συντελεστή διόρθωσης 20% που υπάρχει στο πρόγραμμα όταν τα φορτηγά είναι φορτωμένα σε 11,1 χιλιόμετρα/ώρα.

Η έλλειψη δεδομένων ουσιαστικά περιόρισε τις δυνατότητες του προγράμματος για την εύρεση αποτελεσμάτων που θα ανταποκρίνονταν στον μέγιστο βαθμό στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του ορυχείου Cao Son. Για παράδειγμα η μέση ταχύτητα υπολογίστηκε με βάση την βιβλιογραφία που βρέθηκε για άλλα μεταλλεία και συνεπώς δεν λαμβάνει υπόψη την κατάσταση και την μορφή του οδικού δικτύου του συγκεκριμένου μεταλλείου. Επίσης οι χρόνοι φόρτωσης και εκκένωσης είναι κατά προσέγγιση αφού οι ακριβείς χρόνοι είναι δυνατό να μετρηθούν μόνο με επί τόπου παρατήρηση.

### **4.3 Εκτέλεση Πειράματος**

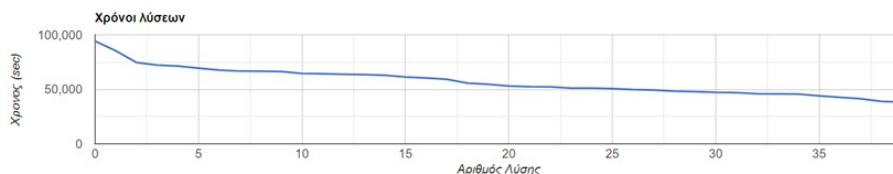
Η πρώτη φάση του πειράματος εξελίχθηκε με βάση τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και τις πραγματικές απαιτήσεις παραγωγικότητας που έχει το ορυχείο κατά τη διάρκεια μίας βάρδιας 8 ωρών. Τα βασικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση της πρώτης φάσης του πειράματος ήταν ο αριθμός των 10 φορτωτών, των 4 σημείων εκφόρτωσης και των 100 φορτηγών μεταφοράς. Ο αριθμός των 100 φορτηγών είναι ο αριθμός που είχε σε λειτουργία το 2018 το ορυχείο για αυτό και αποτέλεσε τη βάση εφαρμογής του μοντέλου. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων όπως περιεγράφηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο και την βελτιστοποίηση που εκτέλεσε ο αλγόριθμος τα αποτελέσματα ήταν τα (Εικόνα 26):

## Αποτελέσματα

### Χρόνοι λύσεων

Μέγιστη τιμή: 94266 sec Ελάχιστη τιμή: 38176 sec

### Διάγραμμα χρόνων λύσεων



Εικόνα 26: Διάγραμμα χρόνων λύσεων (Σύστημα με 100 φορηγά/φορτωτές)

Η βέλτιστη λύση που κατάφερε να εντοπίσει μετά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης ο αλγόριθμος ήταν τα 38.176 δευτερόλεπτα που αντιστοιχεί σε 636,2 λεπτά και αντίστοιχα σε 10,6 ώρες. Άρα το πρώτο και βασικότερο συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι το μεταλλείο με βάση τις παραμέτρους και τα δεδομένα που είχαν εισαχθεί δεν μπορούσε να πετύχει τους στόχους παραγωγής εντός του χρονικού διαστήματος της μίας βάρδιας που ήταν η απαίτηση.

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε ο πίνακας χρήσης των φορτωτών (Πίνακας 10). Τα νούμερα που προέκυψαν ανέδειξαν τους υψηλούς χρόνους αδράνειας των φορτωτών για το συγκεκριμένο σύστημα. Είναι δηλαδή φανερό πως το σύστημα έχει πολύ χαμηλή απόδοση. Η αιτία αυτού του φαινομένου μπορεί να είναι πως ο αριθμός των φορηγών δεν επαρκεί για να επιτευχθούν οι αναγκαίοι παραγωγικοί στόχοι κατά την διάρκεια της βάρδιας ή μπορεί να υπάρχει πλεόνασμα φορτωτών με αποτέλεσμα κάποιοι φορτωτές να παρουσιάζουν πολύ χαμηλούς χρόνους χρήσης όπως ο φορτωτής 7 με ποσοστό χρήσης μόλις 32,81 %.

Αριθμός φορτωτή	Χρήση σε δευτερόλεπτα	Ποσοστό χρήσης
0	27350	71,64
1	21780	57,05
2	18964	49,67
3	27453	71,91
4	24941	65,33
5	32809	85,94
6	37498	98,22

7	12526	32,81
8	26631	67,75
9	27342	71,62

Πίνακας 10: Πίνακας χρήσης φορτωτών σε σύστημα με 100 φορτηγά

Τα παραπάνω συμπεράσματα ήταν αρκετά ώστε να κατευθύνουν την επόμενη φάση της πειραματικής διαδικασίας ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση για το σύστημα μεταφοράς του μεταλλείου. Η πρώτη επιλογή ήταν η αύξηση του αριθμού των φορτηγών με διατήρηση των υπόλοιπων παραμέτρων ως είχαν. Αποφασίστηκε η αύξηση του αριθμού των φορτηγών έτσι ώστε να φτάσουν τα 120 τα οποία με βάση την αναλογία που αναφέρεται στο προηγούμενο υποκεφάλαιο ήταν διαχωρισμένα σε 60 φορτηγά ωφέλιμου φορτίου 55 τόνων, 30 ωφέλιμου 58 τόνων, 12 φορτηγά των 32 και 12 των 36 τόνων και τέλος 6 φορτηγά των 96 τόνων.

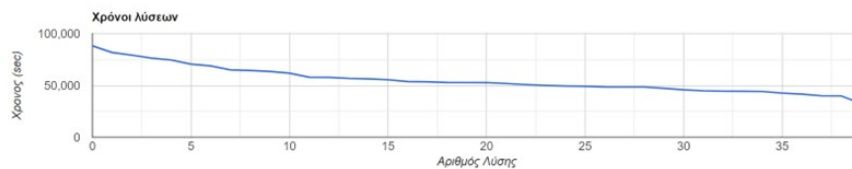
Το αποτέλεσμα που προέκυψε μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης από τον αλγόριθμο ήταν το (Εικόνα 27):

#### Αποτελέσματα

##### Χρόνοι λύσεων

Μέγιστη τιμή: 88158 sec Ελάχιστη τιμή: 32586 sec

##### Διάγραμμα χρόνων λύσεων



Εικόνα 27: Διάγραμμα Χρόνου Λύσεων (Σύστημα με 120 φορτηγά/10 φορτωτές)

Η βέλτιστη λύση με βάση το πρόγραμμα ήταν τα 32586 δευτερόλεπτα δηλαδή τα 543,1 λεπτά και αντίστοιχα οι 9,05 ώρες. Το συμπέρασμα που προέκυψε ήταν ότι η αύξηση του αριθμού των φορτηγών κατά 20 μονάδες βελτίωνε σημαντικά την παραγωγικότητα του μεταφορικού συστήματος αφού ο χρόνος περάτωσης όλων των αρχικών απαιτήσεων σε σχέση με το σύστημα των 100 φορτηγών ήταν μειωμένος κατά 1,55 ώρες ή αντίστοιχα κατά 93 λεπτά. Παρόλα αυτά το σύστημα δεν πετύχαινε του στόχους παραγωγής εντός της διάρκειας της μίας βάρδιας. Στην συνέχεια δημιουργήθηκε εκ νέου ο πίνακας χρήσης των φορτωτών (Πίνακας 11):

Αριθμός	Χρήση σε δευτερόλεπτα	Ποσοστό χρήσης
---------	-----------------------	----------------

φορτωτή		
0	31490	95,84
1	24645	75,63
2	16890	51,83
3	20497	62,90
4	21234	65,16
5	32309	99,14
6	14984	45,98
7	30764	94,40
8	30972	95,04
9	19786	60,71

*Πίνακας 11: Πίνακας χρήσης φορτωτών σε σύστημα με 120 φορτηγά κ 10 φορτωτές*

Από τον Πίνακα 11 προέκυψε πως η μέση χρήση των φορτωτών ήταν 74,66 % σε σύγκριση με το σύστημα των 100 φορτηγών που η μέση χρήση των φορτωτών ήταν 67,19 %. Προέκυψε συνεπώς το ασφαλές συμπέρασμα πως στο αρχικό σύστημα υπήρχε έλλειμα φορτηγών με αποτέλεσμα οι φορτωτές να παρουσιάζουν υψηλούς χρόνους αδράνειας, ενώ μόλις αυξήθηκε ο αριθμός των φορτηγών κατά 20 μονάδες η χρήση των φορτωτών αυξήθηκε κατά 7,47 %.

Η τρίτη φάση της πειραματικής διαδικασίας είχε σαν στόχο να μελετήσει τι θα γινόταν στην περίπτωση που ο αριθμός των φορτηγών παρέμενε στα 120 αλλά ταυτόχρονα μειωνόταν ο αριθμός των φορτωτών από 10 σε 8 με αντίστοιχη εκ νέου κατανομή των φορτίων που έπρεπε να μεταφέρει ο κάθε ένας. Η βέλτιστη λύση που κατάφερε να βρει ο αλγόριθμος ήταν η (Εικόνα 28) :

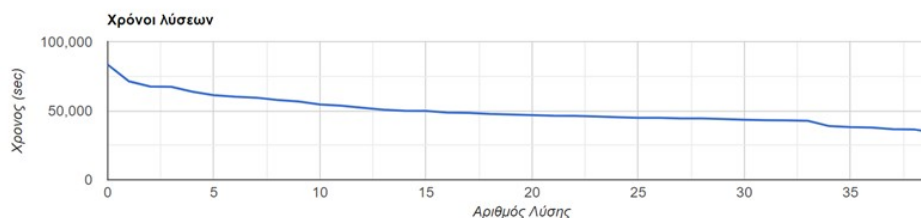


## Αποτελέσματα

### Χρόνοι λύσεων

Μέγιστη τιμή: 83339 sec Ελάχιστη τιμή: 33906 sec

### Διάγραμμα χρόνων λύσεων



Εικόνα 28: Σύστημα Χρόνου Λύσεων (Σύστημα με 120 φορηγά/8 φορτωτές)

Τα 33906 δευτερόλεπτα δηλαδή τα 565,1 λεπτά και αντίστοιχα οι 9,4 ώρες ήταν μία λύση κατά 0,35 ώρες ή κατά 22 λεπτά χειρότερη της αντίστοιχης λύσης με τον ίδιο αριθμό φορηγών αλλά με 10 φορτωτές. Το συμπέρασμα ήταν ότι η βασική παράμετρος που δημιουργούσε πρόβλημα όσον αφορά στην αποδοτικότητα του συστήματος δεν ήταν ο αριθμός των φορτωτών αλλά ο αριθμός των φορηγών.

Στην συνέχεια η εξαγωγή των αποτελεσμάτων για την χρήση των φορτωτών όπως φαίνονται στο Πίνακα 12 απέδειξε ότι πράγματι η μείωση των φορτωτών αύξησε το μέσο ποσοστό χρήσης τους στο 80,53% μία αύξηση της τάξης του 5,87% σε σχέση με το ίδιο σύστημα αλλά με 10 φορτωτές. Όμως όπως αναφέρθηκε αυτή η βελτίωση στην χρήση των φορτωτών δεν οδήγησε σε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον συνολικό χρόνο περάτωσης.

Αριθμός φορτωτή	Χρήση σε δευτερόλεπτα	Ποσοστό χρήσης
0	28187	83,13
1	32719	96,49
2	33346	98,34
3	21319	62,87
4	32957	97,20
5	32324	95,33
6	25268	74,52
7	12347	36,41

Πίνακας 12: Πίνακας χρήσης φορτωτών σε σύστημα με 120 φορηγά κ 8 φορτωτές

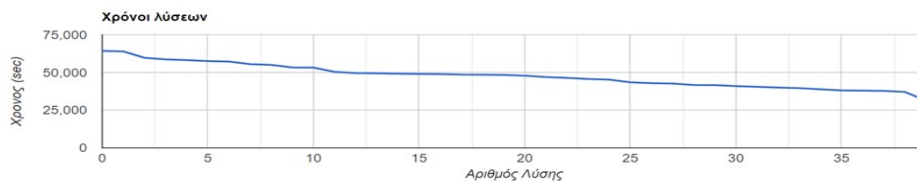
Τα παραπάνω συμπεράσματα οδήγησαν στην τελική φάση της πειραματικής διαδικασίας με την εφαρμογή ενός συστήματος με 150 φορητά όπως ιδανικά θα λειτουργούσε το μεταλλείο σύμφωνα με τον εξοπλισμό που διαθέτει και με 10 φορτωτές όσους δηλαδή έχει σε χρήση το ορυχείο. Ο βέλτιστος χρόνος που βρήκε ο αλγόριθμος ήταν ο παρακάτω :

## Αποτελέσματα

### Χρόνοι λύσεων

Μέγιστη τιμή: 64298 sec Ελάχιστη τιμή: 31339 sec

### Διάγραμμα χρόνων λύσεων



Εικόνα 29: Διάγραμμα Χρόνων Λύσεων (Σύστημα 150 φορητά/10 φορτωτές)

Τα 31339 δευτερόλεπτα ή 522 λεπτά ή αντίστοιχα οι 8,7 ώρες είναι ο βέλτιστος χρόνος που μπορούν να υλοποιηθούν όλες οι απαιτήσεις μίας βάρδιας. Σε πρώτη ανάγνωση φαίνεται ότι υπάρχει μία καθυστέρηση στόχου της τάξης των 42 λεπτών ανά βάρδια. Αυτή η καθυστέρηση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί 100 % ακριβής αφού τα πραγματικά δεδομένα και ιδιαίτερα η μέση ταχύτητα και ο χρόνος φόρτωσης και εκφόρτωσης δεν ήταν διαθέσιμα. Συνεπώς η πιθανότητα αυτή η καθυστέρηση να είναι σημαντικά μικρότερη ή και μηδενική είναι αρκετά αυξημένη. Τα σημεία που επιβεβαιώνουν ότι η λύση των 150 φορητών σε συνδυασμό με τους 10 φορτωτές είναι η πιο αποδοτική λύση με βάση τις μέγιστες δυνατότητες που έχει το ορυχείο σε σχέση με τον μεταφορικό εξοπλισμό είναι η μέση χρήση των φορητών που βρέθηκε στο 89,4 % και η μέση χρήση των φορτωτών που βρέθηκε στο 93,7 %. Οι Πίνακες 13,14 αναδεικνύουν την υψηλή παραγωγικότητα τόσο των φορτωτών όσο και των φορητών. Ο Πίνακας 13 παρουσιάζει αναλυτικά τα δεδομένα για τους φορτωτές ενώ ο Πίνακας 14 ένα ενδεικτικό τμήμα του πίνακα των χρόνων χρήσης και αδράνειας κάθε φορητού.

Αριθμός φορτωτή	Χρήση σε δευτερόλεπτα	Ποσοστό χρήσης
0	31128	99,32
1	30643	97,77

2	28732	91,68
3	29131	92,95
4	26234	83,71
5	31229	99,64
6	26811	85,55
7	30976	98,84
8	31318	99,93
9	27480	87,68

Πίνακας 13: Πίνακας χρήσης φορτωτών σε σύστημα με 150 φορτηγά

ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΟΡΤΗΓΟΥ	ΧΡΟΝΟΣ ΧΡΗΣΗΣ (s)	ΧΡΟΝΟΣ ΑΔΡΑΝΕΙΑΣ (s)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΧΡΗΣΗΣ (%)
1	12127	6432	65,26
2	21417	4211	83,56
3	28764	432	98,52
4	5689	1210	82,37
5	24567	1448	94,43
6	25879	2316	91,78
7	14445	2997	82,81

Πίνακας 14: Τμήμα Πίνακα χρήσης φορτηγών σε σύστημα με 150 φορτηγά

#### 4.4 Συμπεράσματα πειραματικής διαδικασίας

Οι πρακτικές και οικονομικές συνθήκες που ισχύουν στο ανθρακωρυχείο Cao Son έχουν αναγκάσει τους υπευθύνους να ακολουθούν ένα σύστημα σταθερής δρομολόγησης των οχημάτων. Η συγκεκριμένη απόφαση σε συνδυασμό με την παλαιότητα του μεταφορικού στόλου έχουν δημιουργήσει ένα μη αποδοτικό σύστημα μεταφοράς όπου δημιουργούνται καθυστερήσεις ενώ οι στόχοι παραγωγής δεν επιτυγχάνονται.

Είναι δεδομένο πως ακόμα και η βέλτιστη κατανομή των 100 φορτηγών που βρίσκονται σε λειτουργία όπως αυτή που εντόπισε ο αλγόριθμος δεν οδηγεί στα

επιθυμητά αποτελέσματα. Ακόμα και η θεωρητική ενεργοποίηση του συνόλου των φορτηγών (150) δεν είναι δεδομένο ότι επαρκεί. Συνεπώς είναι απαραίτητο για την αύξηση της παραγωγικότητας και την βελτίωση των αποτελεσμάτων του κύκλου μεταφοράς σε πρώτη φάση να ενεργοποιηθεί εκ νέου με την κατάλληλη συντήρηση το σύνολο του στόλου μεταφοράς. Επίσης θα πρέπει να υιοθετηθεί ένα σύστημα δυναμικής δρομολόγησης όπου θα κατευθύνει τα φορτηγά στα σημεία με την μεγαλύτερη ανάγκη.

Τέλος εξίσου σημαντική είναι και η χρήση ενός προγράμματος βελτιστοποίησης όπως αυτό που κατασκευάστηκε για την καλύτερη δυνατή οργάνωση του συστήματος και τον εντοπισμό του βέλτιστου αριθμού φορτωτών και φορτηγών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

### 5.1 Συμπέρασμα για την αποδοτικότητα των συστημάτων φόρτωσης και μεταφοράς

Η χαμηλή αποδοτικότητα των συστημάτων φόρτωσης και μεταφοράς στις υπαίθριες εκμεταλλεύσεις είναι ένα σύνηθες φαινόμενο, ιδιαίτερα σε μονάδες μικρότερου μεγέθους που στερούνται των οικονομικών δυνατοτήτων που είναι απαραίτητες για την εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης. Κάθε εφαρμογή μίας μεθόδου βελτιστοποίησης απαιτεί τη χρήση ενός σημαντικού κεφαλαίου, τόσο για την ανάπτυξη του μοντέλου όσο και για τη χρήση, αφού είναι απαραίτητο να υπάρχει συνεχής επιτήρηση του συνόλου του στόλου ώστε να συγκεντρωθούν τα απαραίτητα δεδομένα για να εισαχθούν στο πρόγραμμα. Το παραπάνω προϋποθέτει την ύπαρξη συστήματος εντοπισμού στο σύνολο του στόλου και συνεπώς την επένδυση σημαντικού ποσού.

Το φαινόμενο της χαμηλής απόδοσης όμως του συστήματος μεταφοράς εντοπίζεται και σε μεγαλύτερες εκμεταλλεύσεις όπως το ανθρακωρυχείο Cao Son που χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική εφαρμογή του προγράμματος. Στην συγκεκριμένη περίπτωση η χαμηλή απόδοση του συστήματος όπως αναφέρθηκε είναι απόρροια της κακής οργάνωσης της μονάδας και της έλλειψης επενδύσεων σε νέο εξοπλισμό με αποτέλεσμα μεγάλο μέρος του εξοπλισμού να βρίσκεται μόνιμα εκτός λειτουργίας ενώ και ο εξοπλισμός που βρίσκεται σε χρήση εμφανίζει υψηλούς χρόνους αδράνειας λόγω συνεχών βλαβών.

Το βασικότερο συμπέρασμα που προκύπτει συνεπώς για την ίδια την αποδοτικότητα του συστήματος φόρτωσης και μεταφοράς είναι ότι δεν αρκεί να υπάρχουν μέθοδοι βελτιστοποίησης για την αύξηση της απόδοσης του. Πρέπει να υπάρχει το αναγκαίο κεφάλαιο αλλά και η θέληση να επενδυθούν σημαντικά ποσά τόσο στον εκσυγχρονισμό του στόλου των οχημάτων όσο και στην εφαρμογή συστημάτων επιτήρησης.

## 5.2 Συμπέρασμα για την αποτελεσματικότητα του προγράμματος

Κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας διαπιστώθηκε ότι το πρόγραμμα πέτυχε όλους τους αντικειμενικούς στόχους λειτουργίας του. Εντόπισε τις αδυναμίες του συστήματος φόρτωσης και μεταφοράς του ανθρακωρυχείου Cao Son, βρήκε την βέλτιστη λύση ανάλογα με τα δεδομένα που εισάγονταν σε κάθε ξεχωριστή εκτέλεση του πειράματος και εντόπισε τους χρόνους χρήσης τόσο των φορτωτών όσο και των φορτηγών.

Η έλλειψη δεδομένων δεν επιτρέπει την εξαγωγή ασφαλούς συμπεράσματος για το ποσοστό ακρίβειας του προγράμματος, όμως με βάση τις αναφορές που είναι διαθέσιμες για το ανθρακωρυχείο προκύπτει ότι το περιθώριο σφάλματος του προγράμματος είναι αποδεκτό.

Προκειμένου να εξαχθούν πιο ολοκληρωμένα συμπεράσματα για τη χρήση και την αποτελεσματικότητα του προγράμματος αλλά και πιθανές βελτιώσεις του, προτείνεται για μελλοντική έρευνα:

1. Να επεκταθεί η παρούσα πειραματική διαδικασία και σε άλλες μεταλλευτικές μονάδες σε όλο το φάσμα του μεταλλευτικού κλάδου, μέσω της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων που υπάρχουν διαθέσιμα για δημόσια χρήση.
2. Να ερευνηθεί κατά πόσο η χρήση και άλλων ειδών στοχαστικού προγραμματισμού σε συνδυασμό με τους γενετικούς αλγορίθμους αντιμετωπίζει τα μειονεκτήματα που διαπιστώνονται στο παρόν πρόγραμμα και αν διαπιστωθεί ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι περισσότερο ακριβή να εφαρμοστούν οι απαραίτητες αλλαγές.
3. Να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα της εν γένει χρήσης στοχαστικού προγραμματισμού με σκοπό την εξαγωγή των κατάλληλων συμπερασμάτων για την μελλοντική εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου στο πλαίσιο της προσπάθειας βελτιστοποίησης των συστημάτων φόρτωσης και μεταφοράς.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Li & Grossmann, 2020: , (Li & Grossmann, 2020),

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο Παράρτημα παρατίθεται αναλυτικά και με τις απαραίτητες επεξηγήσεις το σύνολο του κώδικα που γράφτηκε για την ανάπτυξη του προγράμματος βελτιστοποίησης του συστήματος μεταφοράς σε υπαίθριες εκμεταλλεύσεις.

1. `from flask import Flask`
2. `from flask import render_template`
3. `from flask import url_for`
4. `from flask import request`
5. `from flask import send_file`
6. `from flask import jsonify`
7. `from flask import session`
8. `import random as rd`
9. `import copy`
10. `maxtime=30000`
11. `SESSION_TYPE = 'redis'`
12. `app = Flask(__name__)`
13. `app.secret_key = "1234"`
14. `#roots`
15. `def clearSolution(s, f,e,se,TF1,ForF1,TEF1,U1,SE1,SSE):`
16. `SSE2=[]`
17. `for x in SSE:`
18. `tmp2=[y for y in x]`
19. `SSE2.append(tmp2)`
20. `s2=[]`
21. `for k in s:`
22. `if(SSE2[k[1]][k[2]]>0):`
23. `SSE2[k[1]][k[2]]=SSE2[k[1]][k[2]]-ForF1[k[0]]`
24. `s2.append(k)`

```

25. return s2
26. def evaluate(s, f,e,se,TF1,ForF1,TEF1,U1,SE1,SSE, typeout):

27. SSE1=[]
28. for i in range(e):
29. L=[]
30. for j in range(se):
31. L.append(SSE[i][j])
32. SSE1.append(L)
33. F=[]
34. for i in range(f):
35. F.append([])
36. for k in s:
37. F[k[0]].append([k[1],0,0,TF1[k[0]],ForF1[k[0]],k[2], TF1[k[0]],0])
38. F[k[0]].append([k[2],1,0,TEF1[k[0]],ForF1[k[0]],k[1], TEF1[k[0]],0])
39. tu=int(SE1[k[1]][k[2]]/U1[k[0]]+1)
40. dist=SE1[k[1]][k[2]]
41. F[k[0]].append([-1,2,0,tu,0,0,0,dist])
42. tm=0
43. QE=[]
44. for i in range(e):
45. QE.append([])
46. QSE=[]
47. for i in range(se):
48. QSE.append([])
49. tout=0;
50. sout=0;
51. while(True):
52. try
53. for i in range(f):
54. if(F[i][0][1]==0 and F[i][0][2]==0):
55. QE[F[i][0][0]].append(i)
56. if(F[i][0][1]==1 and F[i][0][2]==0):
57. QSE[F[i][0][0]].append(i)

```



```

58. if(F[i][0][2]==F[i][0][3]):
59. if(F[i][0][1]==0):
60. QE[F[i][0][0]].pop(0)
61. tout=tout+F[i][0][6]
62. if(F[i][0][1]==1):
63. k1=F[i][0][0]
64. k2=F[i][0][4]
65. SSE1[k2][k1]=SSE1[k2][k1]-1
66. QSE[F[i][0][0]].pop(0)
67. tout=tout+F[i][0][6]
68. sout=sout+F[i][0][7]
69. if(F[i][0][0]==-1):
70. tout=tout+F[i][0][6]
71. sout=sout+F[i][0][7]
72. print("Sout=",sout)
73. F[i].pop(0)
74. continue
75. F[i][0][2]=F[i][0][2]+1
76. tm=tm+1
77. ss=0
78. for i in range(e):
79. for j in range(se):
80. ss=ss+SSE1[i][j]
81. if(tm>maxtime):
82. break
83. if(ss==0):
84. break
85. except:
86. tm=tm+1
87. if(tm>maxtime):
88. break
89. pass
90. if(typeout==0):
91. return tm

```

```

92. if(typeout==1):
93. return tout
94. if(typeout==2):
95. return sout
96. def eval2(s, f,e,se,TF1,FORF1,TEF1,U1,SE1,SSE,type):
97. t=0
98. #antigrafi tis listas s
99. s2 = [x for x in s]
100.     # gia kathe stoixeio tis s kane
101.     #kiniseis kathe fortigou
102.     F=[[ ] for i in range(f)]
103.     old=[-1 for i in range(f) ]
104.     #katastasi kathe fortoti
105.     tFortigou=[0 for i in range(f)]
106.     idleFortigou=[0 for i in range(f)]
107.     #katastasi kathe fortoti
108.     KThesiFortosis=[-1 for i in range(e)]
109.     #katastasi kathe ekfortoti
110.     KThesiEkfortosis=[-1 for i in range(e)]
111.     #gia tin seira kinisewn tw n lisewn mas
112.     #painroume analytika tis kiniseis kathe fortigou
113.     for x in s2:
114.         k=s2.pop(0)
115.         if(old[k[0]]!=-1):
116.             tu=float(SE1[k[1]][old[k[0]]]/U1[k[0]])
117.             F[k[0]].append([-1,0,tu])
118.             #exoume tis kiniseis 1 fortosi
119.             #-1 metakinisi
120.             # 2 ekfortosi
121.             F[k[0]].append([1,k[1], FORF1[k[0]]*TF1[k[0]]])
122.             tu=float(SE1[k[1]][k[2]]/U1[k[0]])
123.             F[k[0]].append([-1,0,tu])
124.             F[k[0]].append([2,k[2],FORF1[k[0]]*TEF1[k[0]], k[1]])
125.             old[k[0]]=k[2]

```

```

126.     t=0
127.     sout=0
128.     while True:
129.         s1=0
130.         t=t+1
131.         #gia kathe xroniki stigmi
132.         #elegxoume an exoume alles metakiniseis
133.         for i in range(f):
134.             s1=s1+len(F[i])
135.             if(s1==0):
136.                 break
137.         #an oxi gia kathe fortigo kanoume tis analoges kiniseis an ginontai
138.         for i in range(f):
139.             try:
140.                 f1=i
141.                 if(len(F[f1])>0):
142.                     #an exei fortosi
143.                     if(F[f1][0][0]==1):
144.                         e1=F[f1][0][1]
145.                         #elegxoume an einai eleftheros o fortotis
146.                         if(KThesiFortosis[e1]==-1):
147.                             KThesiFortosis[e1]=f1
148.                             #an einai anathetoume to fortigo
149.                             #kai mionoume ton xrono tis kinisia mexri na ginei 0
150.                             #tote apelefteronoume ton fortoti kai dioxnoume tin kinisi tou fortigou
                                apo tin lista oste na paei stin epomeni
151.                             #kinisi
152.                             if(KThesiFortosis[e1]==f1):
153.                                 F[f1][0][2]=F[f1][0][2]-1
154.                                 tFortigou[f1]=tFortigou[f1]+1
155.                                 if(F[f1][0][2]<=0):
156.                                     F[f1].pop(0)
157.                                     KThesiFortosis[e1]=-1
158.                                 else:

```

```

159.     idleFortigou[f1]=idleFortigou[f1]+1
160.     else:
161.         #an einai metakinis fortomeno mionoume ton xrono mexri na stamatisi
           i metakinisi
162.         if(F[f1][0][0]==-1):
163.             F[f1][0][2]=F[f1][0][2]-1
164.             tFortigou[f1]=tFortigou[f1]+1
165.             sout=sout+U1[f1]*0.8 #stin periptosi afti pou einai fortomeno i
           taxitita einai 20% ligoteri apo tin mesi taxitita
166.             if(F[f1][0][2]<0):
167.                 F[f1].pop(0)
168.             else:
169.                 # an exoume ekfortosi kanoume
170.                 #elegxoume an einai diathesimos o ekfortotis
171.                 if(F[f1][0][0]==2):
172.                     e1=F[f1][0][1]
173.                     if(KThesiEkfortosis[e1]==-1): #elegxoume an einai diathesimos
174.                         KThesiEkfortosis[e1]=f1
175.                     else: #allios an einai to fortigo afairoume to xrono
176.                         if(KThesiEkfortosis[e1]==f1):
177.                             F[f1][0][2]=F[f1][0][2]-1
178.                             tFortigou[f1]=tFortigou[f1]+1
179.                             if(F[f1][0][2]<=0): #an teleiossi aferoume apo tis apaitiseis to fortio
180.                                 F[f1].pop(0)
181.                                 KThesiEkfortosis[e1]=-1
182.                             else : # an einai allos metrame xrono anamonis
183.                                 if(KThesiFortosis[e1]!=f1):
184.                                     idleFortigou[f1]=idleFortigou[f1]+1
185.                                 except:
186.                                     pass
187.                                 if(type==0):
188.                                     return t
189.                                 if(type==1):
190.                                     return sout

```

```

191.     # Η συνάρτηση αυτή εξάγει μια λύση
192.     def getSol(s, f,e,se,TF1,FORF1,TEF1,U1,SE1,SSE):
193.         t=0
194.         #antigrafi tis listas s
195.         s2 = [x for x in s]
196.         # gia kathe stoixeiio tis s kanei
197.         #kiniseis kathe fortigou
198.         F=[[[] for i in range(f)]
199.         old=[-1 for i in range(f) ]
200.         #katastasi kathe fortoti
201.         tFortigou=[0 for i in range(f)]
202.         idleFortigou=[0 for i in range(f)]
203.         tFortoti=[0 for i in range(e)]
204.         teFortoti=[0 for i in range(se)]
205.         idletFortoti=[0 for i in range(e)]
206.         idleteFortoti=[0 for i in range(se)]
207.         #katastasi kathe fortoti
208.         KThesiFortosis=[-1 for i in range(e)]
209.         #katastasi kathe ekffortoti
210.         KThesiEkfortosis=[-1 for i in range(e)]
211.         #gia tin seira kinisewn tw n lisewn mas
212.         #painroume analytika tis kiniseis kathe fortigou
213.         for x in s2:
214.             k=s2.pop(0)
215.             if(old[k[0]]!=-1):
216.                 tu=float(SE1[k[1]][old[k[0]]]/U1[k[0]])
217.                 F[k[0]].append([-1,0,tu])
218.                 #exoume tis kiniseis 1 fortosi
219.                 #-1 metakinisi
220.                 # 2 ekfortosi
221.                 F[k[0]].append([1,k[1], FORF1[k[0]]*TF1[k[0]]])
222.                 tu=float(SE1[k[1]][k[2]]/U1[k[0]])
223.                 F[k[0]].append([-1,0,tu])
224.                 F[k[0]].append([2,k[2],FORF1[k[0]]*TEF1[k[0]], k[1]])

```

```

225.     old[k[0]]=k[2]
226.     t=0
227.     sout=0
228.     while True:
229.         s1=0
230.         t=t+1
231.         #gia kathe xroniki stigmati
232.         #elegxoume an exoume alles metakiniseis
233.         for i in range(f):
234.             s1=s1+len(F[i])
235.             if(s1==0):
236.                 break
237.         #an oxi gia kathe fortigo kanoume tis analoges kiniseis an ginontai
238.         for i in range(f):
239.             try:
240.                 f1=i
241.                 if(len(F[f1])>0):
242.                     #an exei fortosi
243.                     if(F[f1][0][0]==1):
244.                         e1=F[f1][0][1]
245.                         #elegxoume an einai eleftheros o fortotis
246.                         if(KThesiFortosis[e1]==-1):
247.                             KThesiFortosis[e1]=f1
248.                             #an einai anathetoume to fortigo
249.                             #kai mionoume ton xrono tis kinisia mexri na ginei 0
250.                             #tote apelefteronoume ton fortoti kai dioxnoume tin kinisi tou fortigou
                apo tin lista oste na paei stin epomeni
251.                 #kinisi
252.                 if(KThesiFortosis[e1]==f1):
253.                     F[f1][0][2]=F[f1][0][2]-1
254.                     tFortigou[f1]=tFortigou[f1]+1
255.                     tFortoti[e1]=tFortoti[e1]+1
256.                     if(F[f1][0][2]<=0):
257.                         F[f1].pop(0)

```

```

258.     KThesiFortosis[e1]=-1
259.     else:
260.     idleFortigou[f1]=idleFortigou[f1]+1
261.     idletFortoti[e1]=idletFortoti[e1]+1
262.     else:
263.     #an einai metakinis mionoume ton xrono mexri na stamatisi i
        metakinisi
264.     if(F[f1][0][0]==-1):
265.     F[f1][0][2]=F[f1][0][2]-1
266.     tFortigou[f1]=tFortigou[f1]+1
267.     sout=sout+U1[f1]
268.     if(F[f1][0][2]<0):
269.     F[f1].pop(0)
270.     else:
271.     # an exoume ekfortosi kanoume
272.     #elegxoume an einai diathesimos o ekfortotis
273.     #
274.     if(F[f1][0][0]==2):
275.     e1=F[f1][0][1]
276.     if(KThesiEkfortosis[e1]==-1): #elegxoume an einai diathesimos
277.     KThesiEkfortosis[e1]=f1
278.     else: #allios an einai to fortigo afairoume to xrono
279.     if(KThesiEkfortosis[e1]==f1):
280.     F[f1][0][2]=F[f1][0][2]-1
281.     tFortigou[f1]=tFortigou[f1]+1
282.     teFortoti[e1]=teFortoti[e1]+1
283.     if(F[f1][0][2]<=0): #an teleiossi aferoume apo tis apaitiseis to fortio
284.     F[f1].pop(0)
285.     KThesiEkfortosis[e1]=-1
286.     else : # an einai allos metrame xrono anamonis
287.     if(KThesiFortosis[e1]!=f1):
288.     idleFortigou[f1]=idleFortigou[f1]+1
289.     idleteFortoti[e1]=idleteFortoti[e1]+1
290.     except:

```

```

291.     pass
292.     return [tFortigou, idleFortigou, tFortoti, teFortoti,
            idletFortoti, idleteFortoti]
293.     #εμφάνιση της αρχικής σελίδας
294.     @app.route("/")
295.     def firstpage():
296.         return render_template('index.html')
297.     # εμφάνιση σελίδας πληροφοριών
298.     @app.route("/info")
299.     def infopage():
300.         return render_template('info.html')
301.     # φόρτωμα των αρχείων js και css για την σελίδα μας
302.     @app.route("/static/<file>")
303.     def jsfile(file):
304.         return send_file("./static/"+file)
305.     # η σελίδα που θα εκτελέσει την επεξεργασία και θα εμφανίσει τα
        αποτελέσματα
306.     @app.route("/results", methods = ['POST', 'GET'])
307.     def results():
308.         # φορτώνει τις παρακάτω μεταβλητές
309.         # αριθμός φορτηγών f αντιστοιχεί στην μεταβλητή nh
310.         f=int(request.form['f'])
311.         # αριθμός σημείων φόρτωσης (loaders) e που αντιστοιχεί στην
        μεταβλητή ns
312.         e=int(request.form['e'])
313.         # αριθμός προορισμών se - σημείων εκφόρτωσης nd
314.         se=int(request.form['se'])
315.         # χρόνος φόρτωσης κάθε φορτηγού TFi αντιστοίχιση με την
        μεταβλητή Sih
316.         TF=[]
317.         for i in range(f):
318.             TF.append(float(request.form['tf'+str(i)]))
319.         # χρόνος εκφόρτωσης κάθε φορτηγού TFi
320.         TEF=[]

```



```

321.     for i in range(f):
322.         TEF.append(float(request.form['tef'+str(i)]))
323.         # Φόρτιο κάθε φορτηγού FortFi
324.         FortF=[]
325.         for i in range(f):
326.             FortF.append(float(request.form['forf'+str(i)]))
327.             # ταχύτητα κάθε φορτηγού
328.             U=[]
329.             for i in range(f):
330.                 U.append(float(request.form['u'+str(i)]))
331.                 # απόσταση του φορτωτή i απο το σημείο εκφόρτωσης j SE
332.                 SE=[]
333.                 for i in range(e):
334.                     tmp=[]
335.                     for j in range(se):
336.                         tmp.append(float(request.form['se'+str(i)+"_"+str(j)]))
337.                     SE.append(tmp)
338.                     # ανάγκη υλικών με ποσότητα από φορτωτή i στο σημείο εκφόρτωσης
                       j SSE (αυτό εξασφαλίζει διαφορετικά υλικά από καθε φορτωτή π.χ.
                       σκουπίδια, σίδηρο, χαλκό κ.α.
339.                     SSE=[]
340.                     for i in range(e):
341.                         tmp=[]
342.                         for j in range(se):
343.                             tmp.append(float(request.form['sse'+str(i)+"_"+str(j)]))
344.                             SSE.append(tmp)
345.                             # διαδικασία παραγωγής λύσης
346.                             SOLS=[]
347.                             #παράγεται αρχικά ένας αρχικός πληθυσμός λύσεων
348.                             # για κάθε λύση δίνουμε την σειρά που τα φορτηγά θα έρθουν σε κάθε
                       φορτωτή και θα πάνε σε κάποιο εκφορτωτή
349.                             for i in range (40):
350.                                 # το σύνολο των μετακινήσεων
351.                                 L=[]

```

```

352.     #για κάθε λύση παίρνουμε
353.     #1000 διαφορετικές μετακινήσεις (κατα μέγιστο)
354.     # το k Φορτηγό να πάει στο fort φορτωτή και να καταλήξει στον efort
        σημείο εκφόρτωσης
355.     for j in range (1000):
356.         k=rd.randint(0,f-1)
357.         fort=rd.randint(0, e-1)
358.         efort=rd.randint(0,se-1)
359.         L.append([k,fort,efort])
360.     #προσθέτουμε το σύνολο των μετακινήσεων την κάθε περίπτωση και
        έχουμε το σύνολο SOLS που είναι οι πιθανές λύσεις
361.     SOLS.append(L)
362.     SOLS2=[]
363.     for s in SOLS:
364.         #γίνεται εκαθάριση των λύσεων για μη σωστές κινήσεις
365.         sx = clearSolution(s,f,e,se,FortF,TF,TEF,U,SE,SSE)
366.         SOLS2.append(sx)
367.         #γίνεται αξιολόγηση των λύσεων
368.         # για κάθε λύση δημιουργούμε ένα εν που είναι ο συνολικός χρόνος
        εκτέλεσης όλων των μετακινήσεων
369.         # μέχρι να εκπληρωθεί η απαίτηση ότι όλα τα σημεία εκφόρτωσης
        πήραν τις απαιτούμενες ποσότητες από
370.         # τα σημεία φόρτωσης
371.         E=[]
372.         for s in SOLS2:
373.             #γίνεται η αξιολόγηση δηλαδή λαμβάνουμε το πόσος είναι ο χρόνος
        μετακίνησης όλων των φορτηγών
374.             # ev=evaluate(s,f,e,se,FortF,TF,TEF,U,SE,SSE,0)
375.             ev = eval2(s,f,e,se,TF,FortF,TEF,U,SE,SSE,0)
376.             # προσθέτουμε στο σύνολο των αξιολογήσεων E τις αξιολογήσεις που
        αντιστοιχούν σε κάθε λύση του
377.             # συνόλου SOLS
378.             E.append(ev)

```

```

379.     #παίρνουμε ταξινομημένες τις λύσεις με βάση το evaluate της κάθε
        μίας
380.     NSOLS = [s1 for e1,s1 in sorted(zip(E, SOLS2))]
381.     #παίρνουμε την λύση μας
382.     EE = [e1 for e1,s1 in sorted(zip(E, SOLS2))]
383.     #με την συνάρτηση getSol παίρνουμε τα αποτελέσματα των λύσεων
        και τελικά παίρνουμε την τελική λύση
384.     tel=NSOLS[0]
385.     print(tel)
386.     tel2=getSol(tel,f,e,se,TF,FortF,TEF,U,SE,SSE)
387.     return render_template('results.html', ff=EE, ee=tel, ee2=tel2)
388.     @app.route("/results2", methods = ['POST', 'GET'])
389.     def results2():
390.         tel=[]
391.         e=5
392.         se=5
393.         SE=[]
394.         for i in range(e):
395.             tmp=[]
396.             for j in range(se):
397.                 tmp.append(rd.randint(5,10))
398.             SE.append(tmp)
399.             SSE=[]
400.             for i in range(e):
401.                 tmp=[]
402.                 for j in range(se):
403.                     tmp.append(rd.randint(50,100))
404.                 SSE.append(tmp)
405.                 for f in range(5,20):
406.                     TF=[]
407.                     for i in range(f):
408.                         TF.append(rd.randint(1,10))
409.                     TEF=[]
410.                     for i in range(f):

```

```

411.     TEF.append(rd.randint(1,10))
412.     U=[]
413.     for i in range(f):
414.         U.append(rd.randint(5,20))
415.         FortF=[]
416.         for i in range(f):
417.             FortF.append(2)
418.         SOLS=[]
419.         for i in range(40):
420.             L=[]
421.             for j in range(500):
422.                 k=rd.randint(0,f-1)
423.                 fort=rd.randint(0, e-1)
424.                 efort=rd.randint(0,se-1)
425.                 L.append([k,fort,efort])
426.                 SOLS.append(L)
427.             SOLS2=[]
428.             for s in SOLS:
429.                 #γίνεται εκκαθάριση των λύσεων για μη σωστές κινήσεις
430.                 sx = clearSolution(s,f,e,se,FortF,TF,TEF,U,SE,SSE)
431.                 SOLS2.append(sx)
432.             E=[]
433.             for s in SOLS2:
434.                 ev=eval2(s,f,e,se,TF,FortF,TEF,U,SE,SSE,0)
435.                 E.append(ev)
436.             NSOLS = [s1 for e1,s1 in sorted(zip(E, SOLS2))]
437.             EE = [e1 for e1,s1 in sorted(zip(E, SOLS2))]
438.             tel.append(EE[0])
439.             return render_template('results2.html', ff=tel)
440.         @app.route("/results3", methods = ['POST', 'GET'])
441.         df results3():
442.             tel=[]
443.             e=5
444.             se=5

```

```
445.     SE=[]
446.     for i in range(e):
447.         tmp=[]
448.         for j in range(se):
449.             tmp.append(rd.randint(5,10))
450.         SE.append(tmp)
451.     SSE=[]
452.     for i in range(e):
453.         tmp=[]
454.         for j in range(se):
455.             tmp.append(rd.randint(50,100))
456.         SSE.append(tmp)
457.     for f in range(5,20):
458.         FortF=[]
459.         for i in range(f):
460.             FortF.append(2)
461.         TF=[]
462.         for i in range(f):
463.             TF.append(100)
464.         TEF=[]
465.         for i in range(f):
466.             TEF.append(100)
467.         U=[]
468.         for i in range(f):
469.             U.append(10)
470.         SOLS=[]
471.         for i in range(40):
472.             L=[]
473.             for j in range(500):
474.                 k=rd.randint(0,f-1)
475.                 fort=rd.randint(0, e-1)
476.                 efort=rd.randint(0,se-1)
477.                 L.append([k,fort,efort])
478.             SOLS.append(L)
```

```
479.     SOLS2=[]
480.     for s in SOLS:
481.         #γίνεται εκκαθάριση των λύσεων για μη σωστές κινήσεις
482.         sx = clearSolution(s,f,e,se,FortF,TF,TEF,U,SE,SSE)
483.         SOLS2.append(sx)
484.     E=[]
485.     for s in SOLS2:
486.         ev=eval2(s,f,e,se,TF,FortF,TEF,U,SE,SSE,1)
487.         E.append(ev)
488.     NSOLS = [s1 for e1,s1 in sorted(zip(E, SOLS2))]
489.     EE = [e1 for e1,s1 in sorted(zip(E, SOLS2))]
490.     tel.append(EE[0])
491.     return render_template('results3.html', ff=tel)
492.     #api
493.     app.run(debug=True,threaded=True,port=5000)
```