

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**



**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ  
ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΑ ΖΩΝΗΣ ΓΙΑ  
ΤΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ**

Μαραγκός Πραξιτέλης

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρακάκης (Επιβλέπων)  
Καθηγητής Κώστας Καλαϊτζάκης (Συνεπιβλέπων)  
Δρ. Ελευθερία Σεργάκη (Συνεπιβλέπουσα)

Χανιά 2019



# Ευχαριστίες

Πρώτα απ' όλα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γεώργιο Σταυρακάκη, τον συνεπιβλέποντα καθηγητή κ. Κώστα Καλαϊτζάκη και τη συνεπιβλέπουσα διδάκτωρ κα. Ελευθερία Σεργάκη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Οι γνώσεις που αποκόμισα κατά την παρακολούθηση των μαθημάτων τους αποτέλεσε σημαντικό εφόδιο για την υλοποίηση της εργασίας αυτής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τη σύντροφό μου Ελένη και τους φίλους μου, ιδιαίτερα το Δημήτριο Ρεκούμη, για τη στήριξη και την απεριόριστη βοήθεια που μου προσφέρουν όλα αυτά τα χρόνια.



# Περίληψη

Οι ιμάντες μεταφοράς αποτελούν σημαντικό τμήμα της μετακίνησης αγαθών σε πολλούς τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας όσο και της καθημερινής μας ζωής. Η ευελιξία, ο απλός τρόπος λειτουργίας και οι χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις είναι μερικοί από τους παράγοντες που όχι μόνο τους καθιέρωσαν, αλλά συντελούν και στην συνεχή ανάπτυξη τους, ιδιαίτερα στον κλάδο των εξορύξεων. Λόγω του πλήθους των μεταφορέων ζώνης που χρησιμοποιούνται καθημερινά συμπεραίνουμε τη μεγάλη ζήτηση για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων που δημιουργούνται. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι για τη βελτίωση της ενεργειακής τους απόδοσης με κυριότερη αυτή της βελτιστοποίησης της λειτουργίας οδήγησης.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούμε ως πεδίο εφαρμογής το ορυχείο αργίλου Majdan III στη Δημοκρατία της Σερβίας. Παρουσιάζουμε έναν αλγόριθμο λειτουργίας, τόσο των συστημάτων μεταφοράς όσο και εκσκαφής, ώστε μειώνοντας την ταχύτητα λειτουργίας τους και αποφεύγοντας την πιθανότητα υπερφόρτωσης του δικτύου, να εξασφαλίζουμε μείωση των ενεργειακών αναγκών και τη βέλτιστη ροή. Ο αλγόριθμος βασίζεται στον υπολογισμό της βέλτιστης απόδοσης του ιμάντα στο τελικό στάδιο μεταφοράς του ορυχείου και στον υπολογισμό των τιμών των υπολοίπων ιμάντων μέσω του ελέγχου της ροής ώστε να επιτυγχάνεται μείωση της απαιτούμενης ενέργειας. Το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε για το σκοπό αυτό είναι το “Simcad” και ο έλεγχος της ταχύτητας πραγματοποιήθηκε με παθητικό τρόπο, ορίζοντας εκ των προτέρων την ταχύτητα των ιμάντων μεταφοράς για δεδομένο ρυθμό τροφοδοσίας.

**Λέξεις κλειδιά:** Ιμάντες μεταφοράς, Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης, Λειτουργία Οδήγησης, Εξόρυξη, Μείωση ταχύτητας, Βέλτιστη απόδοση, Simcad



# Abstract

Belt conveyors are an important part of goods' transportation in many areas of modern industry and our everyday life. Flexibility, simple mode of operation and low energy requirements are some of the factors that not only established but also contributed to their continuous development, especially in the mining industry. Due to the number of belt conveyors used daily, we conclude that there is a great demand to meet the energy requirements that are being created. For this reason several methods have been developed to improve their energy efficiency with the main aim of optimizing the driving performance.

In this thesis we are using as a field of research the Majdan III clay mine in the Republic of Serbia. We present an operation algorithm both of transportation and excavation, in order to reduce the operation's speed and avoid the possibility of overloading the network, to ensure a reduction in energy needs and optimal flow. The algorithm is based on the calculation of the maximum performance of the belt in the final stage of transportation and the calculation of the values of the remaining belts through flow control to achieve a reduction of the required energy. The simulation program we used for this purpose is "Simcad" and the speed control was performed in a passive way, setting the velocity of the conveyor in advance for a given for a given feed rate.

**Keywords:** Belt conveyor, Improvement in energy efficiency, Driving mode, Mining Industry, Velocity reduction, Optimal performance, Simcad



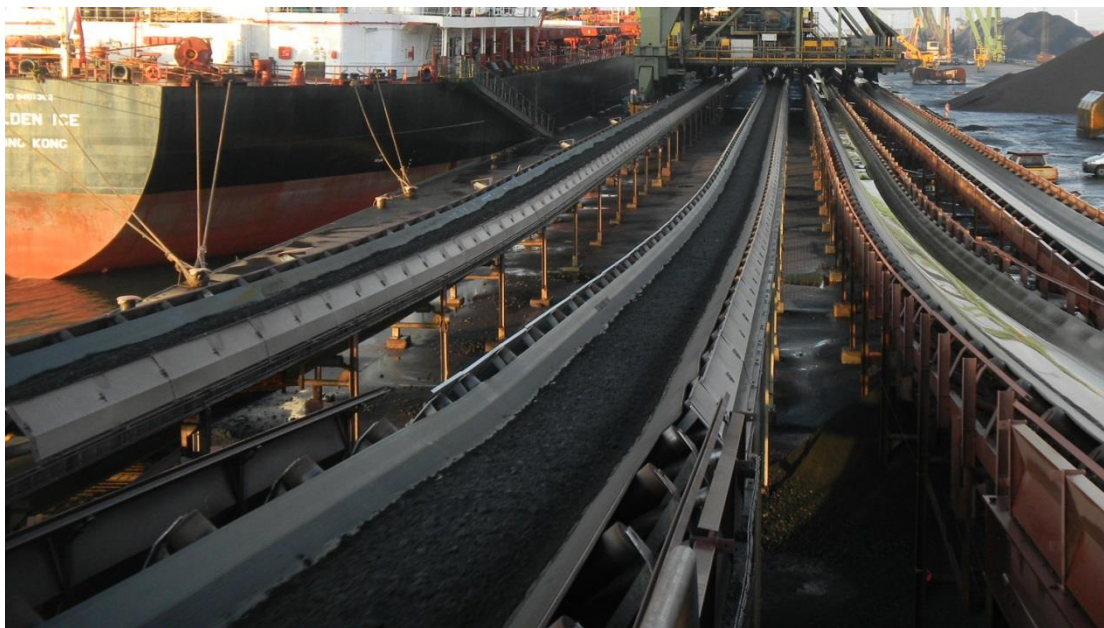


# Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή.....	11
1.1	Στόχοι Διπλωματικής.....	12
1.2	Δομή της Εργασίας.....	12
2	Γενικές πληροφορίες.....	13
2.1	Εισαγωγή.....	13
2.2	Βασική σύνθεση μεταφορέα ζώνης.....	16
2.3	Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης και έλεγχος ταχύτητας .....	18
3	Ακαδημαϊκή έρευνα και εφαρμογές.....	21
3.1	Σύγχρονη προσέγγιση .....	21
3.2	Οφέλη από την εφαρμογή του ελέγχου της ταχύτητας.....	26
4	Περιγραφή και δεδομένα του υπό μελέτη σεναρίου.....	27
4.1	Γενικές πληροφορίες του αντικειμένου της εργασίας.....	27
4.2	Πληροφορίες του υλικού εξοπλισμού.....	30
5	Προσομοίωση φυσικού συστήματος.....	33
5.1	Πληροφορίες του προγράμματος προσομοίωσης .....	33
5.2	Αλγόριθμος ελέγχου της ταχύτητας των μεταφορέων Ζώνης.....	34
5.3	Υλοποίηση στο “Simcad”.....	39
6	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	45
7	Παρατηρήσεις και μελλοντικές εργασίες.....	49
8	Βιβλιογραφία.....	51



# 1 Εισαγωγή



Εικόνα 1. Εγκατάσταση μεταφορέων ζώνης στη πύλη εμπορικού λιμανιού  
(Πηγή: [www.geldof.be](http://www.geldof.be))

Η κατανάλωση ενέργειας, ως βασικός παράγοντας βελτίωσης της ποιότητας ζωής μας, συνεχώς αυξάνεται. Στις μέρες μας η εξοικονόμησή της αποτελεί κύριο στοιχείο της ενεργειακής πολιτικής τόσο πολλών εταιρειών, όσο και κυβερνήσεων. Αναπτύσσονται συνεχώς μέθοδοι προς αυτήν την κατεύθυνση λόγω οικονομικών αλλά και οικολογικών συνθηκών. Οι μεταφορείς ζώνης λόγω του εύρους χρήσης τους και της ποικιλομορφίας τους κατέχουν ένα ιδιαίτερα σημαντικό ποσοστό στην παγκόσμια ημερήσια κατανάλωση ενέργειας. Η μελέτη τρόπων για τον περιορισμό της είναι ένα αρκετά ενδιαφέρον ζήτημα. Με το αντικείμενο αυτό καταπιάνεται η παρούσα εργασία.

## 1.1 Στόχοι Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία ως στόχο της έχει τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των μεταφορέων ζώνης μέσω της βελτιστοποίησης της λειτουργίας οδήγησης ρυθμίζοντας την ταχύτητα του μεταφορέα. Αποφασίσαμε να εφαρμόσουμε έναν αλγόριθμο ελέγχου της ταχύτητας σε ένα φυσικό σύστημα, συγκεκριμένα στο ορυχείο Majdan III στη βορειοανατολική Δημοκρατία της Σερβίας, και να προσομοιώσουμε τη λειτουργία του στο πρόγραμμα “Simcad”. Ο αλγόριθμος υπολογίζει τη ταχύτητα του μεταφορέα εξόδου του συστήματος ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη ροή του μεταφερόμενου υλικού με την χαμηλότερη δυνατή ενεργειακή κατανάλωση.

## 1.2 Δομή της Εργασίας

Αρχικά, το δεύτερο κεφάλαιο αναφέρεται στην ιστορική αναδρομή των ιμάντων μεταφοράς, στη βασική σύνθεσή τους, στις αρχές λειτουργίας τους και στα βασικά είδη τους. Παρουσιάζονται ακόμη, τρόποι επίτευξης μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης των συστημάτων αυτών.

Το τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζει τη σύγχρονη ακαδημαϊκή προσέγγιση στο θέμα της ενεργειακής αποτελεσματικότητας και τα οφέλη από την εφαρμογή της.

Στη συνέχεια, στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται ο αλγόριθμος που θα μελετήσουμε με αναφορά στα δεδομένα του φυσικού συστήματος, τις παραμέτρους και τον υλικό εξοπλισμό του.

Το πέμπτο κεφάλαιο αναφέρεται στην προσομοίωση του φυσικού συστήματος, δίνονται πληροφορίες για το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε και επιπλέον παρουσιάζεται ο αλγόριθμος μοντελοποίησης του. Τέλος, ακολουθεί η υλοποίησή του με τον υπολογισμό των παραμέτρων που απαιτούνται.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεναρίου που υλοποιήσαμε. Κλείνοντας, το έβδομο κεφάλαιο σχετίζεται με τις παρατηρήσεις και προτάσεις για μελλοντικές εργασίες που θα μπορούσαν να εκπονηθούν. Ενώ στο όγδοο παραθέεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε.

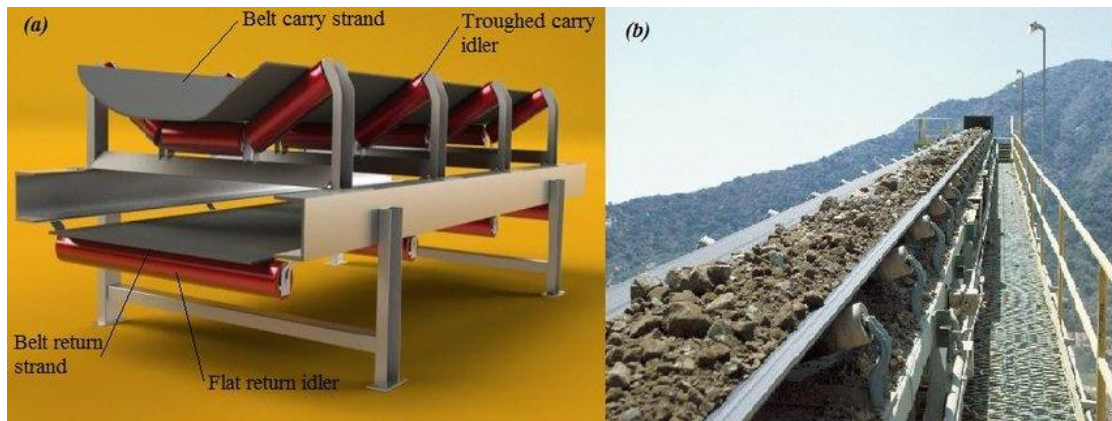
## 2 Γενικές Πληροφορίες

### 2.1 Εισαγωγή

Η διαχείριση υλικών αποτελεί ένα σημαντικό τομέα της σύγχρονης βιομηχανίας, μεταλλουργίας, εξόρυξης, κατασκευών, μεταφορών αλλά και της καθημερινής ζωής, με την κατανάλωσή του να αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό ποσοστό της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας. Η συνεχόμενη αύξηση ζήτησης προϊόντων και πρώτων υλών έχει οδηγήσει στην ανάγκη για περαιτέρω ανάπτυξη της επιστήμης αυτής και στην καθιέρωση μεθόδων προς αυτήν την κατεύθυνση. Η πιο διαδεδομένη από αυτές είναι οι ιμάντες μεταφοράς, συστήματα που επιτρέπουν τη συνεχόμενη και χωρίς διακοπές, τόσο εντός των ορίων μιας βιομηχανίας όσο και της δια ξηράς, μεταφορά υλικών. Η τεχνολογία τους βελτιώθηκε σημαντικά με το τέλος του 2<sup>ου</sup> Παγκοσμίου πολέμου, περίοδο ακμής της επιστήμης των ελαστικών, και στις μέρες μας έχουν γίνει μακρύτεροι, γρηγορότεροι με μεγαλύτερη χωρητικότητα και ταυτόχρονα μικρότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση [1]. Ο έλεγχος και η παρακολούθηση τους από υπολογιστικά συστήματα μεγιστοποίησαν την αποτελεσματικότητα και αξιοπιστία τους. Η υψηλή απόδοση σε συνδυασμό με τις μειωμένες απαιτήσεις υποδομών, τους καθιέρωσε σε σημεία κλειδιά για τη διαχείριση και μεταφορά υλικών.

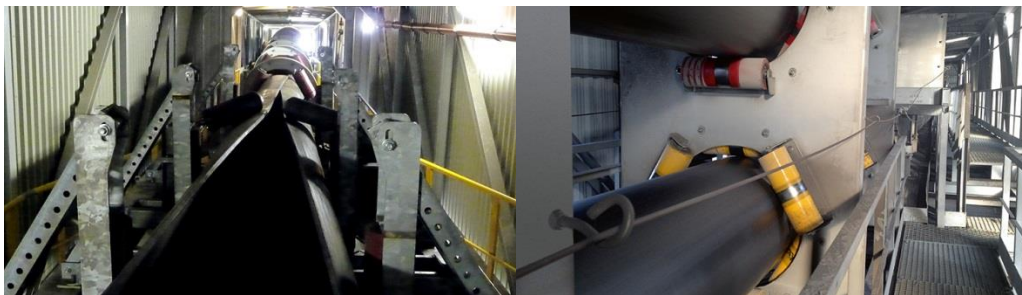
Ανάλογα με τον τομέα και τη χρήση έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι μεταφορέων ζώνης. Οι πιο συνηθισμένοι από τους οποίους είναι:

- **Troughed belt conveyor** (μεταφορέας ζώνης με τη μορφή αυλακιού)  
Αποτελούν τον πιο διαδεδομένο και αποτελεσματικό τρόπο μεταφοράς υλικών. Η ζώνη τους είναι λεία σε μορφή αυλακιού και λειτουργεί πάνω σε σετ κυλίνδρων, είτε 5 είτε 3 είτε 2 σε αριθμό. Η ταινία επιστροφής είναι επίπεδη χωρίς κλίση (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1. Troughed belt conveyor [2]

- Pipe belt conveyor** (μεταφορέας ζώνης με τη μορφή αγωγού)  
 Ο ιμάντας αυτής της κατηγορίας στο σημείο της τροφοδοσίας του είναι της μορφής αυλακιού (βλ Troughed belt conveyor) αλλά μετά παίρνει τη μορφή αγωγού, περικλείοντας το υλικό που μεταφέρει, με ειδικούς προεξέχοντες κυλίνδρους. Με το σχεδιασμό αυτό επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου κατά τη μεταφορά επικίνδυνων προς το περιβάλλον υλικών (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2. Pipe belt conveyor [3]

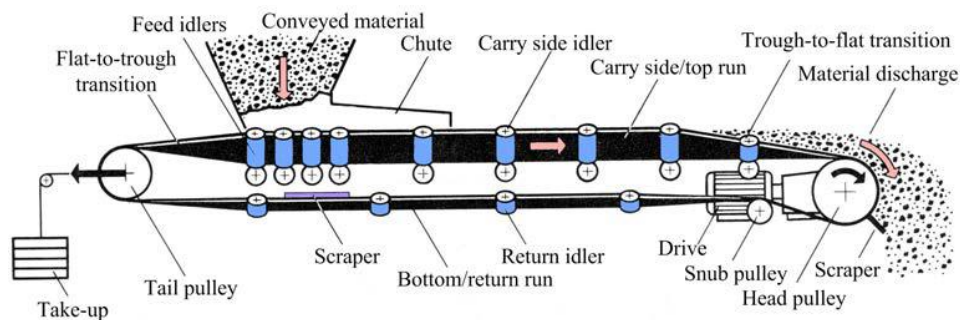
Η ευρεία χρήση των μεταφορέων ζώνης απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας, επομένως τίθεται το θέμα μείωσής της, μέσω της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσής τους. Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος έχει οδηγήσει τις αναπτυγμένες χώρες στην θέσπιση μέτρων ενεργειακής πολιτικής για την προστασία του. Το 87% της συνολικής ενέργειας παράγεται από ορυκτά καύσιμα, το 28% του οποίου από γαιάνθρακα [4]. Η αλλοίωση της ποιότητας ζωής μας, επομένως, γίνεται εμφανής και η ανάγκη για εύρεση λύσης αναγκαία. Η έρευνα προς αυτήν την κατεύθυνση μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε 5 ομάδες:

- Μέθοδοι για ενεργειακά αποδοτικά στοιχεία, όπως χαμηλής απώλειας ζώνες μεταφοράς και υψηλής απόδοσης συστήματα οδήγησης.
- Μέθοδοι βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, κυρίως της διαδρομής του ιμάντα.
- Μέθοδοι ανάκτησης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της κινητικής ενέργειας του μεταφερόμενου αντικειμένου.
- Μέθοδοι βελτιστοποίησης της λειτουργίας οδήγησης, ελέγχοντας τις ακολουθίες του κινητήρα ή ρυθμίζοντας την ταχύτητα του μεταφορέα.
- Μέθοδοι επιχειρησιακής φιλοσοφίας, όπως χρέωση χρόνου χρήσης.

Η μέθοδος ρύθμισης της ταχύτητας του μεταφορέα για τη μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης ονομάζεται έλεγχος ταχύτητας [5]. Η πιο σημαντική πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί και συνδέεται άμεσα με τον έλεγχο της ταχύτητας, είναι η λειτουργία του ιμάντα στην ονομαστική τιμή της ταχύτητάς του, χωρίς όμως να είναι πλήρως φορτωμένος. Με αυτόν τον τρόπο, ωστόσο, σπαταλούνται μεγάλα ποσοστά ενέργειας. Από την άλλη μεριά, η μείωση της τιμής της ταχύτητας θα οδηγούσε σε πλήρες φόρτωμα, χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και καλύτερη αξιοποίηση των πόρων του συστήματος. Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει να υπάρχει έλεγχος ροής του συστήματος τροφοδοσίας του μεταφορέα ζώνης, ώστε ανάλογα με το ρυθμό εισόδου σε αυτό να υπολογίζεται η ταχύτητα της ζώνης του ιμάντα και κατά συνέπεια να βελτιώνεται η πληρότητα του μεταφερόμενου φορτίου και να επιτυγχάνεται ενεργειακή εξοικονόμηση [6].

## 2.2 Βασική σύνθεση μεταφορέα ζώνης

Οι ιμάντες μεταφοράς στην πιο κοινή τους μορφή αποτελούνται από τη **ζώνη μεταφοράς**, την **τροχαλία οδήγησης**, τις **ενδιάμεσες τροχαλίες**, τους **περιστρεφόμενους κύλινδρους** κατά μήκος της διαδρομής και ένα σύστημα **απορρόφησης** όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3. Ο ρόλος καθενός από τα μέρη αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικός και συντελεί στην ομαλή λειτουργία του συστήματος. Το βασικότερο από αυτά είναι η ζώνη πάνω στην οποία πραγματοποιείται η μεταφορά των διαφόρων υλικών και για αυτό το λόγο είναι το μεγαλύτερο και πιο ακριβό εξάρτημα. Η ζώνη τυλίγεται γύρω από τα συστήματα των μεταφορέων ζώνης ώστε να σχηματίζει ένα κλειστό βρόγχο. Η τροχαλία οδήγησης είναι εκείνη που θέτει σε κίνηση την ζώνη, ρυθμίζει την ταχύτητά της και τοποθετείται στην κεφαλή του συνολικού συστήματος. Καθώς στις μέρες μας το μήκος των ιμάντων μπορεί να φτάσει αρκετά χιλιόμετρα, κρίνεται επιβεβλημένη η τοποθέτηση ενδιάμεσων τροχαλιών για τη μείωση της έντασης και την αποφυγή διακοπής της λειτουργίας τους. Στις ενδιάμεσες των τροχαλιών αποστάσεις τοποθετούνται περιστρεφόμενοι κύλινδροι για να υποστηρίξουν την κινούμενη ζώνη, τόσο κατά της διάρκειας της μεταφοράς όσο και κατά τη διάρκεια της επιστροφής της. Συνεπώς είναι το πλέον χρησιμοποιούμενο εξάρτημα. Τέλος το σύστημα απορρόφησης, είτε χειροκίνητο είτε αυτόματο, συμβάλει στη μείωση της χαλάρωσης της ζώνης, χρησιμοποιώντας την δύναμη της βαρύτητας. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.3, το σύστημα αυτό έχει τοποθετηθεί στην τροχαλία ουράς του μεταφορέα ζώνης.



Εικόνα 2.3. Τα μέρη ενός μεταφορέα ζώνης [7]



Σύμφωνα με το πρότυπο DIN 22101 [6], η διατομή του ιμάντα μεταφοράς σε μορφή αυλακιού (troughed belt conveyor) προκύπτει από τον τύπο:

$$A_{nom} = \left[ l + \frac{(b_c - l)}{2} \cos \lambda \right] \frac{(b_c - l)}{2} \sin \lambda + \left[ l + \frac{(b_c - l)}{2} \cos \lambda \right]^2 \frac{\tan \beta}{4} \quad (2.2.1)$$

όπου

- $\lambda$  η γωνία ανάμεσα στους 2 κυλίνδρους
- $\beta$  η γωνία που σχηματίζει το υλικό με το οριζόντιο επίπεδο

όπως φαίνεται και στην Εικόνα 2.4.

Η περιοχή διατομής A είναι το άθροισμα των περιοχών A1 και A2:

$$A = A1 + A2 \quad (2.2.2)$$

Το b είναι το μήκος επαφής του υλικού με τη ζώνη μεταφοράς και εξαρτάται από το πλάτος αυτής:

$$\begin{aligned} B \leq 2000mm & \quad b = 0.9B - 50mm \\ B > 2000mm & \quad b = B - 250mm \end{aligned}$$

όπου

- B το πλάτος της ζώνης μεταφοράς

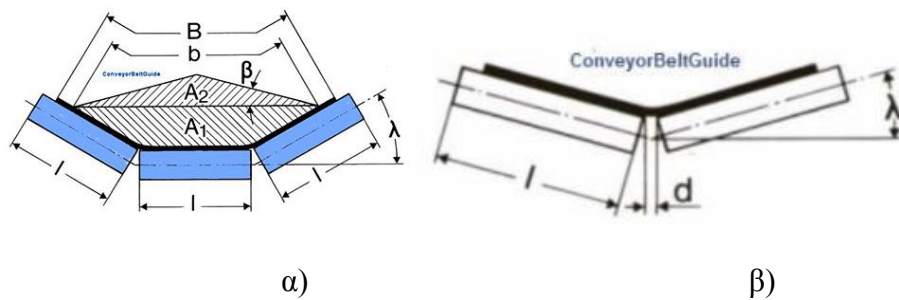
Η ονομαστική τιμή της χωρητικότητας  $Q_{nom}$  προκύπτει:

$$Q_{nom} = 3.6 A_{nom} \rho_s v_{nom} \quad (2.2.3)$$

όπου

- $\rho_s$  είναι η πυκνότητα του μεταφερόμενου υλικού
- $v_{nom}$  ονομαστική τιμή ταχύτητας του ιμάντα μεταφοράς

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 το σύστημα διαθέτει τρεις ισομήκεις κυλίνδρους στη πλευρά της μεταφοράς και στη πλευρά της επιστροφής δυο ισομήκεις κυλίνδρους σχηματίζοντας ένα “V”.



Εικόνα 2.4. Σύστημα κυλίνδρων κατά την μεταφορά α) και κατά την επιστροφή της ταινίας β) [7]

## 2.3 Μείωση ενεργειακής κατανάλωσης και έλεγχος ταχύτητας

Οι μέθοδοι μείωσης της ενεργειακής κατανάλωσης μπορούν να ενταχθούν σε 4 κύριες κατηγορίες ανάλογα με το ποιο στοιχείο του συστήματος μελετάμε. Όπως αναφέραμε και στο ενότητα 2.1:

- Μέθοδοι για ενεργειακά αποδοτικά στοιχεία, όπως χαμηλής απώλειας ζώνες μεταφοράς και υψηλής απόδοσης συστήματα οδήγησης.
- Μέθοδοι βελτιστοποίησης του σχεδιασμού, κυρίως της διαδρομής του ιμάντα.
- Μέθοδοι ανάκτησης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της κινητικής ενέργειας του μεταφερόμενου αντικειμένου.
- Μέθοδοι βελτιστοποίησης της λειτουργίας οδήγησης, ελέγχοντας τις ακολουθίες του κινητήρα ή ρυθμίζοντας την ταχύτητα του μεταφορέα.

Οι δύο πρώτες κατηγορίες είναι αποδοτικές για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μόνο στην περίπτωση της εγκατάστασης νέων μεταφορέων ζώνης, καθώς για τους ήδη εγκατεστημένους απαιτούν επιπλέον χρηματοδότηση για την αντικατάσταση των στοιχείων του συστήματος. Η τρίτη δεν είναι οικονομικά βιώσιμη καθώς κοστίζει περισσότερο από όσο παράγει. Η τέταρτη μπορεί να εφαρμοστεί σε νέους αλλά και ήδη εγκατεστημένους ιμάντες. Επομένως, η διπλωματική εργασία χρησιμοποιεί στοιχεία της μεθόδου αυτής και πιο συγκεκριμένα την ρύθμιση της ταχύτητας του μεταφορέα, καθώς είναι η πιο αποδοτική και ευρύτερα εφαρμόσιμη μέθοδος [8]. Η μεταβλητή ταχύτητα οδήγησης (VSD) του ιμάντα στη βιβλιογραφία συνδέεται άμεσα με την λειτουργία αποδοτικότητας μέσω του συντονισμού της ταχύτητας της ζώνης μεταφοράς με την ταχύτητα τροφοδοσίας του συστήματος [9]. Με τις υπάρχουσες τεχνολογίες βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης μπορεί να επιτευχθεί μείωση της παγκόσμιας

ενεργειακής ζήτησης κατά 20% και άλλο ένα 20% με την αποφυγή σπατάλης ενέργειας με διάφορες μεθόδους διατήρησής [4].

Ο έλεγχος της ταχύτητας του μεταφορέα ζώνης από την άλλη μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, είτε παθητικά είτε ενεργητικά. Στην πρώτη περίπτωση (παθητικός έλεγχος) ανάλογα με τη ροή του υλικού που θα μπορούσε να εμφανιστεί σε μελλοντικό χρόνο, επιλέγεται η κατάλληλη ταχύτητα του ιμάντα. Επομένως, η επιλογή της τιμής αυτής είναι υπεύθυνη για την εξοικονόμηση ενέργειας [5]. Στη δεύτερη περίπτωση (ενεργός έλεγχος) η ροή ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο και ανάλογα με τις διακυμάνσεις στον ρυθμό τροφοδοσίας επιλέγεται η κατάλληλη τιμή ταχύτητας. Ο ενεργός έλεγχος της ταχύτητας πραγματοποιείται είτε με διακριτό είτε με συνεχή τρόπο αλλά προτιμάται ο διακριτός για λόγους πρακτικότητας. Με τον παθητικό έλεγχο της ταχύτητας και τον ορισμό μιας τιμής εκ των προτέρων δε λαμβάνουμε υπόψη τις διακυμάνσεις που θα μπορούσαν να εμφανιστούν με αποτέλεσμα να μην έχουμε βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας. Ο ενεργός έλεγχος από την άλλη θα μπορούσε να αποφέρει μεγαλύτερη εξοικονόμηση λόγω αυτής της δυνατότητας προσαρμογής στις εκάστοτε συνθήκες, αλλά λόγω της ανάγκης για πολύ γρήγορες αυξομειώσεις στην ταχύτητα, δεν έχει υλοποιηθεί ακόμα στην πράξη [8].



### 3 Ακαδημαϊκή έρευνα και εφαρμογές

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στο επίπεδο της ακαδημαϊκής έρευνας, πάνω στη μέθοδο βελτιστοποίησης της λειτουργίας οδήγησης, ελέγχοντας τις ακολουθίες του κινητήρα ή ρυθμίζοντας την ταχύτητα του μεταφορέα, που έχουμε εισαγάγει στο κεφάλαιο 2 και στο πως έχει διαμορφωθεί εκείνη με το πέρασμα των ετών.

#### 3.1 Σύγχρονη προσέγγιση

Η έρευνα πάνω στον έλεγχο της ταχύτητας του μεταφορέα ζώνης είναι ένα σύνθετο θέμα που αναλύεται σε τρεις βασικούς πυλώνες. Ο πρώτος είναι η ανάλυση της βιωσιμότητας της μεθόδου, ο δεύτερος είναι οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επίτευξή του και τρίτος η μελέτη της αποδοτικότητας αυτής.

Σύμφωνα με το πρότυπο DIN 22101 [6] η κινητική αντίσταση  $F$  υπολογίζεται από τον τύπο:

$$F = C_f L (m'_{roll} + (2m'_{belt} + m'_{bulk}) \cos \delta) g + H m'_{bulk} g \quad (3.1.1)$$

όπου

$C$	ο συντελεστής των δευτερευουσών αντιστάσεων
$F$	ο τεχνητός συντελεστής των αντιστάσεων τριβής
$L$	το μήκος του ιμάντα μεταφοράς
$m'_{roll}$	η μάζα των περιστρεφόμενων κυλίνδρων
$m'_{belt}$	η γραμμική πυκνότητα της ζώνης μεταφοράς
$m'_{bulk}$	η γραμμική πυκνότητα του μεταφερόμενου υλικού
$\delta$	γωνία κλίσης του ιμάντα
$g$	επιτάχυνση βαρύτητας
$H$	η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στο σημείο φόρτωσης και εκφόρτωσης του ιμάντα μεταφοράς

Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος προκύπτει από τον τύπο:

$$\begin{aligned}
 P_e &= \frac{Fv}{\eta_{sys}} = \frac{1}{\eta_{sys}} [CfL(m'_{roll} + 2m'_{bell})gv + (CfLg + Hg)(m'_{bulk}v)] \\
 &= \frac{1}{\eta_{sys}} \left[ CfL(m'_{roll} + 2m'_{bell}\cos\delta)gv + (CfLg\cos\delta + Hg)\frac{Q_{act}}{3.6} \right]
 \end{aligned}
 \tag{3.1.2}$$

όπου

$v$  η ταχύτητα του ιμάντα  
 $\eta_{sys}$  η απόδοση του συστήματος οδήγησης

Θεωρώντας σταθερές τις τιμές  $f$  και  $\eta_{sys}$  για τις διάφορες θερμοκρασίες και ταχύτητες προκύπτει ότι η ενεργειακή κατανάλωση μειώνεται με τη μείωση της ταχύτητας. Επομένως, αποδεικνύεται η βιωσιμότητα της μεθόδου του ελέγχου της ταχύτητας για τη μείωση της ενεργειακής ζήτησης του συστήματός μας. Πιο συγκεκριμένα μιλώντας για ταχύτητα αναφερόμαστε στην ζώνη μεταφοράς και στους περιστρεφόμενους κυλίνδρους στήριξής της [8].

Ο πρώτος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε προς αυτήν την κατεύθυνση [10] διαμόρφωνε την ταχύτητα ανάλογα με τον αριθμό των εκσκαφών, με παθητικό τρόπο καθώς υπολογίζε εκ των προτέρων την ταχύτητα, ως εξής:

$$\text{ταχύτητα ζώνης μεταφοράς} = \begin{cases} 50\% \text{ της ονομαστικής ταχύτητας} & 1 \text{ εκσκαφέας} \\ 75\% \text{ της ονομαστικής ταχύτητας} & 2 \text{ εκσκαφείς} \\ 100\% \text{ της ονομαστικής ταχύτητας} & 3 - 4 \text{ εκσκαφείς} \end{cases}
 \tag{3.1.1}$$

Όπως έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 2.3 με τον παθητικό τρόπο εξοικονομούμε λιγότερη ενέργεια από ότι με τον ενεργό, ειδικά όταν η ροή του μεταφερόμενου υλικού παρουσιάζει συχνές διακυμάνσεις, ενώ προτιμούμε τη λειτουργία του τελευταίου με διακριτό τρόπο λόγω των προβλημάτων που δημιουργούνται από τη χρήση του συνεχούς. Στα πλαίσια αυτά αναπτύχθηκε ένας νέος αλγόριθμος από τους Pang Y και Lodewijks [11] βασισμένος στον ασαφή έλεγχο της ταχύτητας. Ορίζαν ένα πεπερασμένο αριθμό από ασαφή όρια  $b_n(n=1,2,...,n)$  στο ποσοστό της ονομαστικής τιμής της χωρητικότητας του ιμάντα μεταφοράς και αν η τιμή  $x$  ήτανε σε αυτά τα όρια κατασκεύαζαν τη συνάρτηση ως εξής:

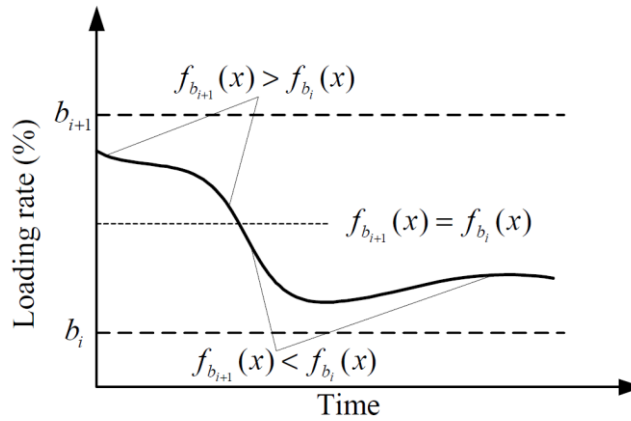
$$f_{b_{i+1}}(x) = \frac{b_{i+1} - x}{b_{i+1} - b_i} \quad (3.1.3)$$

$$f_{b_i}(x) = \frac{x - b_i}{b_{i+1} - b_i}$$

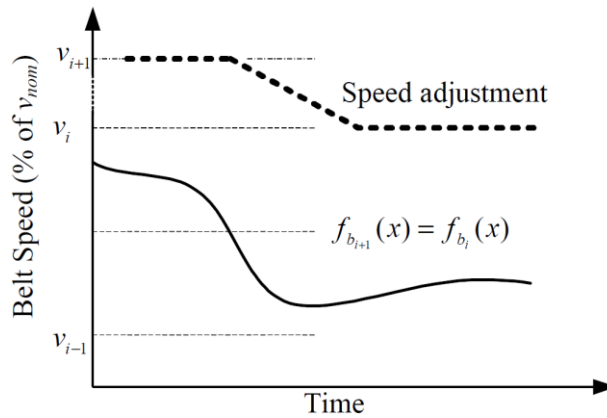
όπου

$$f_{b_i}(x) + f_{b_{i+1}}(x) = 1 \quad (3.1.4)$$

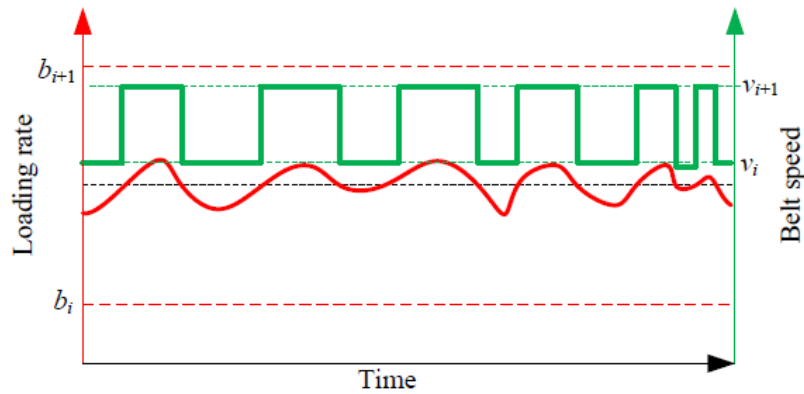
Στην Εικόνα 3.1 που ακολουθεί παρατηρούμε πως διαμορφώνεται από τη σύγκριση των τιμών των δύο συναρτήσεων ο ρυθμός τροφοδοσίας του συστήματος. Στην Εικόνα 3.2 φαίνεται το σενάριο όπου η αρχική ταχύτητα ήταν  $v_{i+1}$  και επιτεύχθηκε η μείωση της ταχύτητας όταν εξισώθηκαν οι τιμές των δύο συναρτήσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν ο ρυθμός φόρτωσης κυμαίνεται γύρω από έναν αριθμό ο αλγόριθμος αυτός δε λειτουργεί αποδοτικά όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.3 [8]. Η συνάρτηση της ταχύτητας μοιάζει να μιμείται εκείνη του ρυθμού τροφοδοσίας.



Εικόνα 3.1. Ασαφής έλεγχος ταχύτητας



Εικόνα 3.2. Ρύθμιση της ταχύτητας



Εικόνα 3.3. Μη αποδοτική ρύθμιση της ταχύτητας

Ο επόμενος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε εστιάζει στη λύση του προβλήματος χρησιμοποιώντας ενεργό έλεγχο της ταχύτητας με συνεχή τρόπο [12]. Έχει δυο εισόδους, τη ροπή του συστήματος οδήγησης ( $T_e$ ) και το σφάλμα της ταχύτητας ( $DW_{ref}$ ), και μία έξοδο ( $N(DW_{ref})$ ). Η έξοδος είναι η επιτάχυνση της ταχύτητας του ιμάντα. Η Εικόνα 3.4 δείχνει τους κανόνες που ισχύουν για τη λειτουργία του αλγορίθμου.

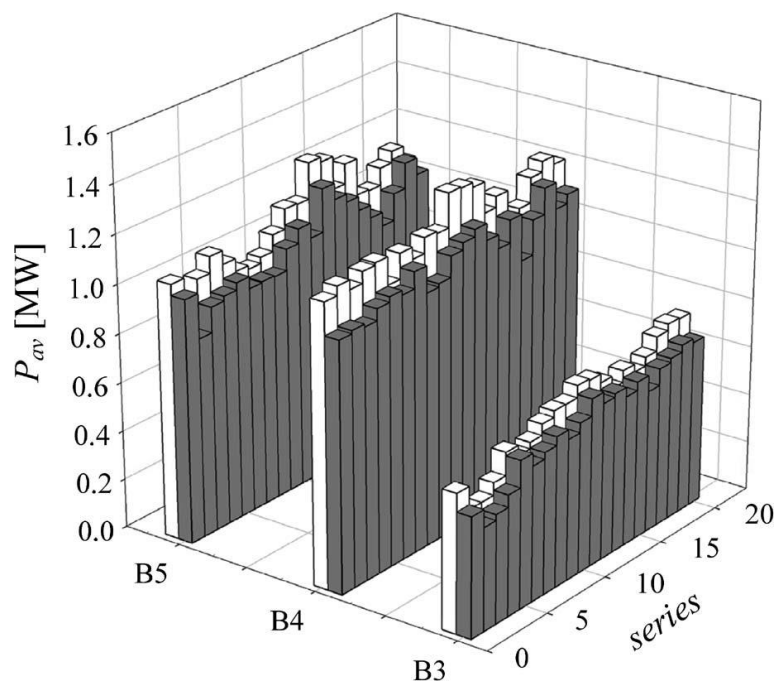
$DW_{ref} \backslash T_e$	N	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	NS	NM	NB	NB
NM	ZE	ZE	NS	NM	NB
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PM	ZE	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PB	PB	PB	PB

Εικόνα 3.4. Ασαφής κανόνες N: negative, NS: negative small, NM: negative Medium, NB: negative big, ZE: zero, PS: positive small, PM: positive medium, PB: positive big

Στα πειράματα που υλοποιήθηκαν με τη χρήση του αλγορίθμου αυτού διαπιστώθηκε ότι στις απότομες μεταβολές της ροής τροφοδοσίας δεν παρατηρήθηκαν φαινόμενα που να θέτουν σε κίνδυνο την ομαλή λειτουργία του ιμάντα, όπως απότομο φρενάρισμα ή αποκοπή της ζώνης κατά την μείωση ή αύξηση του ρυθμού τροφοδοσίας αντίστοιχα. Τέλος για τη μελέτη της αποδοτικότητας του ελέγχου ταχύτητας των μεταφορέων ζώνης έχουν διεξαχθεί πολλά πειράματα με αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης.



Αξίζει να σημειωθεί εκείνο των Ristic και Jeftenic το 2011 [13]. Η Εικόνα 3.5 δείχνει τα αποτελέσματα της σειράς πειραμάτων τους με εμφανή τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας όταν εφαρμόστηκε ο ενεργός έλεγχος ταχύτητας στα συστήματα ενός ανοιχτού ορυχείου.



Εικόνα 3.5. Μέση κατανάλωση ενέργειας του συστήματος οδήγησης στον τρίτο, τέταρτο και πέμπτο σταθμό μεταφορέων ζώνης(B3, B4, B5). Οι λευκές μπάρες για τη λειτουργία με συνεχή ταχύτητα, και οι γκρι με την εφαρμογή του αλγορίθμου ασαφούς λογικής.

### **3.2 Οφέλη από την εφαρμογή του ελέγχου της ταχύτητας**

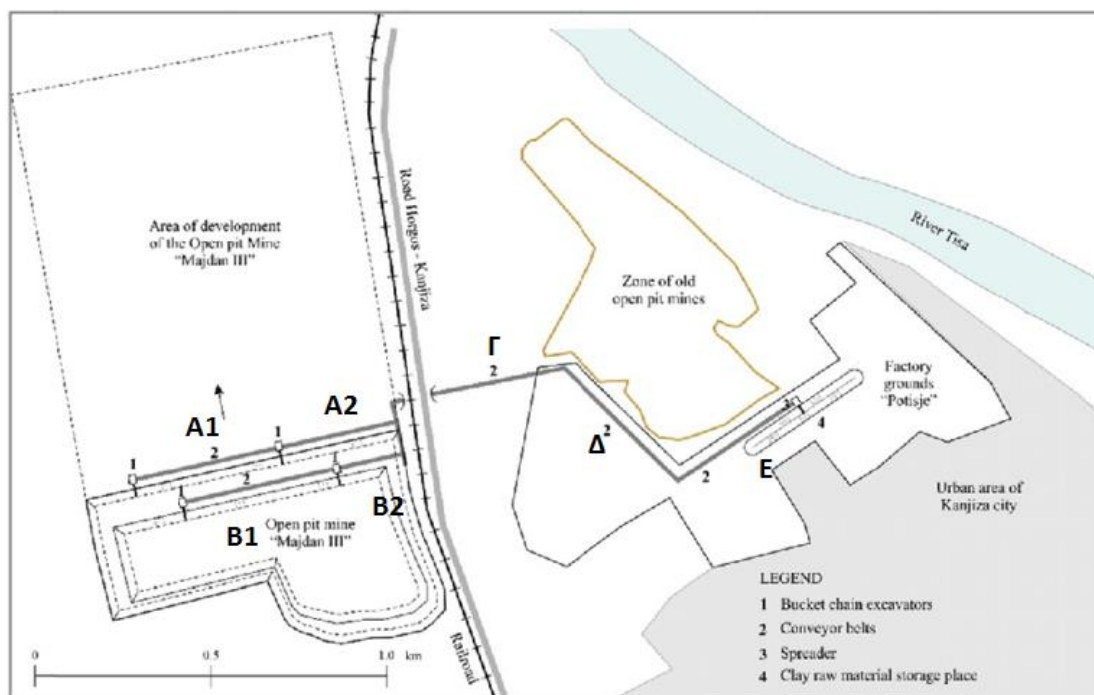
Στις μέρες μας τα συστήματα των μεταφορέων ζώνης έχουν αυξημένη χωρητικότητα, μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας, εύκολη εγκατάσταση, χαμηλή κατανάλωση και εν γένει μεγαλύτερη αξιοπιστία. Ο αυτοματισμός έχει καθιερωθεί στον τομέα τους, αλλάζοντας τα δεδομένα στο χώρο των μεταφορών. Η εφαρμογή του ελέγχου της ταχύτητας εκτός από τα ενεργειακά έχει επίσης οικονομικά καθώς και οικολογικά οφέλη. Στα οικολογικά εντάσσεται η μείωση της κατανάλωσης ορυκτών καυσίμων λόγω της μειωμένης ενεργειακής ζήτησης, καθώς και ο περιορισμός των ρυπογόνων παραγόντων που ευθύνονται για το «φαινόμενο του θερμοκηπίου». Στα οικονομικά εντάσσεται η αύξηση του «χρόνου ζωής» των συστημάτων μεταφοράς και η μείωση του κόστους συντήρησής τους σαν συνέπεια της καλύτερης, χωρίς συχνές φθορές λειτουργίας τους.

## **4 Δεδομένα και περιγραφή του υπό μελέτη σεναρίου**

### **4.1 Γενικές πληροφορίες του αντικειμένου της εργασίας**

Το σύστημα το οποίο θα μελετήσουμε αφορά το ανοιχτό ορυχείο εξόρυξης αργιλικής πρώτης ύλης, Majdan III, της εταιρείας Rotisje ευρισκόμενο στη βορειοανατολική περιοχή της Δημοκρατίας της Σερβίας [14]. Η εταιρεία συγκαταλέγεται στους κορυφαίους κατασκευαστές υλών υψηλής ποιότητας, όπως πλακάκια και τούβλα, στην περιοχή της Νοτιοανατολικής Ευρώπης. Οι εγκαταστάσεις της αποτελούνται από τρία εργοστάσια πλακιδίων, ένα παραγωγής τούβλων, ένα παραγωγής διακοσμητικών κεραμικών και από το ορυχείο Majdan III, του οποίου τη γραμμή παραγωγής θα μελετήσουμε. Με ετήσια δυναμικότητα 400.000 τόνων αργίλου παρέχει την πρώτη ύλη για την κατασκευή 140.000.000 πλακιδίων, τούβλων και κεραμικών.

Ο βασικός εξοπλισμός της συγκεκριμένης εγκατάστασης αποτελείται από τέσσερις εκσκαφείς αλυσίδας κάδων (bucket chain excavator) (Εικόνα 4.3), ένα μηχάνημα διάχυσης (spreader) και ιμάντες μεταφοράς συνολικού μήκους 3350 μέτρων περίπου (Εικόνα 4.1). Η εξόρυξη πραγματοποιείται σε 2 επίπεδα με ύψος 7 και 6 μέτρων έκαστο. Το μήκος των ιμάντων μεταφοράς στο πρώτο επίπεδο είναι περίπου 1000 μέτρα ενώ στο δεύτερο 850 μέτρα. Με τον συνυπολογισμό των 1500 μέτρων που απαιτούνται για τη μεταφορά της ύλης από το χώρο της εξόρυξης στο χώρο αποθήκευσης, καλύπτουμε το συνολικό μήκος της γραμμής των μεταφορέων ζώνης.



Εικόνα 4.1. Σχηματική παρουσίαση των εγκαταστάσεων στο ορυχείο Majdan III.

Από την Εικόνα 4.1 και με τη χρήση της αντίστοιχης κλίμακας προκύπτει το μήκος των αντίστοιχων τμημάτων που αντιπροσωπεύουν τα μήκη των ιμάντων όπως εμφανίζονται στο σχήμα. Επομένως προκύπτει ότι:

Τμήμα	Πραγματικό μήκος
A1	500 m
A2	500 m
B1	500 m
B2	350 m
Γ	500 m
Δ	500 m
Ε	500 m

Εικόνα 4.2. Πραγματικά μήκη των τμημάτων που συμβολίζουν τις εγκαταστάσεις των ιμάντων μεταφοράς.



Εικόνα 4.3. Bucket chain excavators.

## 4.2 Πληροφορίες του υλικού εξοπλισμού

Για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας επιλέχθηκε η χρήση εκσκαφέων τροχού κάδων, SchRs 4000 (bucket wheel excavator) (Εικόνα 4.4), στη θέση των αντίστοιχων εκσκαφέων αλυσίδας κάδων (bucket chain excavator). Οι λόγοι που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος τύπος μηχανήματος είναι αφενός η ύπαρξη εκτενέστερης βιβλιογραφίας αναφορικά με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, λόγω της ολοένα αυξανόμενης χρήσης του στον τομέα της εκσκαφής και αφετέρου η ύπαρξη παρόμοιων χαρακτηριστικών μεταξύ των δύο αυτών τύπων [15].



Εικόνα 4.4. Bucket wheel excavator SchRs 4000.

Οι βασικές πληροφορίες του εκσκαφέα SchRs 4000 που θα χρησιμοποιήσουμε και στην προσομοίωση του συστήματος, φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Εικόνα 4.5) [16]:

No	Χαρακτηριστικό	Σύμβολο	Τιμή και μονάδα
1.	Θεωρητική δυναμικότητα	$Q_o$	11000 m <sup>3</sup> /h
2.	Χωρητικότητα κάδου	$V_o$	4 m <sup>3</sup>
3.	Διάμετρος τροχού κάδων	$D$	16 m
4.	Αριθμός κάδων στον τροχό	$Z$	16 pcs
5.	Αριθμός αποθέσεων ανά λεπτό	$n_w$	45,8 min <sup>-1</sup>
6.	Ύψος κοπής	$H_g$	36 m
7.	Βάθος κοπής	$H_d$	-2,5 m
8.	Μήκος βραχίονα	$K$	39 m

Εικόνα 4.5. Βασικές πληροφορίες εκσκαφέα SchRs 4000

Η διασύνδεση του χώρου εξόρυξης με το χώρο αποθήκευσης της πρώτης ύλης επιτυγχάνεται με ευρείας κλίμακας συστήματα μεταφορέων ζώνης. Η ευρεία χρήση τους, σε όλους σχεδόν τους τομείς της σύγχρονης βιομηχανίας, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη πολλών διαφορετικών τύπων ανάλογα με την είδος της εφαρμογής και τις απαιτήσεις. Οι ιμάντες που κατασκευάζονται στην Πολωνία από την εταιρεία Poltegor, με 60 χρόνια στον τομέα της έρευνας και του σχεδιασμού μηχανημάτων εξόρυξης και μεταφοράς, έχουν μεγάλες δυνατότητες εφαρμογής σε πολλές χώρες μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα [17]. Τα χαρακτηριστικά των ιμάντων που θα μελετήσουμε φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί (Εικόνα 4.6) [18]. Αν και τα στοιχεία αυτά αναφέρονται σε προγενέστερη περίοδο εξακολουθούν να αποτελούν σημείο αναφοράς. Οι τιμές δυναμικότητας και ταχύτητας της ζώνης μεταφοράς κυμαίνονται σε αυτές τις τιμές ακόμα και σήμερα.

No	Χαρακτηριστικό	Τιμή και μονάδα
1.	Πλάτος ζώνης	2.500 mm
2.	Ταχύτητα ζώνης	6.3 m/s
3.	Μέγιστο μήκος μεταφορέα	6000 m
4.	Δυναμικότητα	22000 t/h

Εικόνα 4.6. Βασικές πληροφορίες ιμάντων με πλάτος ζώνης 2.500mm.

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται για την λειτουργία των ιμάντων μεταφοράς είναι ασύγχρονοι επαγωγικοί κινητήρες κλωβού κατηγορίας C σύμφωνα με τη NEMA. Χαρακτηρίζονται από υψηλή ροπή εκκίνησης, χαμηλό ρεύμα εκκίνησης, η ολίσθησή τους είναι υψηλότερη ενώ έχουν βαθμό απόδοσής μικρότερο των άλλων κατηγοριών, και οι εφαρμογές τους εστιάζονται σε συμπιεστές και μεταφορικές ταινίες που είναι και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Έχουν επίσης μεγάλο κόστος κατασκευής [19].

Στον τομέα της εξόρυξης-εκσκαφής σημαντικό ρόλο παίζει η γνώση της πυκνότητας του εκμεταλλεύσιμου υλικού. Η δυναμικότητα των συστημάτων που μελετάμε εξαρτάται άμεσα από αυτήν. Η απόδοση του εκσκαφέα αφορά όγκο ανά ώρα ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) ενώ του ιμάντα μεταφοράς αναφέρεται στη μάζα ανά ώρα που δύναται να μεταφέρει ( $\text{t/h}$ ). Τα κοιτάσματα αργίλου είναι σύνηθες να βρίσκονται κοντά σε υπόγεια ή επιφανειακά υδάτινα ρεύματα με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η πυκνότητα του υλικού. Ενδεικτικά ο νωπός άργιλος έχει πυκνότητα  $1760 \text{ kg/m}^3$  ενώ στη στεγνή του μορφή  $1600 \text{ kg/m}^3$  [19]. Για να καλύψουμε το φάσμα των συνθηκών θα ορίσουμε στην παρούσα εργασία το μέσο όρο των δύο αυτών τιμών ως πυκνότητα του υλικού με το οποίο ασχολούμαστε δηλαδή περίπου  $1680 \text{ kg/m}^3$ .



## 5 Προσομοίωση φυσικού συστήματος

Σε αυτήν τη θεματική ενότητα θα παρουσιαστεί το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του σεναρίου που μελετάμε, ο αλγόριθμος ελέγχου της ταχύτητας των μεταφορέων ζώνης ώστε να επιτυγχάνεται βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης όταν το συνολικό σύστημα λειτουργεί με τη μέγιστη δυναμικότητα του καθώς και η υλοποίησή του στο λογισμικό που περιγράψαμε.

### 5.1 Πληροφορίες του προγράμματος προσομοίωσης

Το πρόγραμμα με το οποίο υλοποιήσαμε την προσομοίωση του συστήματος είναι το “Simcad Pro”. Επιλέξαμε το εν λόγω λογισμικό διότι παρέχει όλη τη λειτουργικότητα που απαιτείται στη μελέτη του αντικειμένου της διπλωματικής εργασίας, αλλά και λόγω της αδυναμίας απόκτησης άδειας χρήσης του εργαλείου “Simulink” της “Matlab”, που προσφέρεται από το μηχανογραφικό κέντρο του Πολυτεχνείου. Το πρόγραμμα που επιλέχθηκε προσφέρει ένα διαδραστικό περιβάλλον προσομοίωσης για τη βελτίωση, βελτιστοποίηση και οπτικοποίηση των διαδικασιών των συστημάτων ροής. Έχει πολλές εφαρμογές σε τομείς όπως αυτούς των κατασκευών, αυτοματισμών, διανομών, τροφίμων, ποτών και υπηρεσιών. Στο χώρο των μεταφορέων ζώνης δίνει πολλές δυνατότητες καθώς διαθέτει το αντίστοιχο σχεδιαστικό εργαλείο και προσομοιωτή συμπεριφοράς για ρεαλιστικότερη προσέγγιση. Στα πλεονεκτήματά του ανήκουν και τα εξής:

- a) Προσθήκη, τροποποίηση και κατάργηση των περιορισμών και των ορισμών.
  - b) Τροποποίηση των ροών, των ταχυτήτων και των ικανοτήτων του μοντέλου.
  - c) Προσθήκη και τροποποίηση διεργασιών και συνδέσεων μεταξύ των διεργασιών.
  - d) Προσθήκη και τροποποίηση των προσαρμοσμένων πινάκων εργαλείων
- Ανάλυση της ροής του μοντέλου με παρακολούθηση των πόρων, των διεργασιών και των αντικειμένων.

## 5.2 Αλγόριθμος ελέγχου της ταχύτητας των μεταφορέων ζώνης

Ο αλγόριθμος αφορά τη ρύθμιση της ταχύτητας των μεταφορικών στοιχείων του συνόλου των εγκαταστάσεων του ορυχείου Majdan III όσο και των στοιχείων τροφοδοσίας τους, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυναμικότητα χωρίς σπατάλη ενεργειακών πόρων. Η επιλογή της κατάλληλης ταχύτητας στους επιμέρους κόμβους γίνεται με παθητικό τρόπο, όπως έχουμε αναφέρει στην ενότητα 2.3, δηλαδή ανάλογα με το ροή εισόδου στο σύστημα ορίζουμε εκ των προτέρων την ταχύτητα που θα έχουν τα υποσυστήματα μεταφοράς. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η εύρεση της κατάλληλης ταχύτητας σε κάθε κόμβο, μέσω της μέγιστης χωρητικότητας-δυναμικότητας των ιμάντων, των εκσκαφών και της ανάγκης για αποφυγή της υπερφόρτωσης αυτών. Όπως προκύπτει από τη Σχέση 5.2.1 υπάρχει γραμμική σχέση της χωρητικότητας του ιμάντα με την ταχύτητά του [20].

Η χωρητικότητα του μεταφορέα υπολογίζεται από την ταχύτητα της ζώνης μεταφοράς, το πλάτος και τη γωνία κλίσης αυτής και εκφράζεται ως:

$$Q = \rho A v \quad (5.2.1)$$

όπου

- Q χωρητικότητα ιμάντα ( kg/s, lb/s)
- $\rho$  πυκνότητα του μεταφερόμενου υλικού (kg/m<sup>3</sup>, lb/ft<sup>3</sup>)
- A διατομή της περιοχής επαφής του υλικού με τον ιμάντα (m<sup>2</sup>, ft<sup>2</sup>)
- v ταχύτητα ζώνης ιμάντα (m/s, ft/s)

Η διατομή της περιοχής επαφής του υλικού με τον ιμάντα εκφράζεται ως:

$$A = U b^2 \quad (5.2.2)$$

όπου

- U συντελεστής περιγραφής της περιοχής διατομής
- b περίμετρος επαφής ανάμεσα στο υλικό και στον ιμάντα

Επιπλέον στη Σχέση 5.2.1 οι μεταβλητές  $\rho$  και  $A$  μπορούν να θεωρηθούν σταθερές καθώς το υλικό της εξόρυξης είναι αποκλειστικά ο άργιλος. Επομένως, η τιμή της πυκνότητας ( $\rho$ ) είναι καθορισμένη όπως και η διατομή της περιοχής επαφής υλικού και ιμάντα ( $A$ ), καθώς η χωρητικότητα κάδου του εκσκαφέα δεν μεταβάλλεται, άρα ο όγκος του υλικού πάνω στη ζώνη μεταφοράς παραμένει σταθερός. Η μόνη μεταβλητή είναι η ταχύτητα του ιμάντα άρα οποιαδήποτε μεταβολή σε αυτήν επηρεάζει ανάλογα τη χωρητικότητα και αντίστροφα.

Από τον πίνακα της Εικόνας 4.5 προκύπτει ότι η ταχύτητα τροφοδοσίας του εκσκαφέα μετριέται σε κάδους ανά λεπτό, άρα μια μείωση στο μισό του αριθμού των αποθέσεων οδηγεί σε υποδιπλασιασμό της δυναμικότητας του εκσκαφέα. Συμπεραίνουμε μιας και ο τύπος των συστημάτων εκσκαφής και μεταφοράς είναι παντού ο ίδιος πως τα δεδομένα αυτά είναι καθολικά για κάθε υποσύστημα της εγκατάστασης που μελετάμε.

Η δυναμικότητα του εκσκαφέα μπορεί να μετατραπεί σε t/h ως εξής:

Δυναμικότητα (t/h) = Δυναμικότητα (m<sup>3</sup>/h) \* πυκνότητα αργίλου άρα

$$\text{Δυναμικότητα (t/h)} = 11000 \text{ m}^3/\text{h} * 1680 \text{ kg/m}^3 = 18480 \text{ t/h}$$

Επομένως, αν η χωρητικότητα του εκσκαφέα είναι 18480 t/h ο ιμάντας μεταφοράς στη μέγιστη δυναμικότητά του αρκεί για να καλύψει την ανάγκη που δημιουργείται. Επειδή όμως, σχεδιάζουμε με κριτήριο τη βέλτιστη ενεργειακή απόδοση, η μείωση της δυναμικότητας του ιμάντα από 22000 t/h σε 20000 t/h (για λόγους ασφαλείας) όχι μόνο δε θα δημιουργούσε υπερφόρτωση στο δίκτυο, αλλά θα μείωνε την ταχύτητα της ζώνης μεταφοράς και κατά συνέπεια το ποσό ενέργειας που απαιτείται. Η νέα ταχύτητα που προκύπτει για μέγιστη δυναμικότητα 20000 t/h είναι 5.73 m/s, μέσω της Σχέσης 5.2.1. Προκύπτει επομένως μια μείωση της τάξης του 10% τόσο στην δυναμικότητα του ιμάντα όσο και στην ταχύτητα αυτού.

Παρατηρώντας την τοπολογία των εγκαταστάσεων του ορυχείου (Εικόνα 4.1) συνάγεται το συμπέρασμα ότι για να έχει το σύστημα τη μέγιστη απόδοση ο μεταφορέας ζώνης, που αναπαριστά το ευθύγραμμο τμήμα Ε του σχήματος, πρέπει να έχει τη μέγιστη δυναμικότητα. Άρα και οι μεταφορείς στις θέσεις Δ και Γ θα πληρούν την ίδια προϋπόθεση. Στη θέση όμως τροφοδοσίας του ιμάντα του ευθύγραμμου τμήματος Γ παρατηρούμε την ύπαρξη διακλάδωσης καθώς τροφοδοτείται από δύο μεταφορικά συστήματα. Εφόσον τα συστήματα κάθε κλάδου τόσο στο Α1-Α2 όσο και στο Β1-Β2 είναι ίδιου τύπου συμπεραίνουμε ότι η δυναμικότητά τους θα είναι η μισή ώστε σαν άθροισμα να παρέχουν τη μέγιστη χωρητικότητα του τύπου μεταφορέα που χρησιμοποιούμε. Με βάση τα όσα αναφέραμε για τη γραμμικότητα ταχύτητας και χωρητικότητας όπως και για την υπερκάλυψη των αναγκών μεταφοράς, προκύπτει ότι και η ταχύτητά τους θα πρέπει να είναι η μισή από αυτήν στους τελικούς κόμβους. Άρα, η ταχύτητα στον κλάδο Γ-Δ-Ε θα είναι αυτή του πίνακα της Εικόνας 4.6 και θα ισούται με 5.73 m/s ενώ στους Α1-Α2 και Β1-Β2 θα είναι 2.87 m/s. Η αντίστοιχη δυναμικότητα προκύπτει 20000 t/h και 10000 t/h αντίστοιχα.

Η δυναμικότητα των εκσκαφών εφόσον λειτουργούν με την ίδια ταχύτητα θα πρέπει να είναι το άθροισμα δύο εξ αυτών για κάθε κλάδο του σχήματος. Για να καλύπτουν επομένως την τιμή 10000 t/h ανά κλάδο ο κάθε ένας θα πρέπει να έχει δυναμικότητα περίπου 5000 t/h. Οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η ταχύτητά τους αν η μέγιστη είναι 45,8 αποθέσεις ανά λεπτό, και ισοδυναμεί με 18480 t/h, θα πέσει στις 12.39 αποθέσεις ανά λεπτό. Είναι απόλυτα λογικό αν αναλογιστούμε ότι τέσσερις εκσκαφείς συνδυάζονται ανά δύο σε κάθε κλάδο.

Η νέα ταχύτητα των ιμάντων στους κλάδους Α1-Α2 και Β1-Β2 είναι 2.865 m/s με χωρητικότητα 10000 t/h ενώ στον κλάδο Γ-Δ-Ε είναι 5.73 m/s και 20000 t/h αντίστοιχα. Η νέα δυναμικότητα των εκσκαφών ορίζεται σε 5000 t/h με ταχύτητα 12.39 αποθέσεις ανά λεπτό.

Στην περίπτωση που δεχόμασταν τη λειτουργία του ιμάντα με δυναμικότητα 22000 t/h και ταχύτητα 6.3 m/s στους υποκλάδους οι αντίστοιχες τιμές θα ήταν 11000 t/h και 3.15 m/s αντίστοιχα. Θα έπρεπε τότε να ρυθμιστεί η δυναμικότητα του κάθε εκσκαφέα στην τιμή 5500 t/h, το μισό δηλαδή του 11000 t/h. Τότε η ταχύτητα του θα βρισκόταν ως εξής:

$$\text{Δυναμικότητα SchRs 4000 ανά λεπτό} = \frac{\text{Δυναμικότητα SchRs 4000 ανά ώρα}}{60}$$

$$= \frac{5500}{60} = 91.7 \text{ t/min}$$

$$\text{Χωρητικότητα κάδου} = 1680 \text{ kg/m}^3 * 4 \text{ m}^3 = 6.72 \text{ t}$$

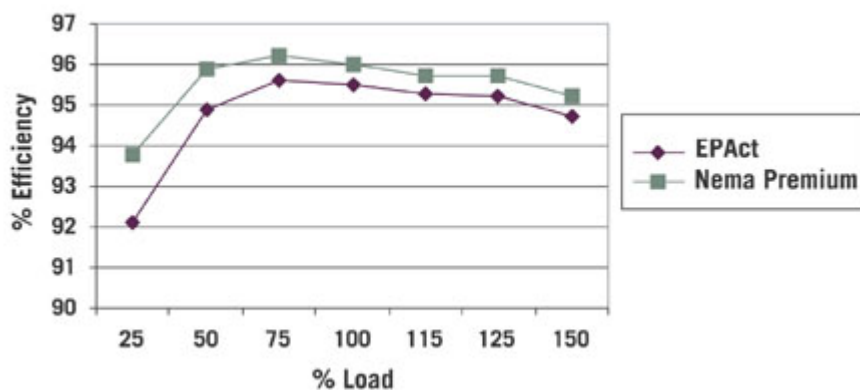
$$\text{Αριθμός κάδων ανά λεπτό} = \frac{\text{Δυναμικότητα SchRs 4000 ανά λεπτό}}{\text{Χωρητικότητα κάδου}} = \frac{91.7}{6.72}$$

$$= 13.6 \text{ αποθέσεις ανά λεπτό}$$

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 5.1.1 η απόδοση του κινητήρα αυξάνεται για τιμές κοντά στο 75% και αποκτά τη μέγιστη τιμή της για το ποσοστό αυτό της ονομαστικής τιμής του φορτίου. Στην περίπτωση που μελετάμε η μείωση της ταχύτητας της ζώνης μεταφοράς κατά 10% οδηγεί σε μείωση της τιμής του φορτίου του κινητήρα με αποτέλεσμα το ποσοστό φορτίου σε αυτόν να πλησιάζει το 75% στο οποίο παρατηρείται και η μέγιστη τιμή απόδοσης(96.4%). Επομένως η μείωση της ταχύτητας με τον παθητικό τρόπο που εφαρμόσαμε στο συγκεκριμένο αλγόριθμο οδήγησε σε εύρεση της βέλτιστης ροής του μεταφερόμενου υλικού στους ιμάντες μεταφοράς καθώς επίσης και στην βελτίωση της απόδοσης των κινητήρων των ιμάντων. Η βελτίωση αυτή προκύπτει από τη διαφορά τιμών για φορτίο 100% (95.9%) και 90%(96.5%) που ισούται με 0.5%. Οποιαδήποτε άλλη ταχύτητα της ζώνης μεταφοράς θα οδηγούσε είτε σε χαμηλότερο ρυθμό ροής είτε σε μικρότερη απόδοση.

Η μείωση της κατανάλωσης ανέρχεται σε  $0.5\% * 500\text{kwh} = 2.5\text{kwh}$  για τον τύπο κινητήρα “5AKZa6 400M2-4” που χρησιμοποιείται για την κίνηση της ζώνης του μεταφορέα του οποίου η ονομαστική ισχύς είναι 500 kw [22]. Εφόσον χρησιμοποιούνται τρεις τέτοιοι κινητήρες στα τελευταία στάδια του συστήματος μεταφοράς  $3 * 2.5\text{kwh} = 7.5\text{kwh}$ .

Η μεταβολή της απόδοσης των υπολοίπων κινητήρων, στο αρχικό στάδιο της μεταφοράς, είναι αμελητέα καθώς και πριν τη βελτιστοποίηση και μετά το φόρτωμά τους ήταν περίπου στο 50%.

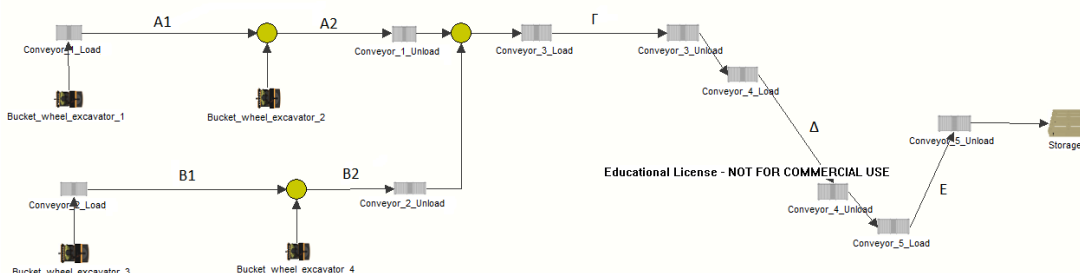


Εικόνα 5.1.1. Απόδοση κινητήρα σε συνάρτηση με το ποσοστό φορτίου σε αυτόν σύμφωνα με τη NEMA. [23]

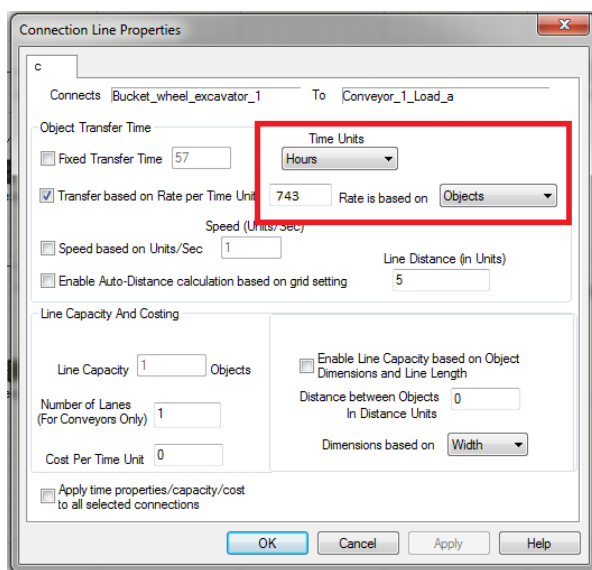
Παρατηρούμε ότι στην πρώτη περίπτωση εμφανίζεται μειωμένη η απόδοση των εκσκαφών αλλά βελτιωμένη η απόδοση των ιμάντων μεταφοράς ενώ στη δεύτερη ισχύει το αντίθετο. Η διαφορά, ωστόσο, στον τομέα της ενέργειας είναι αισθητή, καθώς με το πρώτο σενάριο εξοικονομείται ενέργεια σε όλο το φάσμα της εγκατάστασης λόγω της μειωμένης ταχύτητας τόσο των ιμάντων μεταφοράς (90% της ονομαστικής τιμής της) όσο και των εκσκαφών, ενώ στο δεύτερο αν και αυξάνεται η απόδοση κατά 4 αποθέσεις το λεπτό επειδή λειτουργούν 4 εκσκαφείς, η ενεργειακή δαπάνη είναι σε όλα τα υποσυστήματα μεγαλύτερη.

### 5.3 Υλοποίηση στο “Simcad”

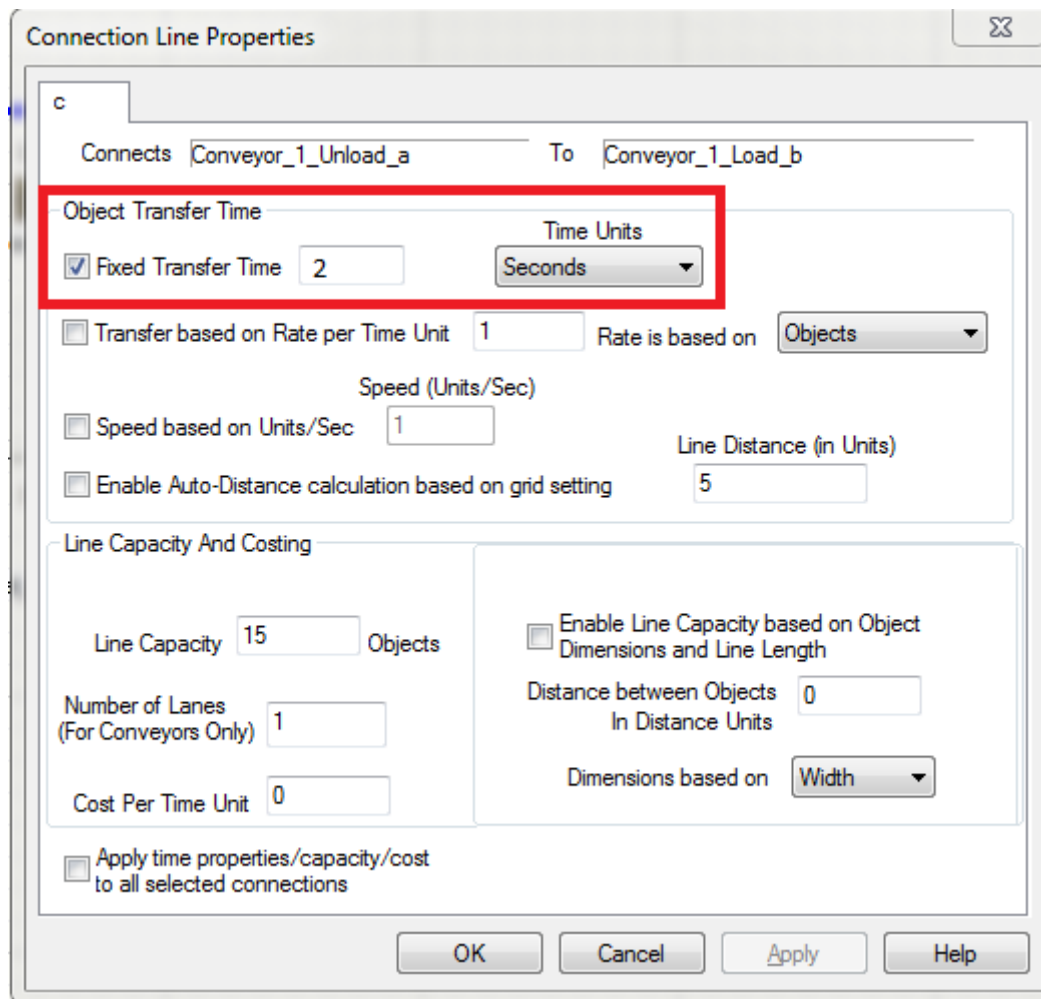
Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5.1 δημιουργήσαμε τέσσερις διαδικασίες τροφοδοσίας με ονόματα: Bucket\_wheel\_excavator\_1, Bucket\_wheel\_excavator\_2, Bucket\_wheel\_excavator\_3, Bucket\_wheel\_excavator\_4 που αντιπροσωπεύουν τους τέσσερις εκσκαφείς και ρυθμό δημιουργίας αντικειμένων 743.4 ανά ώρα όσο και η ταχύτητα του εκσκαφέα (12.39 ανά λεπτό) (βλ Εικόνα 5.2). Η απόσταση από το σημείο που ο κάδος έρχεται σε επαφή με το υλικό μέχρι το σημείο απόθεσης θεωρείται αμελητέα καθώς μας ενδιαφέρει ο ρυθμός με τον οποίο πραγματοποιείται η διαδικασία της τροφοδοσίας. Ο χρόνος μεταφοράς από το Unload ενός κόμβου μέχρι το Load του επόμενου, που αντιπροσωπεύουν τη φόρτωση και εκφόρτωση του ιμάντα, ορίστηκε στην τιμή των 2 δευτερολέπτων, λόγω της μικρής της διάρκειας (Εικόνα 5.3). Ο κόμβος “Storage” αντιπροσωπεύει το σημείο εκκίνησης της διαδικασίας αποθήκευσης της πρώτης ύλης στον αντίστοιχο χώρο της εγκατάστασης.



Εικόνα 5.1. Απεικόνιση του ορυχείου στο “Simcad”.



Εικόνα 5.2. Ρυθμός τροφοδοσίας των ιμάντων μεταφοράς



Εικόνα 5.3. Χρόνος μετάβασης στους κόμβους σύνδεσης των ιμάντων

Οι υπόλοιπες οντότητες της Εικόνας 5.1 συμβολίζουν τους ιμάντες μεταφοράς που διακρίνονται σε Load και Unload ανάλογα με το αν είναι το σημείο φόρτωσης του ιμάντα ή το σημείο εκφόρτωσης αντίστοιχα.



Τα ευθύγραμμα τμήματα που ενώνουν τους κόμβους μεταξύ τους και συμβολίζουν τα μήκη των μεταφορέων ζώνης σύμφωνα με την Εικόνα 4.2 και Εικόνα 5.1 προκύπτουν ως εξής:

Τμήμα	Πραγματικό μήκος
A1	500 m
A2	500 m
B1	500 m
B2	350 m
Γ	500 m
Δ	500 m
Ε	500 m

Εικόνα 5.3. Μήκη ιμάντων μεταφοράς

Για τον υπολογισμό των χρόνων μεταφοράς των μεταφορέων ζώνης απαραίτητη προϋπόθεση είναι η γνώση τόσο της ταχύτητας όσο και του μήκους αυτών.

$$\text{Χρόνος μεταφοράς} = \frac{\text{Μήκος Ιμάντα}}{\text{Ταχύτητα ζώνης}} \quad (5.3.1)$$

Όπως έχει ήδη υπολογιστεί, η ταχύτητα προκύπτει:

Κλάδος	Ταχύτητα	Δυναμικότητα
A1, A2, B1, B2	2.865 m/s	10000 t/h
Γ, Δ, Ε	5.73 m/s	20000 t/h

Εικόνα 5.4. Ταχύτητες και δυναμικότητες ιμάντων μεταφοράς.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα, εκείνον της Εικόνας 5.3 και τη σχέση 5.3.1:

Κλάδος	Χρόνος μεταφοράς
A1	174 s
A2	174 s
B1	174 s
B2	122 s
Γ	87 s
Δ	87 s
Ε	87 s

Εικόνα 5.5. Χρόνοι μεταφοράς ιμάντων.

Για τον υπολογισμό του μέγιστου αριθμού αποθέσεων που μπορεί να εξυπηρετεί κάθε ιμάντας εργαζόμαστε ως εξής. Βρίσκουμε της δυναμικότητα του κάθε ιμάντα σε κάδους ανά δευτερόλεπτο και στη συνέχεια πολλαπλασιάζουμε με το χρόνο που χρειάζεται ένα φορτίο για να διανύσει το μήκος του εκάστοτε ιμάντα μεταφοράς.

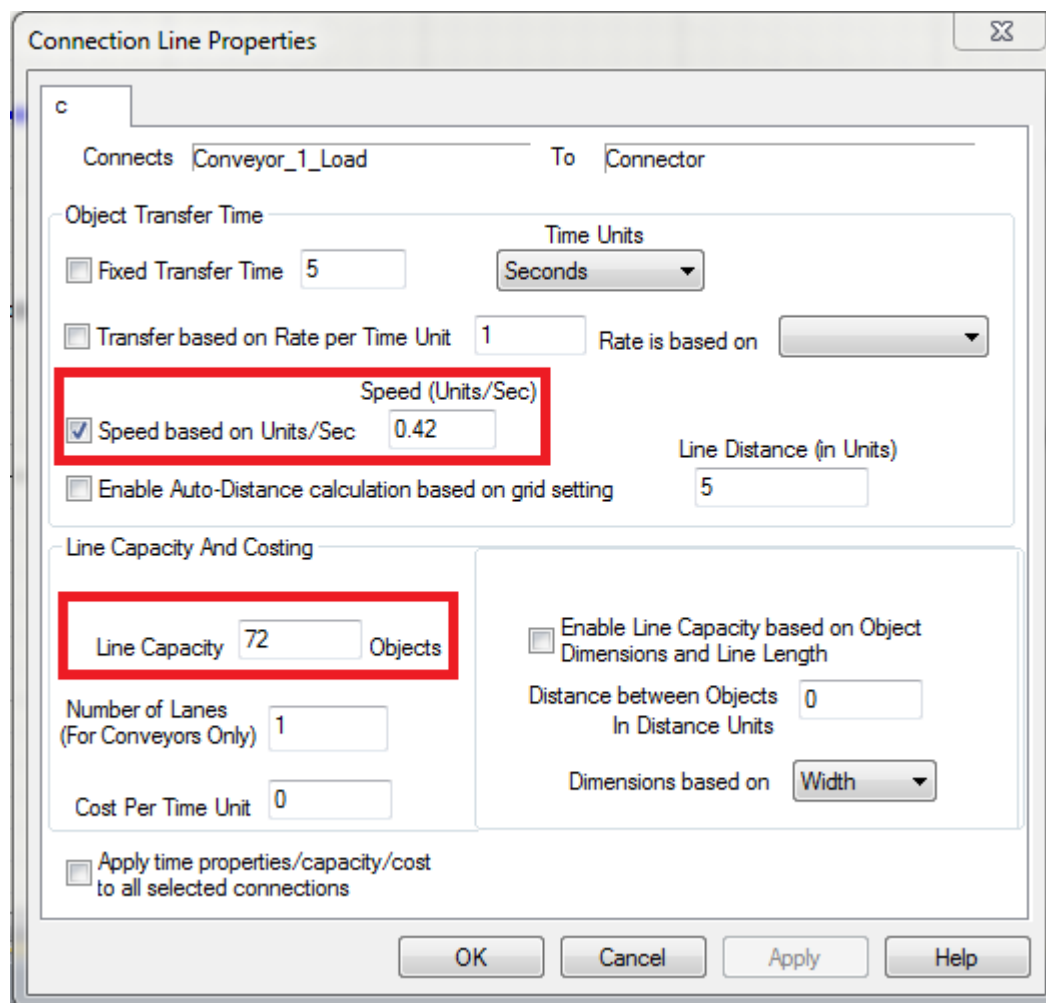
$$\text{Μάζα ανά κάδο} = \text{πυκνότητα} * \text{χωρητικότητα κάδου} = 1680 \text{kg/m}^3 * 4 \text{ m}^3 = 6.72 \text{ t}$$

$$\text{Χωρητικότητα μεταφορέα ζώνης} = \frac{\text{Δυναμικότητα ιμάντα}}{\text{Μάζα ανά κάδο εκσκαφέα}} * \text{Χρόνος μεταφοράς}$$

Κλάδος	Χρόνος μεταφοράς	Δυναμικότητα	Δυναμικότητα ιμάντα ανά sec	Αριθμός αποθέσεων
A1	174 s	10000 t/h	0,42 s	72
A2	174 s	10000 t/h	0,42 s	72
B1	174 s	10000 t/h	0,42 s	72
B2	122 s	10000 t/h	0,42 s	50
Γ	87 s	20000 t/h	0,82 s	72
Δ	87 s	20000 t/h	0,82 s	72
E	87 s	20000 t/h	0,82 s	72

Εικόνα 5.6. Υπολογισμός παραμέτρων

Θέτουμε επομένως το χρόνο μεταφοράς και τη μέγιστη χωρητικότητα του αντιστοίχου ιμάντα για κάθε γραμμή μεταφοράς στο πρόγραμμα “Simcad” (Εικόνα 5.6).

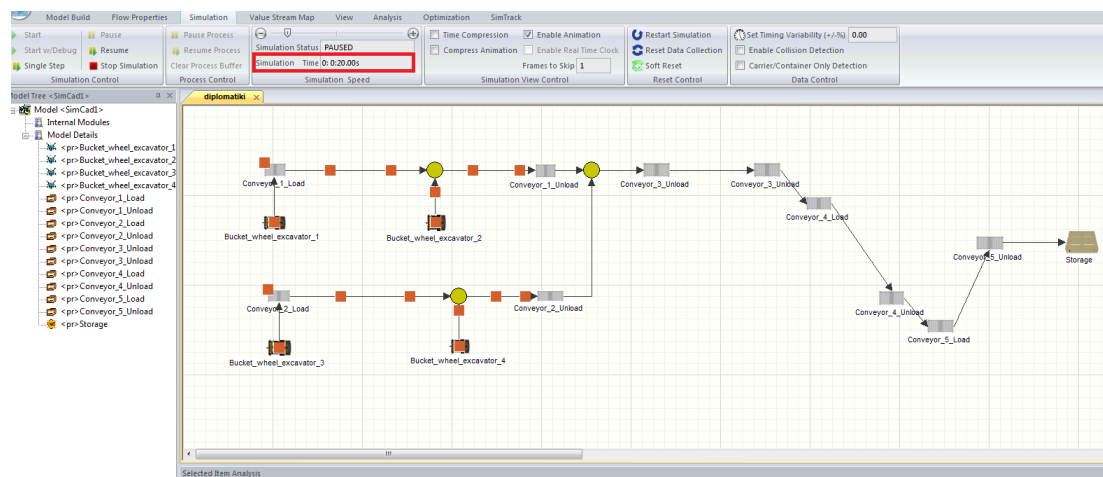


Εικόνα 5.7. Εισαγωγή τιμών μέγιστου αριθμού πακέτων αργίλου και ρυθμός μεταφοράς τους.

Αντίστοιχα εισάγουμε τις αντίστοιχες τιμές και για τους άλλους κόμβους του συστήματος.

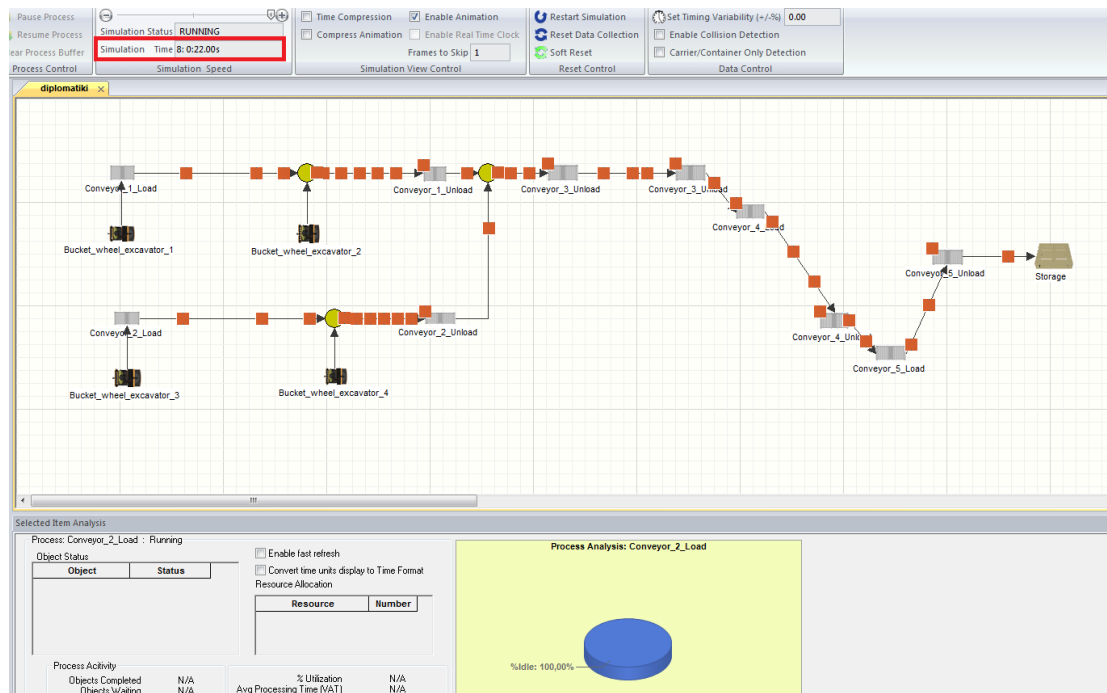
## 6 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.1 κατά την εκκίνηση του συστήματος οι τέσσερις εκσκαφείς τροφοδοτούν τους ιμάντες μεταφοράς με ένα καθορισμένο ρυθμό. Ο αλγόριθμος που αναπτύξαμε στοχεύει στην ομαλή μεταφορά της πρώτης ύλης από το χώρο εξόρυξής της στο χώρο αποθήκευσης. Η αποφυγή υπερφόρτωσης του δικτύου που θα προκαλούσε υπερχειλίση σε κάποιον κλάδο μεταφοράς μαζί με την εξοικονόμηση ενέργειας αποτέλεσαν τους βασικούς στόχους της μελέτης αυτής.

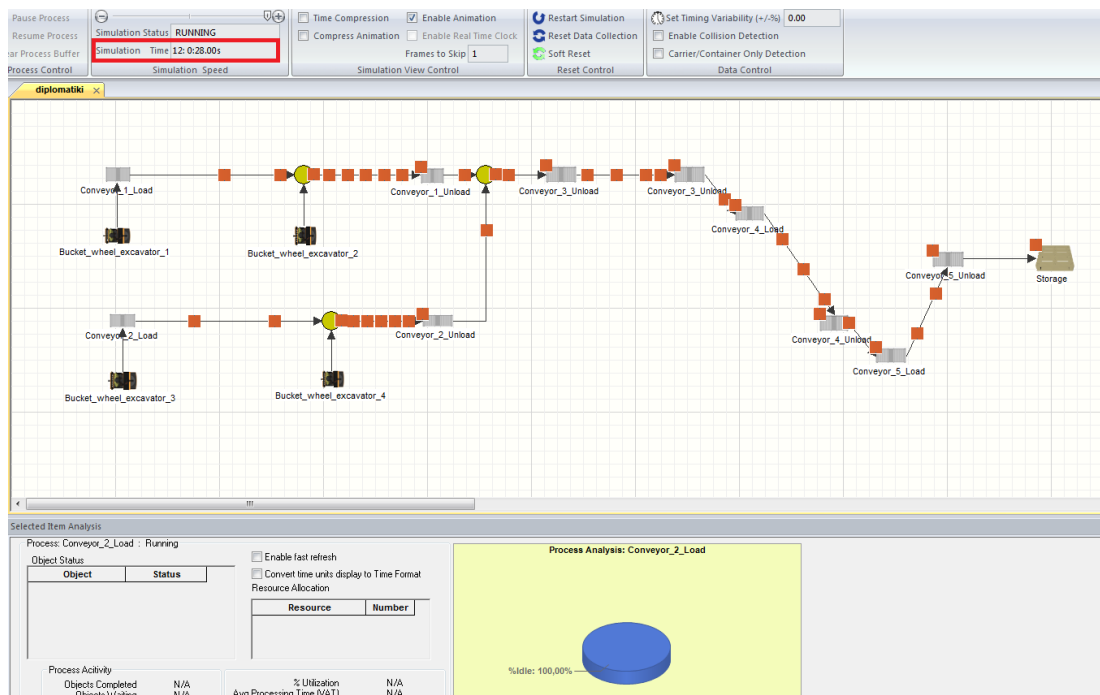


Εικόνα 6.1 Εκκίνηση του αλγορίθμου προσομοίωσης

Στην Εικόνα 6.2 παρατηρούμε την υλοποίηση του αλγορίθμου μετά από 8 ώρες και στην Εικόνα 6.3 έπειτα από 12 ώρες. Παρουσιάζεται η ομαλή λειτουργία του χωρίς να εμφανίζεται κάπου συνωστισμός και υπέρβαση του ορίου βάρους που έχει θέσει ο κατασκευαστής για το συγκεκριμένο τύπο μεταφορέων ζώνης που χρησιμοποιήσαμε.

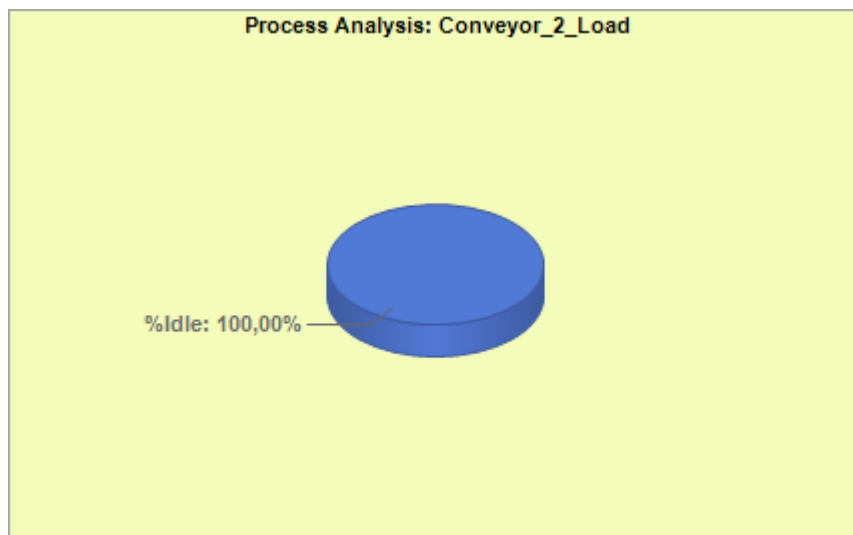


Εικόνα 6.2 Κατάσταση λειτουργίας μετά από 8 ώρες



Εικόνα 6.3 Κατάσταση λειτουργίας μετά από 12 ώρες

Τέλος στην Εικόνα 6.4 παρουσιάζεται η κατάσταση όλων των κόμβων του συστήματος με μηδενικό αριθμό φορτίων σε αναμονή.



Εικόνα 6.4 Κατάσταση κόμβων





## 7 Παρατηρήσεις και μελλοντικές εργασίες

Στον αλγόριθμο που μελετήσαμε η ροή εισόδου στο μεταφορικό σύστημα παραμένει σταθερή τόσο μεμονωμένα, από κάθε εκσκαφέα χωριστά, όσο και αθροιστικά, από όλους τους εκσκαφείς μαζί. Η πιο σημαντική βελτίωση θα ήταν ο έλεγχος της ταχύτητας να πραγματοποιείται με ενεργό τρόπο, δηλαδή ανάλογα με τον εκάστοτε ρυθμό τροφοδοσίας να ορίζεται η κατάλληλη ταχύτητα ώστε να μειώνεται το ποσό ενέργειας που απαιτείται για την ομαλή λειτουργία του συστήματος. Η υλοποίηση αυτή δεν είναι εύκολη στην εφαρμογή, καθώς οι πολλές διακυμάνσεις που θα μπορούσε να παρουσιάσει ο ρυθμός τροφοδοσίας καθιστούν πολύ δύσκολο το έργο της έγκαιρης επιλογής της κατάλληλης τιμής ταχύτητας της ζώνης μεταφοράς. Με τη συνεχή τεχνολογική εξέλιξη θα ήτανε εφικτό στο προσεχές μέλλον να γίνει πραγματικότητα αυτή η υλοποίηση μέσω της γρήγορης επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων και της λήψης αποφάσεων.



## 8 Βιβλιογραφία

- [1] G. Lodewijks, "Two decades dynamics of belt conveyor systems," *Bulk Solids Handling*, vol. 22, no. 2, p. 124–132, 2002.
- [2] G. S. F. Youssef, "Development of Conveyor Belts Design for Reducing Energy Consumption in Mining Applications," Master Thesis ,Ain Shams University, Cairo, 2016.
- [3] Continental, "Continental," [Online]. Available: <https://www.contitech.de/en-GL/Solutions/Conveyor-Belt-Systems/Material-handling/Enclosed-conveyor-belts/Products/Product-range/Pipe-conveyor-belts>. [Accessed 16 March 2019].
- [4] B.Bose, ""Global Warming: Energy, Environmental Pollution, and the Impact of Power Electronics"," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, pp. 6-17, 2010.
- [5] J. Hiltermann, "Reducing the electrical power consumption of troughed belt conveyor by speed control," Master Thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 2008.
- [6] German Institute for Standardization, "Continuous conveyors-Belt conveyors for loose bulk materials-Basis for calculation and dimensioning. Standard DIN 22101," German Institute for Standardization, Germany, 2015.
- [7] Conveyorbeltguide, 2018. [Online]. Available: <http://www.conveyorbeltguide.com/engineering.html>. [Accessed 17 March 2019].
- [8] D. He, "Energy Saving for Belt Conveyors by Speed Control," Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands, 2017.
- [9] R. Steven, "Belting the worlds' longest single flight conventional overland belt conveyor," *Bulk Solids Handling*, vol. 28, no. 3, pp. 172-181, 2008.
- [10] Daus, W., Koerber, S., Becker, N., "Raw coal loading and belt conveyor system at Nochten Opencast Mine- A new conveying and loading system based on drives controlled and adjusted by frequency converter," *BRAUNKOHLE 50 (2)*, p. 117–130, 1998.
- [11] Pang, Y., Lodewijks, G., "Improving energy efficiency in material transport systems by fuzzy speed control," *IEEE*, pp. 159-164, 2011.
- [12] Ristic, L., Bebic, M., Jevtic, D., Mihailovic, I., Statkic, S., Rasic, N., Jeftenic, B., "Fuzzy speed control of belt conveyor system to improve energy efficiency. IEEE," p. DS2a. 9–1–DS2a. 9–7, 2012.

- [13] Ristic, L. B., Jeftenic, B. I., "Implementation of fuzzy control to improve energy efficiency of variable speed bulk material transportation. Industrial Electronics," *IEEE Transactions on* 59 (7), p. 2959–2969, 2011.
- [14] Slobodan Vujic, Marjan Hudej, Igor Miljanovic, "Results of the promethee method application in selecting the technological system at the majdan III open pit mine," vol. 50 (2013), no. 4, pp. 1229-1240, 2013.
- [15] Wikipedia, "Bucket chain excavator," [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Bucket\\_chain\\_excavator](https://en.wikipedia.org/wiki/Bucket_chain_excavator). [Accessed 17 June 2019].
- [16] Opracowal, "Catalogue of machines for continuous mining system," [Online]. Available: <http://www.kgo.agh.edu.pl/wp-content/uploads/2010/09/Katalog.pdf>. [Accessed 17 June 2019].
- [17] Polteqor, "Polteqor," [Online]. Available: [http://www.poltegor.pl/index.php?page=informacje\\_ogolne&dzial\\_id=2&lang=en](http://www.poltegor.pl/index.php?page=informacje_ogolne&dzial_id=2&lang=en). [Accessed 17 June 2019].
- [18] Z. Murzynski, "BELT CONVEYORS AND MECHANIZATION OF STORAGE PROCESS IN POLISH SURFACE MINING," [Online]. Available: [http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/62bcf67cf8ef453\\_ek.pdf](http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/62bcf67cf8ef453_ek.pdf). [Accessed 17 June 2019].
- [19] "hlektrologia," [Online]. Available: [http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209\\_284.pdf](http://www.hlektrologia.weebly.com/uploads/6/7/1/5/6715419/p209_284.pdf). [Accessed 1 July 2019].
- [20] Engineering ToolBox (2010), "Dirt and Mud - Densities," [Online]. Available: [https://www.engineeringtoolbox.com/dirt-mud-densities-d\\_1727.html](https://www.engineeringtoolbox.com/dirt-mud-densities-d_1727.html). [Accessed 17 June 2019].
- [21] Engineering ToolBox (2009), "Conveyor Capacity," [Online]. Available: [https://www.engineeringtoolbox.com/bulk-material-conveyor-capacity-d\\_1558.html](https://www.engineeringtoolbox.com/bulk-material-conveyor-capacity-d_1558.html). [Accessed 19 June 2019].
- [22] M. Kasumovic, "Researchgate," [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/305259738\\_A\\_Mathematical\\_Model\\_to\\_Choose\\_Optimal\\_Subynchronous\\_Cascade\\_Elements\\_in\\_Electric\\_Motor\\_Drives\\_for\\_Belt\\_Conveyors](https://www.researchgate.net/publication/305259738_A_Mathematical_Model_to_Choose_Optimal_Subynchronous_Cascade_Elements_in_Electric_Motor_Drives_for_Belt_Conveyors). [Accessed 3 July 2019].
- [23] "Variable Frequency Drives," [Online]. Available: <http://www.vfds.org/reduce-motor-energy-consumption-by-vfd-now-897071.html>. [Accessed 3 July 2019].