

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**‘Ενεργειακή Ανάλυση Συστημάτων Συνεχούς Μεταφοράς Εξορυγμένων**  
**Υλικών’**

**ΜΠΙΩΤΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

**Εξεταστική Επιτροπή**

Καθηγητής Μιχάλης Γαλετάκης (επιβλέπων)

Καθηγητής Κομνίτσας Κων/νος

Δρ. Αντώνιος Στρατάκης

**ΧΑΝΙΑ**  
**ΙΟΥΝΙΟΣ 2023**

Οι απόψεις που εκφράζονται στην παρούσα εργασία αποτελούν την προσωπική τοποθέτηση του συγγραφέα και δεν αντικατοπτρίζουν τις θέσεις της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής. Παρατίθεται πλήρης βιβλιογραφική λίστα για όλες τις πηγές που έχουν χρησιμοποιηθεί είτε αυτούσιες είτε παραφρασμένες μέσα στο κείμενο.



## Περίληψη

Στην εργασία αυτή διερευνάται η δυνατότητα μετατροπής ενός συστήματος μεταφορικών ταινιών (ταινιόδρομοι) που χρησιμοποιούνται για τη διακίνηση κοκκωδών υλικών σε σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Εκμεταλλευόμενο την βαρυτική δυναμική ενέργεια του υλικού που βρίσκεται σε ορισμένο υψόμετρο και την κίνηση του με κεκλιμένους ταινιόδρομους μετατρέπει την βαρυτική δυναμική σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση ειδικής διάταξης ανάκτησης της ενέργειας. Η διάταξη αυτή αποθήκευσης ενέργειας βασίζεται στην ίδια αρχή με εκείνη του συστήματος αντλιοταμίευσης, αλλά αντί για ταμειυτήρες νερού χρησιμοποιεί σωρούς χαλαρών κοκκωδών υλικών (όπως άμμος, χαλίκι, ή άλλο θραυσμένο υλικό) που βρίσκονται σε διαφορετικά υψόμετρα. Μπορεί να δώσει λύση για την αποθήκευση ενέργειας σε περιοχές όπου δεν υπάρχει δυνατότητα αντλιοταμίευσης νερού καθώς επίσης να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου υπήρχε μεταλλευτική δραστηριότητα και όπου υπάρχουν διαθέσιμες ποσότητες χαλαρών κοκκωδών υλικών και κατάλληλες υψομετρικές διαφορές.

Με βάση τα υφιστάμενα μοντέλα υπολογισμού της απαιτούμενης ισχύς λειτουργίας των ταινιοδρόμων κατά ISO 5048 και DIN 22101 διερευνάται ποιες παράμετροι επηρεάζουν την απόδοση και την αποθηκευτική ικανότητα ενός τέτοιου συστήματος. Για την διερεύνηση αυτή χρησιμοποιείται η ανάλυση αβεβαιότητας ευαισθησίας. Ως βασικοί παράμετροι απόφασης ορίζονται το μήκος διαδρομής, το πλάτος μεταφορικού ιμάντα, η οριζόντια κλίση ταινιόδρομου, καθώς και η ταχύτητα κίνησης του ιμάντα, ενώ ως παράμετροι με αβεβαιότητα επιλέγονται ο συντελεστής απόδοσης κινητήριου συστήματος, ο συντελεστής πλήρωσης μεταφορικού ιμάντα, ο συντελεστής επιπλήσματος και το ειδικό βάρος του μεταφερόμενου υλικού, και ο συντελεστής αντιστάσεων λόγω τριβών στα κύλιστα μεταφοράς.

Εξετάστηκαν δυο σενάρια που ανταποκρίνονται σε ένα βελτιστοποιημένο σύστημα ταινιοδρόμων και σε ένα τυπικό και υπολογίστηκε η επίδραση των παραμέτρων αβεβαιότητας στην απόδοση του συστήματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τη μεγαλύτερη επίδραση στους δείκτες απόδοσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είχαν ο συντελεστής πλήρωσης της μεταφορικής ταινίας και ο συντελεστής απόδοσης του κινητήριου συστήματος. Η υπολογισθείσα τιμή για τον συντελεστή αποθήκευσης ενέργειας για το βελτιστοποιημένο σύστημα κυμαίνεται από 0,68-0,90 ενώ για το τυπικό σύστημα κυμαίνεται από 0,44-0,75. Οι τιμές αυτές είναι συγκρίσιμες με άλλα υπάρχοντα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (αντλιοταμίευση, πεπιεσμένος αέρας, μπαταρίες και περιστρεφόμενοι σφόνδυλοι). Επιπλέον τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας που βασίζονται στη λειτουργία των ταινιοδρόμων έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, δεν έχουν απώλειες αποθήκευσης και δεν παράγουν απόβλητα κατά τη λειτουργία τους.

Τέλος τα αποτελέσματα της ανάλυσης υφιστάμενου συστήματος κατηφορικού ταινιόδρομου (εγκατεστημένου σε λατομείο), που εκτός από τη μεταφορά υλικών ανακτά και ενέργεια κατά τη λειτουργία του, έδειξαν ότι η απόδοση του συστήματος είναι μικρότερη από την θεωρητικά υπολογιζόμενη. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το υφιστάμενο σύστημα δεν έχει σχεδιαστεί ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας αλλά ως σύστημα μεταφοράς εξορυγμένων υλικών.

## Abstract

This study investigates the possibility of converting a conveyor belt system, used for the transportation of bulk materials, into an energy storage system. By harnessing the gravitational potential energy of the material at a certain height and utilizing its movement on inclined conveyor belts, the gravitational energy is converted into electrical energy using regenerative motors. This energy storage system is based on the same principle as the hydro-pumped storage system, but instead of using water reservoirs, it employs piles of loose bulk materials (such as sand, gravel, or other fragmented materials) at different elevations. It can provide a solution for energy storage in areas where water pumping is not feasible, and it can also be utilized in former mining areas, where sufficient quantities of loose bulk materials and suitable height differences are available.

Based on existing computational models for calculating the required operating power of conveyor belts according to ISO 5048 and DIN 22101, this study examines which parameters affect the performance and storage capacity of such a system. Sensitivity uncertainty analysis is used for this investigation. The key decision parameters are defined as the travel length, conveyor belt width, conveyor belt incline, and belt speed, while the parameters with uncertainty include the motor efficiency factor, the belt filling factor, the coefficient of friction, the specific weight of the transported material, and the resistance coefficient due to friction on the idlers.

Two scenarios were examined, corresponding to an optimized conveyor belt system and a typical one, and the effect of uncertainty parameters on the system performance was calculated. The results showed that the conveyor belt's filling factor and the motor system's efficiency factor had the greatest impact on the performance indicators of the energy storage system. The calculated value for the energy storage factor ranged from 0.68 to 0.90 for the optimized system and from 0.44 to 0.75 for the typical system. These values are comparable to other existing energy storage systems (pumped storage, compressed air, batteries, and flywheels). Furthermore, energy storage systems based on conveyor belt operation have lower construction costs, longer lifespans, no storage losses, and do not produce waste during their operation.

Finally, the analysis results of an existing downhill conveyor belt system installed in a quarry, that is used not only to transport materials but also to recover energy during its operation, showed that the system's performance is lower than the theoretically calculated. This deviation is due to the fact that the existing system was not designed as an energy storage system but rather as a material transportation system.

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	4
Abstract .....	5
Κατάλογος Εικόνων .....	7
Κατάλογος Πινάκων .....	9
Εισαγωγή .....	10
Κεφάλαιο 1: Βασικές αρχές λειτουργίας ταινιοδρόμων μεταφοράς κοκκωδών χαλαρών υλικών - υπολογισμοί απόδοσης και απαιτούμενης ισχύος.....	12
1.1: Περιγραφή-συγκρότηση ταινιοδρόμων .....	12
1.2: Κινηματικές συνθήκες συστήματος ταινιοδρόμου .....	15
1.3: Υπολογισμός απόδοσης και απαιτούμενης ισχύος κατά ISO 5048 και DIN 22101 .....	20
1.4: Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος κατά CEMA (αναλυτική μέθοδος) .....	26
1.5: Απλοποιημένος υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος κατά CEMA (γραφική μέθοδος).....	40
1.6: Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της απαιτούμενης ισχύος και απόδοσης .....	43
Κεφάλαιο 2:Ενεργειακή ανάλυση συστήματος ταινιοδρόμου ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας .....	46
2.1: Ταινιοδρόμοι μεταφοράς κοκκωδών χαλαρών υλικών ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας .....	46
2.2 Θεωρητικό μοντέλο συστήματος μετατροπής – αποθήκευσης – ανάκτησης ηλεκτρικής ενέργειας ....	47
2.3: Ενεργειακή ανάλυση του ταινιοδρόμου ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας .....	48
Κεφάλαιο 3: Αξιολόγηση τυπικών διατάξεων ταινιοδρόμων ως συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας - ανάλυση αβεβαιότητας και ευαισθησίας .....	51
3.1: Γενικά για ανάλυση αβεβαιότητας-ευαισθησίας .....	51
3.2: Παράμετροι αβεβαιότητας και παράμετροι απόφασης.....	52
3.3: Εφαρμογή της ανάλυσης αβεβαιότητας-ευαισθησίας για τυπικές διατάξεις ταινιοδρόμων και εύρεση βέλτιστων τιμών.....	55
3.4: Σύγκριση απόδοσης με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....	63
Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή σε υπάρχουσα εγκατάσταση ταινιοδρόμου λατομείου .....	64
4.1: Περιγραφή της εγκατάστασης και του συστήματος ταινιοδρόμων .....	64
4.2: Υπολογισμός της απόδοσής του MT6 ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας – ανάλυση αβεβαιότητας και ευαισθησίας .....	65
4.3: Σύγκριση των θεωρητικών υπολογισμών με πραγματικά απολογιστικά στοιχεία .....	68
Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα - προτάσεις.....	70
Βιβλιογραφία .....	71

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1:Τυπική διάταξη συστήματος ταινιόδρομου [13] .....	12
Εικόνα 1.2:Κατασκευή ιμάντα.....	13
Εικόνα 1.3:Συμβατική ταινία πολλαπλών στρώσεων [13] .....	14
Εικόνα 1.4:Διατάξεις τάνυσης [15].....	14
Εικόνα 1.5: Προφίλ αναπτυσσόμενων δυνάμεων ιμάντα μεταφοράς [15] .....	15
Εικόνα 1.6:Μετάδοση δυνάμεων ιμάντα [14].....	16
Εικόνα 1.7:Περιορισμοί Eytelwein [14] .....	17
Εικόνα 1.8:Τιμές συντελεστή έλξης $K_1$ συναρτήσει συντελεστή τριβής $\mu$ για δεδομένη γωνία επαφής $\alpha$ [15] .....	18
Εικόνα 1.9:Τιμές συντελεστή έλξης $K_2$ συναρτήσει συντελεστή τριβής $\mu$ για δεδομένη γωνία επαφής $\alpha$ [15] .....	18
Εικόνα 1.10:Γωνίες επαφής με βάση τη χρήση οδηγητικών τυμπάνων [14].....	20
Εικόνα 1.11:Διάταξη κυλίστρων σκαφιδωτού ιμάντα κίνησης [15].....	22
Εικόνα 1.12:Μεταβολή του συντελεστή $C$ με βάση το μήκος μεταφοράς [15].....	25
Εικόνα 1.13:Επίδραση τάσης ιμάντα στην αντίσταση κάμψης του υλικού [4] .....	32
Εικόνα 1.14:Διορθωτικός συντελεστής θερμοκρασίας περιβάλλοντος $K_t$ [4] .....	34
Εικόνα 1.15:Αναπτυσσόμενες δυνάμεις και κινηματικές συνθήκες στο τύμπανο κίνησης για επίπεδο ή ανηφορικό ταινιόδρομο και για κατηφορικό ταινιόδρομο που διαθέτει σύστημα ελέγχου της ταχύτητας του ιμάντα με ανάκτηση ενέργειας [4] .....	36
Εικόνα 1.16:Τυπική διάταξη ανηφορικού ταινιόδρομου [4] .....	36
Εικόνα 1.17:Ιπποδύναμη για την κίνηση άδειας μεταφορικής ταινίας [4] .....	41
Εικόνα 1.18:Διάγραμμα υπολογισμού απαιτούμενης ισχύος για την οριζόντια μετακίνηση του υλικού [4].	42
Εικόνα 1.19:Απαραίτητη ιπποδύναμη για την ανύψωση υλικού [4] .....	42
Εικόνα 2.1: Σχεδιάγραμμα αποθήκευσης και ανάκτησης ενέργειας συστημάτων μεταφορικών ταινιόδρομων [5].....	47
Εικόνα 2.2: Διάγραμμα ροής ενέργειας σε σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μετατροπή της σε άλλη μορφή και εκ νέου.....	48
Εικόνα 3.1:Η έννοια της μοντελοποίησης βασισμένη στον Rosen (1991) [11] .....	51
Εικόνα 3.2:Ορισμός του πλάτους μεταφορικής ταινίας ως παράμετρο απόφασης που λαμβάνει προκαθορισμένες τιμές (Custom) .....	53
Εικόνα 3.3:Εισαγωγή παραμέτρων ομοιόμορφης κατανομής για το ειδικό βάρος (SW) [12] .....	54
Εικόνα 3.4: Παράμετροι τριγωνικής κατανομής για τον συντελεστή αντιστάσεων ( $f$ ) [12] .....	55
Εικόνα 3.5:Πρόσθετο επίλυσης (Solver) [12].....	56
Εικόνα 3.6:Κατανομή Παραγόμενης ισχύος $N_{dis}$ σεναρίου 1 .....	58
Εικόνα 3.7:Κατανομή συντελεστή απόδοσης συστήματος αποθήκευσης $\eta_{es}$ σεναρίου 1 .....	59
Εικόνα 3.8:Διαγράμματα διασποράς αβέβαιων παραμέτρων - δεικτών απόδοσης συστήματος αποθήκευσης σεναρίου 1 .....	60
Εικόνα 3.9:Ποσοστό συνεισφοράς των παραμέτρων αβεβαιότητας στη διακύμανση παραγόμενης ισχύος $N_{dis}$ (σενάριο 1).....	61
Εικόνα 3.10:Ποσοστό συνεισφοράς των παραμέτρων αβεβαιότητας στη διακύμανση συντελεστή απόδοσης $\eta_{es}$ (σενάριο 1) .....	61
Εικόνα 3.11:Συντελεστές συσχέτισης παραμέτρων αβεβαιότητας και συντελεστή απόδοσης $N_{dis}$ (σενάριο 1) .....	62
Εικόνα 3.12:Ραβδόγραμμα βαθμών συσχέτισης μεταξύ αβέβαιων παραμέτρων και παραγόμενης ισχύος $\eta_{es}$ σεναρίου 1 .....	62

Εικόνα 3.13:Συσχέτιση της απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με την αποδιδόμενη ισχύ (σενάριο 2).....	63
Εικόνα 4.1:Αεροφωτογραφία των εγκαταστάσεων του λατομείου Ξηρορέματος, όπου φαίνεται το ταινιόδρομος ΤΔ6. ....	64
Εικόνα 4.2:Αριστερά: Αεροφωτογραφία των εγκαταστάσεων του λατομείου Ξηρορέματος, όπου φαίνεται η θέση φόρτωσης του υλικού από τους σωρούς στον ταινιόδρομο ΤΔ6. Δεξιά: Θέση απόθεσης του υλικού από τον ταινιόδρομο ΤΔ6 σε σωρούς. ....	65
Εικόνα 4.3:Κατανομές συχνότητας δεικτών απόδοσης σεναρίου τιμών λατομείου Ξηρορέματος.....	67
Εικόνα 4.5:Διαγράμματα διασποράς αβέβαιων παραμέτρων – δεικτών απόδοσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας λατομείου Ξηρορέματος.....	68



## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1: Τιμές συντελεστή τριβής ιμάντα συναρτήσει υλικού επιφάνειας κυλίστρων και λειτουργικής κατάστασης συστήματος [14] .....	19
Πίνακας 1.2: Τυπικές ταχύτητες ταινίας (m/s) για τα τυποποιημένα πλάτη ιμάντα και τα διαφορετικά είδη υλικών [15] .....	21
Πίνακας 1.3: Τιμές συντελεστή $\xi$ [15] .....	23
Πίνακας 1.4: Τιμές διορθωτικού συντελεστή $\lambda$ [15] .....	23
Πίνακας 1.5: Τυποποιημένα πλάτη ιμάντων σε mm κατά DIN 22107/10.1960 [15] .....	23
Πίνακας 1.6: Βάρος μεταφορά σε kp/m [15] .....	25
Πίνακας 1.7: Εκτιμώμενο μέσο φορτίο μεταφορά, lbs/ft [4] .....	27
Πίνακας 1.8: Τιμές συντελεστή κάμψης $K_y$ [4] .....	30
Πίνακας 1.9: Τιμές συντελεστή κάμψης $K_y$ [4] .....	31
Πίνακας 1.10: Διορθωμένες τιμές συντελεστή κάμψης [4] .....	33
Πίνακας 1.11: Απαιτούμενη δύναμη ανά τύμπανο σε σχέση με τον τύπο του τυμπάνου και τη γωνία επαφής τυμπάνου και ιμάντα. [4] .....	35
Πίνακας 1.12: Συντελεστής τριβής υλικού Cs [4] .....	37
Πίνακας 1.13: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου υπολογισμού ισχύος κατά CEMA .....	38
Πίνακας 1.14: Μονάδες υπολογιστικών μοντέλων .....	44
Πίνακας 2.1: Παράμετροι μοντέλου υπολογισμού συντελεστή απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας κατά ISO 5048 και DIN 22101 .....	49
Πίνακας 3.1: Παράμετροι απόφασης .....	52
Πίνακας 3.2: Παράμετροι αβεβαιότητας .....	53
Πίνακας 3.3: Περιορισμοί σεναρίου βελτιστοποίησης δεικτών απόδοσης συστήματος .....	56
Πίνακας 3.4: Σενάρια τιμών παραμέτρων εισαγωγής .....	57
Πίνακας 3.5: Πίνακας δεικτών απόδοσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ( $n_{es}$ και $N_{dis}$ ) για βεβαιότητα 95% .....	59
Πίνακας 3.6: Πίνακας στατιστικών μεγεθών για τον συντελεστή απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας $n_{es}$ σεναρίου 1 .....	59
Πίνακας 3.7: Πίνακας στατιστικών μεγεθών για την παραγόμενη ισχύ $N_{dis}$ σεναρίου 1 .....	59
Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας σεναρίου 1 .....	60
Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας σεναρίου 2 .....	61
Πίνακας 3.10: Συντελεστές απόδοσης διαφορετικών τύπων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [5] .....	63
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά ταινιόδρομου MT6 του λατομείου Ξηρορέματος .....	65
Πίνακας 4.2: Συντελεστές που αντιστοιχούν χαρακτηριστικά ταινιόδρομου MT6 του λατομείου Ξηρορέματος .....	66
Πίνακας 4.3: Συντελεστές που αντιστοιχούν χαρακτηριστικά ταινιόδρομου MT6 του λατομείου Ξηρορέματος .....	66
Πίνακας 4.4: Δείκτες απόδοσης του MT6 θεωρούμενου ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας .....	66
Πίνακας 4.5: Στατιστικά στοιχεία δεικτών απόδοσης συστήματος MT6 του λατομείου Ξηρορέματος .....	67
Πίνακας 4.6: Δείκτες ευαισθησίας για τον MT6 του λατομείου Ξηρορέματος .....	68
Πίνακας 4.7: Απολογιστικά στοιχεία μεταφοράς υλικού και ανάκτησης ενέργειας του λατομείου Ξηρορέματος για το έτος 2022 .....	69

## Εισαγωγή

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (αιολική, ηλιακή) έχουν συνεχώς αυξανόμενη συμμετοχή στη παραγωγή ενέργειας σήμερα αφού θεωρούνται ιδιαίτερα σημαντικές για την επιχειρούμενη ενεργειακή μετάβαση σε μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub>. Η στοχαστικότητα που χαρακτηρίζει την παραγωγή τους δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στη σταθερότητα του δικτύου ενέργειας και δυσχεραίνει την περαιτέρω διείσδυση τους. Η λύση στο πρόβλημα αυτό δίνεται από τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (EES, electrical energy storage), όπου η περισσευούμενη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί σε περιόδους χαμηλής κατανάλωσης ή/και αυξημένης παραγωγής και να επαναχρησιμοποιηθεί κατά τις περιόδους υψηλής ζήτησης και μειωμένης παραγωγής. Οι πιο διαδεδομένες σήμερα μέθοδοι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας βασίζονται κατά ένα μεγάλο ποσοστό στα συστήματα αντλιοσταμίου (PHS, pumped hydro storage), σε συστήματα πεπιεσμένου αέρα (CAES, compressed air energy storage) και όπως επίσης και συστήματα περιστρεφόμενων σφονδύλων (FES, flywheel energy storage). Τα παραπάνω αποτελούν συστήματα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή μηχανικής ενέργειας. Στα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ηλεκτροχημική τα πλέον διαδεδομένα είναι τα συστήματα μπαταριών (BES, battery energy storage).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται κατά πόσο είναι αποδοτική ενεργειακά η μετατροπή συστήματος μεταφορικού ταινιόδρομου σε σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας (CES, conveyor energy storage). Εκμεταλλευόμενο την βαρυτική δυναμική ενέργεια θραυσμένου υλικού που βρίσκεται σε ορισμένο υψόμετρο και την κίνηση εκείνου με κεκλιμένους ταινιόδρομους μετατρέπει την βαρυτική δυναμική σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση ειδικής διάταξης ανάκτησης της κινητικής ενέργειας. Η διάταξη αυτή βασίζεται στην ίδια αρχή με εκείνη του συστήματος αντλιών-υδροστροβίλων ύδατος (PHS) αλλά σε αντίθεση με τους ταμιευτήρες νερού χρησιμοποιεί σωρούς χαλαρών κοκκωδών υλικών (όπως άμμος, χαλίκι, ή άλλο θραυσμένο υλικό) σε διαφορετικά υψόμετρα. Η εφαρμογή τις μεθόδου είναι ευκολότερη από αυτή των αντλιών ύδατος μέσω ταμιευτήρων νερού και παρουσιάζει μικρότερα κόστη κεφαλαίου κατά μέσο όρο. Μπορεί να δώσει λύση για την αποθήκευση ενέργειας σε περιοχές όπου δεν υπάρχει δυνατότητα αντλιοσταμίου νερού καθώς επίσης να χρησιμοποιηθεί σε περιοχές όπου υπήρχε μεταλλευτική δραστηριότητα και όπου υπάρχουν διαθέσιμες ποσότητες χαλαρών κοκκωδών υλικών και κατάλληλες υψομετρικές διαφορές. Θα πρέπει επίσης να τονιστεί ότι ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται από την εξεταζόμενη μέθοδο χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία, είναι αξιόπιστος και ο μέσος ζωής του ανέρχεται σε μερικές δεκαετίες. Για την αποτελεσματική αξιολόγηση της μεθόδου αποθήκευσης ορίζεται ένας συντελεστής απόδοσης. Ο συντελεστής εκφράζεται ως το πηλίκο της ηλεκτρικής ενέργειας που αποδίδεται από το σύστημα προς την ενέργεια που καταναλώνεται από αυτό και που τροφοδοτείται από το κεντρικό σύστημα τροφοδοσίας.

Η ενεργειακή ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία με τη χρήση διάφορων μαθηματικών μοντέλων υπολογισμού της απαιτούμενης ισχύος για την κίνηση των ταινιοδρόμων που προτείνονται από τα πρότυπα DIN, ISO και CEMA. Οι παράμετροι που απαιτούνται για τους υπολογισμούς είναι πολυάριθμες και μερικές εξ' αυτών όχι πάντα γνωστές με ακρίβεια, εισάγοντας έτσι ένα ποσοστό αβεβαιότητα στο τελικά εξαγόμενο αποτέλεσμα. Η αβεβαιότητα των παραμέτρων αυτών καθώς και η επίδραση της μεταβολής σχεδιαστικών-λειτουργικών παραμέτρων του ταινιοδρόμου στον υπολογισμό της ισχύος διερευνάται με την ανάλυση αβεβαιότητας – ευαισθησίας με χρήση εξειδικευμένου λογισμικού (Crystal Ball). Οι τιμές των παραμέτρων που ενέχουν αβεβαιότητα θεωρούνται στοχαστικές μεταβλητές και ορίζονται για αυτές οι κατάλληλες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας. Ως παράμετροι αβεβαιότητας θεωρήθηκαν, ο συντελεστής τριβής των κυλίστρων της μεταφορικής ταινίας, το ειδικό βάρος του μεταφερόμενου υλικού, ο συντελεστής επιπλήσματος του υλικού, ο συντελεστής απόδοσης κινητήριου συστήματος, ο συντελεστής πλήρωσης μεταφορικής ταινίας και η ταχύτητα κίνησης του ιμάντα. Ως

σχεδιαστικές-λειτουργικές παράμετροι θεωρήθηκαν το μήκος και η κλίση της ταινίας, το πλάτος, η κλίση των πλευρικών κυλίστρων και η ταχύτητα της ταινίας που καθορίζουν και τη μέγιστη μεταφορική ικανότητα της. Η δομή της εργασίας δίνεται παρακάτω:

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται η περιγραφή ενός ταινιοδρόμου, δίνεται η βασική του συγκρότηση, τα λειτουργικά του στοιχεία, αναλύονται και συγκρίνονται τα μοντέλα υπολογισμών της μεταφορικής τους ικανότητας και της απαιτούμενης ισχύος λειτουργίας σύμφωνα με τα πρότυπα DIN, ISO και CEMA.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η ιδέα της χρήσης ταινιοδρόμων μεταφοράς κοκκωδών χαλαρών υλικών ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και γίνεται ενεργειακή ανάλυση βασισμένη στο μοντέλο υπολογισμού της απαιτούμενης ισχύος λειτουργίας κατά ISO 5048 και DIN 22101.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση αβεβαιότητας και ευαισθησίας του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται σε ταινιοδρόμους. Επιλέγονται οι παράμετροι με αβεβαιότητα και οι παράμετροι απόφασης και υπολογίζεται η επίδραση τους στην απόδοση και την αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος. Γίνεται εύρεση των βέλτιστων τιμών και υπολογίζονται η απόδοση και η μέγιστη αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος για διάφορα σενάρια. Τέλος γίνεται σύγκριση της απόδοσης με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Εφαρμογή σε υπάρχουσα εγκατάσταση ταινιοδρόμου λατομείου.

Στο τέταρτο κεφάλαιο εξετάζεται υπάρχουσα εγκατάσταση συστήματος κατηφορικού ταινιοδρόμου που εκτός από τη μεταφορά υλικών ανακτά και ενέργεια κατά τη λειτουργία του. Εφαρμόζεται στην εγκατάσταση αυτή η μεθοδολογία υπολογισμού της απόδοσης και γίνεται σύγκριση με υπάρχοντα απολογιστικά στοιχεία.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

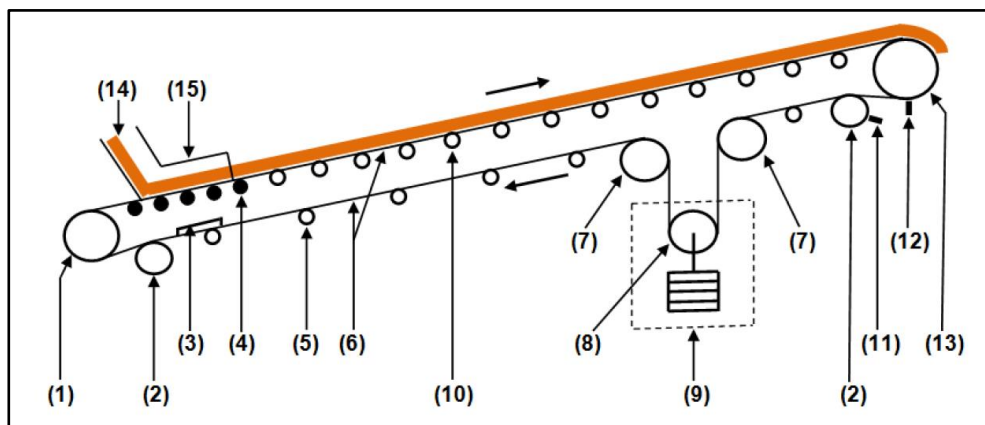
Το Πολυτεχνείο Κρήτης συμμετέχει στο Ευρωπαϊκό Πανεπιστήμιο Eureca -Pro που έχει σαν στόχο την υπεύθυνη παραγωγή και κατανάλωση (SDG12). Η διπλωματική αυτή εργασία συμβάλλει στη επίτευξη του στόχου αυτού.

# Κεφάλαιο 1: Βασικές αρχές λειτουργίας ταινιοδρόμων μεταφοράς κοκκωδών χαλαρών υλικών - υπολογισμοί απόδοσης και απαιτούμενης ισχύος

## 1.1: Περιγραφή-συγκρότηση ταινιοδρόμων

Μεταφορικές διατάξεις αποτελούμενες από ελαστικούς ιμάντες, γνωστά και ως μεταφορικές ταινίες ή και ταινιόδρομοι, χρησιμοποιούνται για πολλά χρόνια στη βιομηχανία για μεταφορά υλικών σε χύδην μορφή αλλά και σε μεγάλα τεχνικά έργα για αποκομιδή υλικών εκσκαφής. Ως τυπικά παραδείγματα χρήσης μεταφορικών ταινιών μπορούμε να αναφέρουμε τη μεταφορά του κλίνκερ του τσιμέντου στην τσιμεντοβιομηχανία, των αδρανών υλικών στα λατομεία, των μεταλλευμάτων, των γαιανθράκων και των αγόνων υλικών σε ορυχεία, των λιπασμάτων στη χημική βιομηχανία, των σιτηρών στη γεωργία κ.α.

Τα συστήματα ταινιόδρομων έχουν ως βασικό στοιχείο λειτουργίας την ταινία μεταφοράς, η οποία κινείται από δύο τύμπανα. Στο σύνολο αυτό το ένα τύμπανο περιστρέφεται, όντας συνδεδεμένο με κάποιον κινητήρα, αποδίδοντας κίνηση στο σύστημα, σε αντίθεση με το δεύτερο, που περιστρέφεται ελεύθερα μεταδίδοντας απλά την κίνηση και επιστρέφοντας την ταινία στην αφετηρία (εικόνα 1.1). Κατά την κίνηση του ιμάντα είναι απαραίτητο να υπερνικηθούν οι εμφανιζόμενες αντιστάσεις εκείνου. Τον ρόλο αυτό αναλαμβάνει η περιφερειακή δύναμη  $P$ , η οποία μεταδίδεται μέσω τριβής και ασκείται στον άξονα του τυμπάνου κίνησης του ταινιόδρομου. Για να εξασφαλισθεί η κατάλληλη τριβή μετάδοσης της  $P$  απαιτείται η συνεχής τάνυση του ιμάντα μεταφοράς και η ικανοποιητική πρόσφυση μεταξύ τυμπάνου κίνησης και ιμάντα. [13],[15]



Εικόνα 1.1:Τυπική διάταξη συστήματος ταινιόδρομου [13]

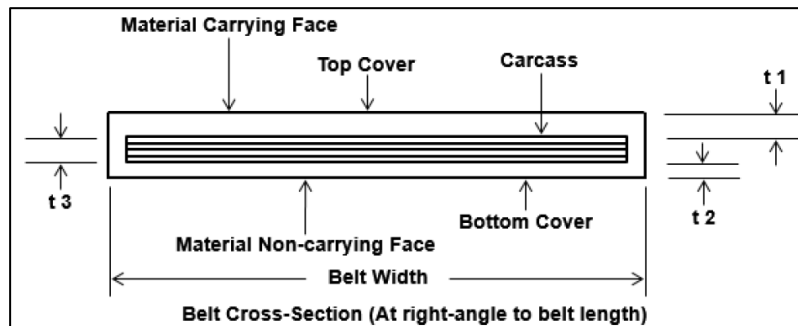
1. Τύμπανο ουσράς
2. Οδηγητικό τύμπανο
3. Εσωτερικό σύστημα καθαρισμού ιμάντα(αποξεστήρας ταινίας)
4. Κύλινδρα περιοχής φόρτωσης του ιμάντα(κύλινδρα πρόσκρουσης)
5. Κύλινδρα επιστροφής

6. Ιμάντας
7. Τύμπανο κάμψης
8. Τύμπανο τάνυσης
9. Διάταξη τάνυσης
10. Κύλιστρα φορτίου
11. Διάταξη καθαρισμού τυμπάνου (αποξεστήρας τυμπάνου)
12. Εξωτερικό σύστημα καθαρισμού ιμάντα (αποξεστήρας ταινίας)
13. Τύμπανο κεφαλής(τροχαλία οδηγός)
14. Διάταξη τροφοδοσίας υλικού
15. Προστατευτική πλάκα (εμποδίζει την υπερχειλίση του υλικού αυξάνοντας την μεταφορική απόδοση)

Ο ιμάντας ή αλλιώς μεταφορική ταινία είναι το σημαντικότερο από τα στοιχεία που απαρτίζουν ένα μεταφορικό σύστημα ταινιόδρομου και πολλές φορές είναι και αυτό με το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. Για τον λόγο αυτό η επιλογή του τύπου ιμάντα γίνεται με μεγάλη προσοχή και απαντά σε απαιτήσεις όπως:

- Αποτελεσματική μεταφορά φορτίου
- Απορρόφηση της ενέργειας πρόσκρουσης του υλικού πάνω στην ταινία κατά την τροφοδοσία
- Αντοχή σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και χημικών φαινομένων διάβρωσης
- Συνθήκες ασφάλειας (πυρίμαχη, αντιστατική κ.α.)

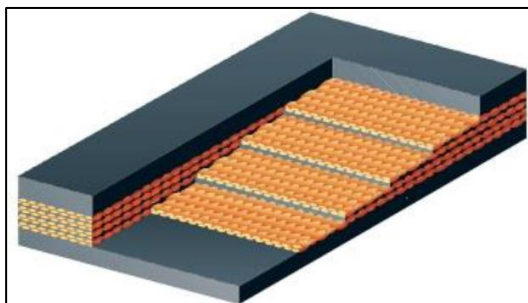
Απαρτίζεται από τρία στρώματα, τα πάχη των οποίων εμφανίζονται στην Εικόνα 1.2. Το στρώμα στο πάνω μέρος της διάταξης λειτουργεί ως επιφάνεια επαφής του μεταφερόμενου υλικού, ενώ στο κάτω μέρος καλείται τρέχουσα επιφάνεια. Το συνολικό πάχος της ταινίας μεταφοράς υπολογίζεται από το άθροισμα των τιμών πάχους των στρωμάτων. [13]



Εικόνα 1.2:Κατασκευή ιμάντα

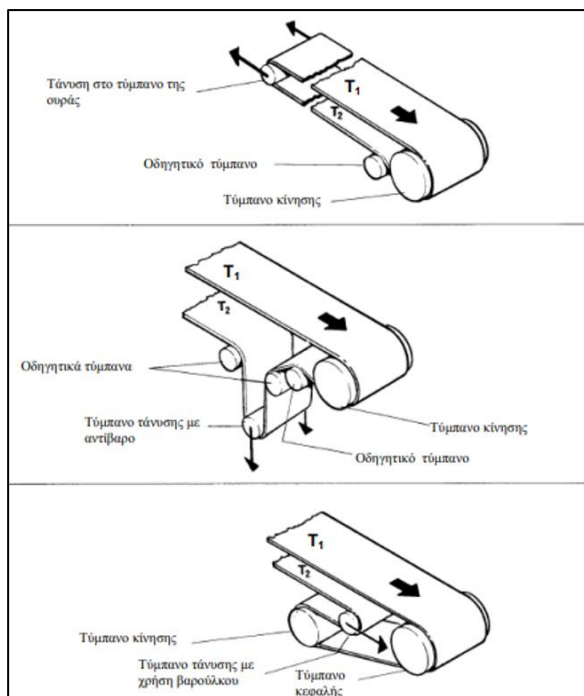
Το κυριότερο μέρος του ιμάντα μεταφοράς είναι το πάνω στρώμα του, καθώς οι λειτουργίες του καλύπτουν βασικές ανάγκες της παραγωγικής διαδικασίας, όπως η απαραίτητη τάση για την μεταφορά φορτίου, η απορρόφηση κραδασμών κατά την φόρτωση, καθώς και η στιβαρότητα για την στήριξη του υλικού στον κενό χώρο μεταξύ κυλίστρων. Κατασκευάζονται από στρώσεις πλεγμένου νήματος σε περιπτώσεις, όπου απαιτείται υψηλή τάση κατά μήκος, ενώ συχνή είναι η χρήση μονής στρώσης επιφάνειας από πλεγμένες μεταλλικές ίνες ή ίνες αραμιδίου (συνθετικό υλικό).

Οι ταινίες πολλαπλών στρώσεων (Εικόνα 1.3) χρησιμοποιούνται ευρέως για την μεταφορά υλικών αποτελούνται από δύο έως έξι στρώσεις υφάσματος, ενώ στις περιπτώσεις όπου η ταινία ακολουθεί ανυψωτική κίνηση οι στρώσεις κυμαίνονται μεταξύ τριών και έξι για την αποφυγή σκισιμάτων. [13]



Εικόνα 1.3: Συμβατική ταινία πολλαπλών στρώσεων [13]

Η τάνυση του ιμάντα επιδρά σημαντικά στην λειτουργία του μεταφορικού συστήματος, καθώς δημιουργεί τις συνθήκες πρόσφυσης κάτω από τις οποίες θα μεταδοθούν οι κινητήριες δυνάμεις του τυμπάνου σε όλο το μήκος διαδρομής. Οι συσκευές τάνσης αποσκοπούν στην εξασφάλιση μίας ομαλής εκκίνησης για το σύστημα και εξομαλύνουν τυχόν ανωμαλίες που προκύπτουν στην επιφάνεια του ιμάντα μεταφοράς από την ανισομερή φόρτιση του με θραυσμένο υλικό. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος γίνεται με βάση τις συνθήκες του εκάστοτε περιβάλλοντος εργασίας, το κλίμα, καθώς και την κλίση του. Τυπικές διατάξεις τάνσης μεταφορικής ταινίας φαίνονται στην Εικόνα 1.4.

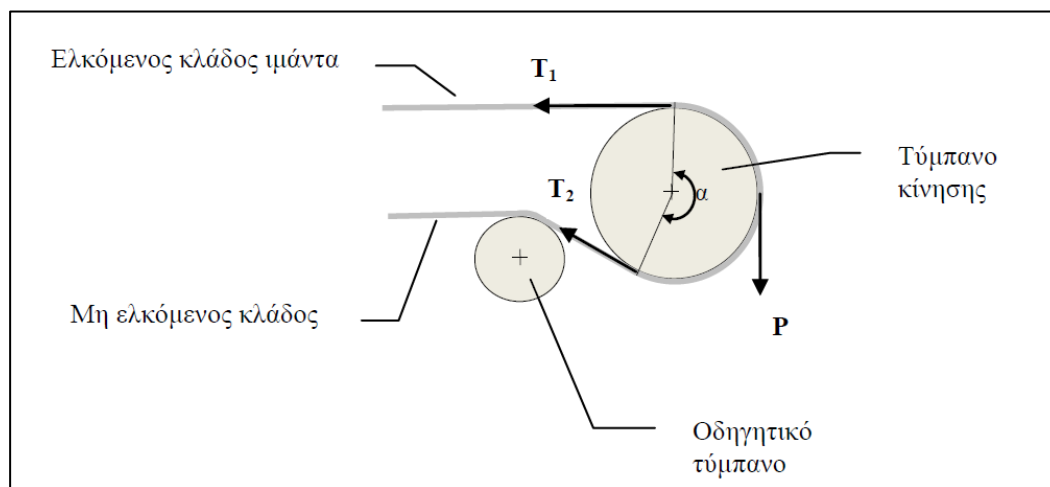


Εικόνα 1.4: Διατάξεις τάνσης [15]

Σε μικρού μεγέθους μεταφορείς το σύστημα τάνυσης τοποθετείται στην ουρά του και η έδρασή του σχεδιάζεται έτσι ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μετατόπισής του κατά τον διαμήκη άξονα. Σε μεγαλύτερα συστήματα, οι διατάξεις τάνυσης τοποθετούνται και στην ενδιάμεση διαδρομή της ταινίας, όπως επίσης και στην κεφαλή της. Στα συστήματα μικρού μήκους, η τάνυση του ιμάντα επιτυγχάνεται με κοχλίες και αντίβαρα, ενώ σε αυτά μεγαλύτερου μήκους με αντίβαρα ή αυτοματοποιημένα ηλεκτροκίνητα βαρούλκα. Στην τρίτη περίπτωση ο μηχανισμός επιτυγχάνει μείωση δονήσεων που δημιουργούνται κατά το ξεκίνημα του μεταφορικού ιμάντα, ενώ στην δεύτερη εμφανίζεται μία συνεχόμενη προεντατική κατάσταση σε όλο το μήκος του. Ο πρώτος μηχανισμός προτείνεται για συστήματα με χαμηλή επιμήκυνση ταινίας, όπως στην περίπτωση των ταινιών που έχουν ενίσχυση με μεταλλικές ίνες. [13],[15]

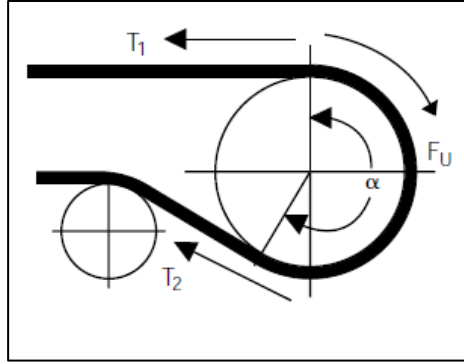
## 1.2: Κινηματικές συνθήκες συστήματος ταινιοδρόμου

Η κίνηση σε ένα σύστημα μεταφορικών ταινιών προέρχεται από την κατάλληλη πρόσφυση μεταξύ ταινίας και τυμπάνου κίνησης. Η πρόσφυση προκύπτει έπειτα από επαρκή τάνυση της ταινίας η οποία έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση τριβής μεταξύ των δύο επιφανειών. Η αναπτυσσόμενη τριβή ονομάζεται διαφορετικά περιφερειακή δύναμη  $P$  και εμφανίζεται στην περιφέρεια του τυμπάνου κίνησης. Σε αυτού του είδους τις διατάξεις η μεταφορική ταινία χωρίζεται σε δύο ξεχωριστά τμήματα ή αλλιώς κλάδους, αυτούς του ελκόμενου και μη ελκόμενου τμήματος στο πάνω και κάτω μέρος της μεταφορικής ταινίας αντίστοιχα, όπως φαίνεται στα σχήματα των Εικόνων 1.5 και 1.6. [15]



Εικόνα 1.5: Προφίλ αναπτυσσόμενων δυνάμεων ιμάντα μεταφοράς [15]

Για να τεθεί σε κίνηση η ταινία θα πρέπει οι δυνάμεις κίνησης να υπερνικούν τις αναπτυσσόμενες αντιστάσεις κατά την κίνηση της ταινίας. Η δύναμη που υπερνικά τις αναπτυσσόμενες αντιστάσεις καλείται περιφερειακή δύναμη  $P$  ή  $F_u$  και εφαρμόζεται στην περιφέρεια του τυμπάνου κίνησης. [10],[14],[15]



Εικόνα 1.6: Μετάδοση δυνάμεων ιμάντα [14]

Η δύναμη  $F_U$  ορίζεται ως διαφορά των δυνάμεων ελκόμενου και μη ελκόμενου φορέα ως εξής:

$$F_U = T_1 - T_2 \quad (1.1),$$

όπου:

$T_1 > T_2$  λόγω του συντελεστή τριβής μεταξύ τυμπάνου κίνησης και μεταφορικού ιμάντα (Σε περιπτώσεις πέδησης της ταινίας η ανισότητα αντιστρέφεται).

Η περιφερειακή δύναμη υπολογίζεται από το πηλίκο της ισχύς λειτουργίας με την ταχύτητα κίνησης του μεταφορικού ιμάντα σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

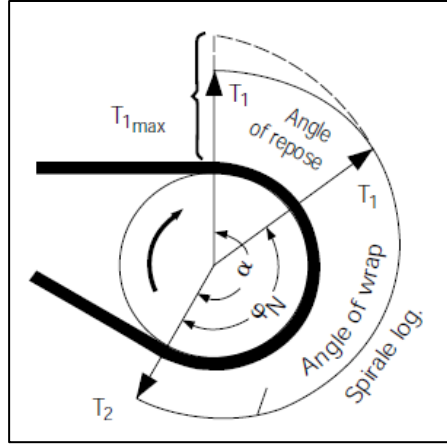
$$P = \frac{75 \cdot N_a}{v} \quad (1.2)$$

Η κινητήρια δύναμη που υπερνικά τις αναπτυσσόμενες αντιστάσεις μεταδίδεται από το τύμπανο στον ιμάντα μεταφοράς και έχει ισχύ με οριακή συνθήκη το σημείο γλιστρήματος της ταινίας, όπου :

$$\frac{T_1}{T_2} \leq e^{\mu\alpha} \quad (1.3)$$

- $T_1$  η δύναμη του ελκόμενου κλάδου
- $T_2$  η δύναμη στον μη ελκόμενο κλάδο
- $\mu$  ο συντελεστής τριβής μεταξύ τυμπάνου και μεταφορικής ταινίας
- $\alpha$  η γωνία επαφής του ιμάντα με το τύμπανο κίνησης (όπως φαίνεται στην Εικόνα 1.7)
- $e = 2,718$  η βάση των νεπέριων φυσικών λογάριθμων





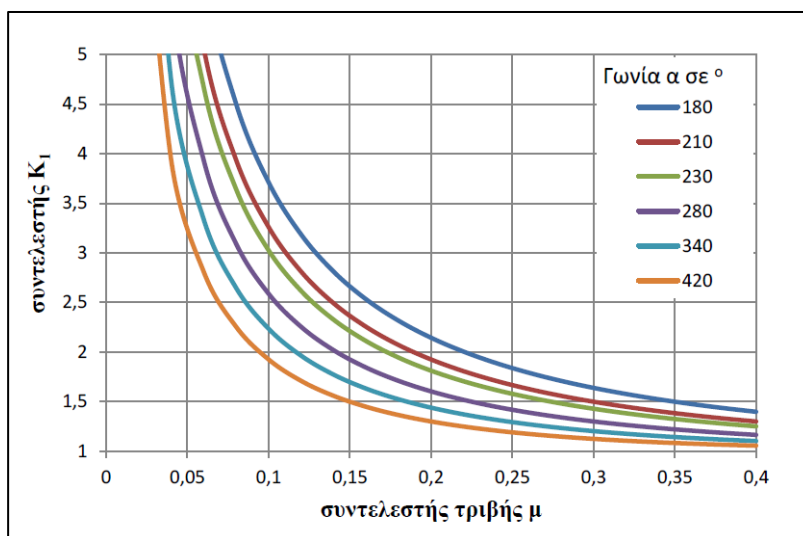
Εικόνα 1.7: Περιορισμοί Eytelwein [14]

Από τις εξισώσεις 1.1 και 1.3 προκύπτει ότι :

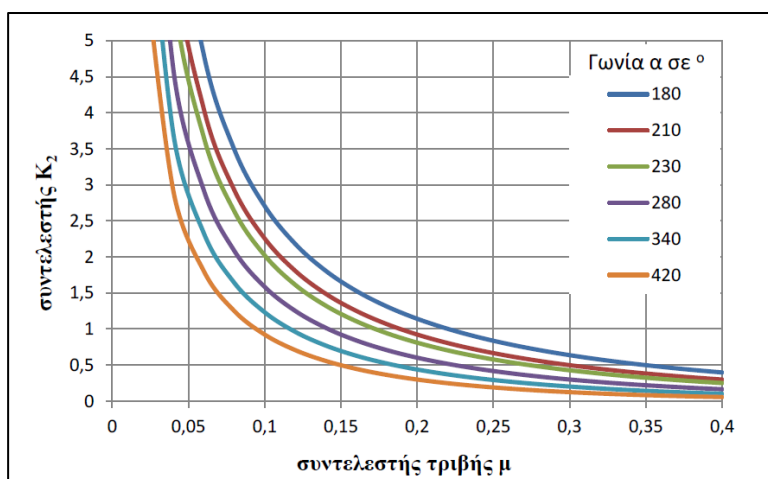
$$T_1 = F_U * \left(1 + \frac{1}{e^{\mu\alpha} - 1}\right) = F_U * K_1 \quad (1.4)$$

$$T_2 = F_U * \left(\frac{1}{e^{\mu\alpha} - 1}\right) = F_U * K_2 \quad (1.5)$$

Οι  $K_1$  και  $K_2$  ονομάζονται συντελεστές έλξης του ιμάντα και εξαρτώνται από την γωνία επαφής  $\alpha$  και τον συντελεστή τριβής  $\mu$ . Ο όρος έλξη αναφέρεται στην εντατική κατάσταση του μεταφορικού ιμάντα. Εάν είναι υπερβολικά τεντωμένος χάνει την επαφή του με την επιφάνεια του τυμπάνου με αποτέλεσμα να οδηγείται σε ολίσθηση. Το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί μαθηματικά από τον τύπο 1.4, όπου ο  $K_1$  συνδέεται με την τάση του ελκόμενου κλάδου. Για μεγάλη αύξηση του συντελεστή έλξης ακολουθεί ανάλογη αύξηση της αναπτυσσόμενης τάσης στον ελκόμενο κλάδο της ταινίας. [15] Οι τιμές των συντελεστών  $K_1$  και  $K_2$  συναρτήσει του συντελεστή τριβής  $\mu$  για δεδομένη γωνία επαφής  $\alpha$  δίνονται από τα γραφήματα των Εικόνων 1.8 και 1.9.



Εικόνα 1.8: Τιμές συντελεστή έλξης  $K_1$  συναρτήσει συντελεστή τριβής  $\mu$  για δεδομένη γωνία επαφής  $\alpha$  [15]



Εικόνα 1.9: Τιμές συντελεστή έλξης  $K_2$  συναρτήσει συντελεστή τριβής  $\mu$  για δεδομένη γωνία επαφής  $\alpha$  [15]

Η τάση του ελκόμενου κλάδου καταπονεί των ιμάντα, συνεπώς ο επιθυμητός στόχος είναι η μείωση της τιμής του όσο πιο κοντά στην οριακή συνθήκη επαφής των δύο επιφανειών (Eytelwein). Για την μείωσή της απαιτείται αύξηση του συντελεστή τριβής  $\mu$  και της γωνίας επαφής του ιμάντα  $\alpha$ . Αν η περιφερειακή δύναμη είναι μεγαλύτερη σε μέγεθος από την ικανότητα μεταφοράς του συστήματος, σύμφωνα με την οριακή συνθήκη του Eytelwein ο ιμάντας χάνει την επαφή του με το τύμπανο κίνησης λόγω μειωμένης πρόσφυσης, γεγονός που οδηγεί στην ολίσθησή του. Κατά την κίνηση του ιμάντα γύρω από το τύμπανο ενδεχομένως να παρατηρηθεί μείωση στην τάνυση της ελκόμενης πλευράς, καθώς εκείνη καταλήγει στον μη ελκόμενο κλάδο. Η μείωση στην τάνυση προκύπτει από την απόκλιση των τιμών της ταχύτητας μεταξύ της ταινίας στους δύο κλάδους και του τυμπάνου κίνησης. Αυτή έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μη ομοιόμορφων επιφανειών λόγω προέκτασης και σύσφιξης. [14]

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή τριβής του ιμάντα και του τυμπάνου είναι σημαντική οποιαδήποτε πληροφορία που αφορά την λειτουργία του συστήματος μεταφοράς. Τα όρια μέσα στα οποία κινείται η τιμή του προσδιορίζονται από τους παρακάτω παράγοντες:

- Την κατάσταση της επιφάνειας μεταφορικών κυλίστρων
- Την ύπαρξη υλικού μεταξύ μεταφορικού ιμάντα και κυλίστρων (όπως νερό ή λάσπη)
- Την θερμοκρασία του περιβάλλοντος
- Την αναπτυσσόμενη πίεση μεταξύ των επιφανειών
- Τα φαινόμενα ολίσθησης και εμφάνιση ανομοιομορφιών στην επιφάνεια της ταινίας μεταφοράς

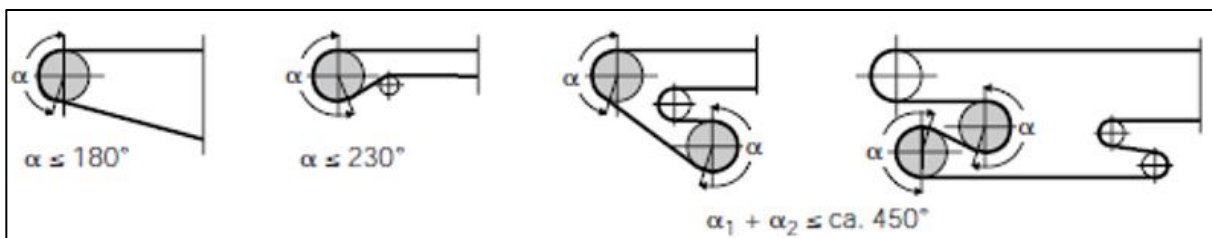
Τυπικές τιμές του συντελεστή τριβής του ιμάντα και του τυμπάνου δίνονται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1: Τιμές συντελεστή τριβής ιμάντα συναρτήσει υλικού επιφάνειας κυλίστρων και λειτουργικής κατάστασης συστήματος [14]

Λειτουργική κατάσταση	Υλικό επιφάνειας κυλίστρων			
	Κοινό ατσάλι (λείο)	Θερμομονωτική πολυουρεθάνη (αυλακωτή)	Λαστιχένια θερμομόνωση (αυλακωτή)	Κεραμική θερμομόνωση (πορώδης)
Ξηρή	0,35 – 0,4	0,35 – 0,4	0,4 – 0,45	0,4 – 0,45
Υγρή (καθαρή)	0,1	0,35	0,35	0,35 – 0,4
Υγρή (λάσπη, πηλός)	0,05 – 0,1	0,2	0,25 – 0,3	0,35

Παρατηρώντας το γράφημα 1.1 για μικρές τιμές του συντελεστή τριβής  $\mu$  η λειτουργία του μεταφορέα γίνεται ασταθής, καθώς ο συντελεστής έλξης  $K_1$  αυξάνεται σημαντικά και η ταινία ολισθαίνει στην επιφάνεια του τυμπάνου λόγω αυξημένης τάσης  $T_1$  στην επιφάνεια της. Ο συντελεστής τριβής  $\mu$  μειώνεται λόγω φθοράς του ιμάντα που προκύπτει από συχνή χρήση του, είτε από υγρασία ή ρύπανση μεταφερόμενων υλικών. Για να διατηρηθεί ο συντελεστής σε υψηλές τιμές προτείνεται επένδυση ελαστικού για την επιφάνεια του τυμπάνου κίνησης ή άλλων αντιολισθητικών υλικών, καθώς και αυλακώσεις. [14]

Η γωνία επαφής του ιμάντα επηρεάζει την τιμή του συντελεστή έλξης  $K_1$  με τον ίδιο τρόπο όπως στην περίπτωση του συντελεστή τριβής  $\mu$ . Αύξηση της γωνίας συνεπάγεται μείωση του συντελεστή έλξης και κατ' επέκταση ομαλότερη λειτουργία του μεταφορέα. Για να επιτευχθούν μεγαλύτερες γωνίες επαφής γίνεται χρήση οδηγητικών τυμπάνων (Εικόνα 1.9). Η τιμή της γωνίας ανέρχεται στις 230 μοίρες για ένα τύμπανο και στις 450 για τα δύο. Στην περίπτωση των δύο οδηγητικών τυμπάνων η γωνία επαφής υπολογίζεται από το άθροισμα των μερικών γωνιών τους. [14]



Εικόνα 1.10: Γωνίες επαφής με βάση τη χρήση οδηγητικών τυμπάνων [14]

### 1.3: Υπολογισμός απόδοσης και απαιτούμενης ισχύος κατά ISO 5048 και DIN 22101

Ο υπολογισμός της ισχύος λειτουργίας ενός μεταφορικού ιμάντα μπορεί να γίνει με χρήση διάφορων προτύπων τα συνηθέστερα από τα οποία είναι εκείνα που βασίζονται στη σειρά ISO, DIN και CEMA.

Ο υπολογισμός της απόδοσης και της απαιτούμενης ισχύος μιας μεταφορικής ταινίας με βάση το προσεγγιστικό μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού της ισχύος κατά DIN και ISO, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία, είναι παρεμφερές. Αρχικά υπολογίζεται η ισχύς στον άξονα του τυμπάνου για την κίνηση της μεταφορικής ταινίας όταν αυτή είναι άδεια, στη συνέχεια η ίδια υπολογίζεται για το σύστημα όταν η ταινία είναι φορτωμένη και κινείται οριζόντια και στο τελικό βήμα όταν η ταινία κινείται με κλίση μεταφέροντας υλικό σε κάποιο ανώτερο υψομετρικά σημείο από αυτό που ξεκίνησε. Για τους υπολογισμούς απαιτούνται τα παρακάτω μεγέθη:

#### **Μήκος μεταφοράς υλικού (m)**

Το μήκος μεταφοράς υλικού αναφέρεται στην απόσταση που διανύει η μεταφορική ταινία, η οποία κατά την κίνηση υπό κλίση είναι παράλληλη με την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζονται επιπλέον υπολογισμοί για να προσδιοριστεί η οριζόντια απόσταση.

#### **Υψομετρική διαφορά (m)**

Η υψομετρική διαφορά του ταινιόδρομου αναφέρεται στη διαφορά ύψους από χαμηλότερο σε υψηλότερο σημείο της διάταξης. Όσο μεγαλύτερη είναι η υψομετρική διαφορά του ταινιόδρομου, τόσο μεγαλύτερη είναι η κατανάλωση ισχύος για την μεταφορά του υλικού από την βάση στην κορυφή της διάταξης.

#### **Ταχύτητα κίνησης του ιμάντα (m/s)**

Η ταχύτητα κίνησης του ιμάντα δίνει σε συνδυασμό με την επιφάνεια διατομής της ταινίας το μέγεθος του υλικού που μεταφέρεται στη μονάδα του χρόνου, συνεπώς και την μεταφορική απόδοση του συστήματος. Ανάλογα με το είδος του μεταφερόμενου υλικού, καθώς και του πλάτους μεταφορικού ιμάντα προτείνονται οι παρακάτω τιμές ταχύτητας κατά κανόνα DIN. Τυπικές ταχύτητες κίνησης ταινιών σε σχέση με το πλάτος τους και το είδος των μεταφερόμενων υλικών δίνονται στον Πίνακα 1.2 [15].

Πίνακας 1.2: Τυπικές ταχύτητες ταινίας (m/s) για τα τυποποιημένα πλάτη ιμάντα και τα διαφορετικά είδη υλικών [15]

Πλάτος ιμάντα (mm)	Κοκκώδη υλικά που ρέουν εύκολα	Εξορυγμένος γαιάνθρακας και γαιώδη υλικά	Εξορυγμένα μεταλλεύματα και πετρώματα
400	2,0	1,5	-
450	2,5	2,25	1,75
500	3,0	2,25	1,75
600	3,0	2,5	2,25
650	3,25	2,75	2,50
750	3,5	3,0 – 3,5	2,75
800	3,75	3,0 – 3,5	2,75
900	4,0	3,0 – 3,5	3,0
1000	4,0	3,0 – 3,5	3,0
1050	4,0	3,0 – 3,5	3,0
1200	4,0	3,5 – 4,0	3,0 – 3,5
1350	4,5	3,25 – 4,0	3,0 – 3,5
1400	4,5	3,25 – 4,0	3,0 – 3,5
1500	4,5	3,25 – 4,0	3,0 – 3,5
1600	5,0	3,75 – 4,25	3,25 – 4,0
1800	5,0	3,75 – 4,25	3,25
2000	-	3,75 – 4,25	3,25
2200	-	3,75 – 4,25	-

### **Πλάτος ιμάντα (mm)**

Οι ιμάντες παράγονται σε συγκεκριμένα πλάτη και η επιλογή τους γίνεται από τυποποιημένους πίνακες. Η διάταξη κατασκευής του ιμάντα σε συνδυασμό με το πλάτος του καθορίζουν την επιφάνεια διατομής του υλικού στο ιμάντα και κατ' επέκταση την μεταφορική απόδοση του συστήματος. Το ελάχιστο απαιτούμενο πλάτος ιμάντα καθορίζεται από τις διαστάσεις των τεμαχιδίων του υλικού που διακινείται. Αν οι τιμές του πλάτους δεν είναι επαρκείς, μειώνεται η διάρκεια ζωής του ιμάντα καθώς και των κυλίστρων μεταφοράς, ενώ παράλληλα αυξάνεται η πιθανότητα μπλοκαρίσματος στα σημεία φόρτωσης.

### **Φορτίο μεταφοράς (kp/m)**

Το φορτίο του μεταφορέα εξαρτάται από το πλάτος του ιμάντα και το υλικό κατασκευής και επιλέγεται για τυποποιημένες τιμές εκείνων από σχετικό πίνακα.

### **Συντελεστής μήκους μεταφοράς**

Ο συντελεστής μήκους μεταφοράς είναι ένα αδιάστατο μέγεθος, το οποίο λαμβάνει τιμές από το διάγραμμα λογαριθμικής κλίμακας που παρουσιάζεται παρακάτω και συμμετέχει στον υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος λειτουργίας του ταινιόδρομου.

### Μεταφορική απόδοση ταινιοδρόμου $Q$ ( $m^3/h$ )

Η μεταφορική απόδοση  $Q$  ( $m^3/h$ ) ενός ταινιοδρόμου υπολογίζεται με βάση την ταχύτητα κίνησης του ιμάντα ( $m/s$ ) καθώς και την επιφάνεια διατομής  $F$  του υλικού ( $m^2$ ) από τη σχέση 1.6.

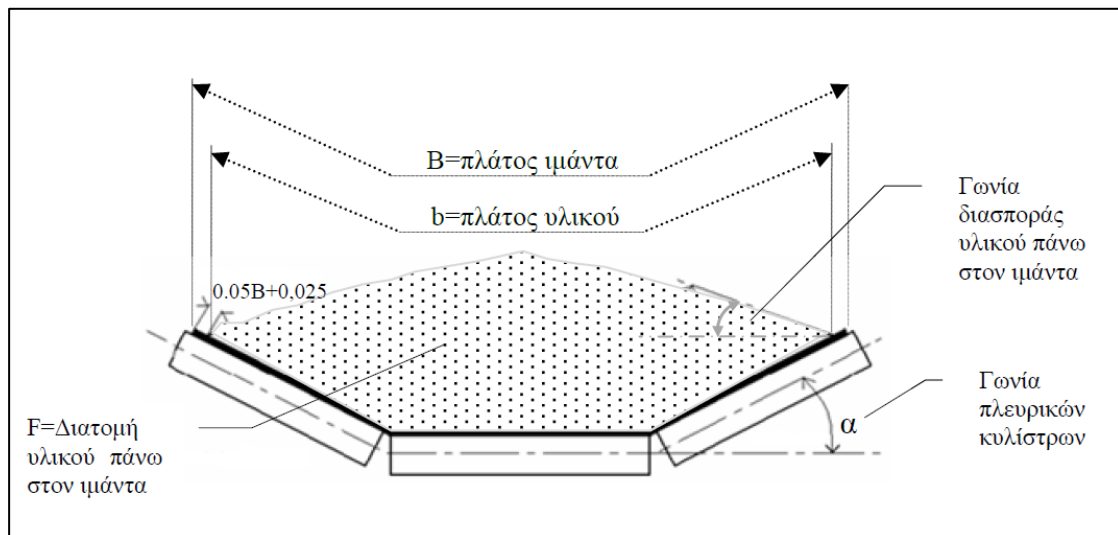
$$Q = 3600 * F * v \quad (1.6)$$

### Ειδικό βάρος υλικού ( $kg/m^3$ )

Το ειδικό βάρος απαιτείται για τον υπολογισμό της απόδοσης του συστήματος σε  $t/h$ .

### Επιφάνεια διατομής του υλικού ( $m^2$ )

Η επιφάνεια διατομής εξαρτάται από την διάταξη κατασκευής του συστήματος μεταφοράς της ταινίας και πιο συγκεκριμένα από την τοποθέτηση των κυλίστρων έδρασης του ιμάντα και την κλίση κατά την οποία κινείται ο ταινιοδρόμος. Η επιλογή και τοποθέτηση των κυλίστρων μεταφοράς ακολουθεί του σχεδιασμού και μπορεί να έχει διάφορες μορφές. Στην Εικόνα 1.11 δίνεται η διάταξη για τη συνήθη περίπτωση του σκαφιδωτού ιμάντα τριών κυλίστρων.



Εικόνα 1.11: Διάταξη κυλίστρων σκαφιδωτού ιμάντα κίνησης [15]

Για τον υπολογισμό της επιφάνειας διατομής  $F$  του υλικού στην ταινία (Εικόνα 1.11) προτείνεται ο παρακάτω τύπος (Ευφραιμίδης, 1971):

$$F = \xi * \lambda * ([0,9 * B - 0,05])^2 \quad (1.7)$$

Το  $B$  είναι το πλάτος του ιμάντα, ενώ οι συντελεστές  $\xi$  και  $\lambda$  είναι διορθωτικοί συντελεστές για τη γωνία  $\alpha$  των πλευρικών κυλίστρων και την κλίση  $\delta$  του συστήματος μεταφοράς ως προς το οριζόντιο επίπεδο αντιστοίχως. Οι συντελεστές αυτοί είναι τυποποιημένοι και επιλέγονται από τους παρακάτω πίνακες 1.3 και 1.4. Τα τυποποιημένα πλάτη ιμάντων κατά DIN λαμβάνονται αντίστοιχα από τον Πίνακα 1.5.

Πίνακας 1.3: Τιμές συντελεστή  $\xi$  [15]

$\alpha$	0°	20°	30°	35°
$\xi$	240	440	545	580

Πίνακας 1.4: Τιμές διορθωτικού συντελεστή  $\lambda$  [15]

$\delta$	2°	4°	6°	8°	10°	12°	14°	16	18	20
$\lambda$	1,0	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,91	0,89	0,85	0,81
$\delta$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\lambda$	0,78	0,76	0,73	0,71	0,68	0,66	0,64	0,61	0,59	0,56

Πίνακας 1.5: Τυποποιημένα πλάτη ιμάντων σε mm κατά DIN 22107/10.1960 [15]

400	500	650	800	1000	1200	1400	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

### **Κλίση πλευρικών κυλίστρων (deg)**

Η διάταξη των κυλίστρων αλλάζει μορφές ανάλογα με την κλίση τους. Η κλίση αυτή επηρεάζει την τιμή του πλάτους του μεταφερόμενου υλικού και συμμετέχει στον υπολογισμό της επιφάνειας διατομής με την παρουσία ενός διορθωτικού συντελεστή.

### **Συντελεστής επιπλήσματος**

Ο συντελεστής επιπλήσματος απαιτείται κατά τον υπολογισμό της μεταφερόμενης ποσότητας και ορίζεται ως το πηλίκο του όγκου συμπαγούς υλικού πριν από την φάση της εξόρυξης προς τον όγκο του χαλαρού υλικού. Η παράμετρος αυτή δεν έχει προκαθορισμένη τιμή και εισάγει την έννοια της αβεβαιότητας στο τελικό αποτέλεσμα του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού της ισχύος.

### **Σταθερά λόγω κλίσης πλευρικών κυλίστρων**

Η σταθερά  $\xi$  όπως προαναφέρθηκε εμφανίζεται κατά την διόρθωση της τιμής της επιφάνειας διατομής λόγω κλίσης των πλευρικών κυλίστρων.

### **Γωνία κλίσης μεταφορικού ιμάντα (deg)**

Η γωνία κλίσης του ταινιόδρομου είναι η γωνία που σχηματίζει με το οριζόντιο επίπεδο και υπολογίζεται από το μήκος διαδρομής και την υψομετρική διαφορά κεφαλής – ουράς του μεταφορικού συστήματος.

### **Συντελεστής διόρθωσης κλίσης μεταφορικού ιμάντα**

Ο συντελεστής διόρθωσης κλίσης χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της επιφάνειας διατομής και λαμβάνει τυποποιημένες τιμές ανάλογα με την κλίση (Πίνακας 1.4).

### **Μεταφερόμενη ποσότητα (Mp/h)**

Η μεταφερόμενη ποσότητα θραυσμένου υλικού ανά ώρα  $Q_t$  (Mp/h) υπολογίζεται από την μεταφορική απόδοση της ταινίας  $Q$ , το ειδικό βάρος του υλικού καθώς και τον συντελεστή επιπλήσματος.

$$Q_t = \frac{Q \cdot s}{\varepsilon \cdot 1000} \quad (1.8)$$

Όπου:  $Q$  η μεταφορική απόδοση σε  $m^3/h$ ,  $s$  το ειδικό βάρος και  $\varepsilon$  ο συντελεστής επιπλήσματος

Οι απαιτήσεις για την ισχύ λειτουργίας στον άξονα του τυμπάνου επηρεάζονται κατά ένα μεγάλο ποσοστό από το βάρος του υλικού στην επιφάνεια της ταινίας. Αν η ταινία δεν γεμίζει πλήρως με υλικό τότε η μεταφερόμενη ποσότητα υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή πλήρωσης της ταινίας.

Η ισχύς λειτουργίας μίας άδειας μεταφορικής ταινίας υπολογίζεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Ισχύς κίνησης άδειας ταινίας} = \frac{C \cdot f \cdot L}{270} \cdot 3,6 \cdot G_m \cdot v \quad (1.9) \text{ ,όπου:}$$

- $C$  ο συντελεστής μήκους μεταφοράς,
- $L$  το μήκος σε μέτρα της ταινίας,
- $f$  ο συντελεστής αντιστάσεων στα έδρανα των κυλίστρων λόγω τριβών
- $G_m$  το φορτίο μεταφορέα σε  $kp$  ανά τρέχον μέτρο
- $v$  η ταχύτητα κίνησης του ιμάντα σε μέτρα ανά δευτερόλεπτο

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή μήκους  $C$  χρησιμοποιείται το Γράφημα 1.11. Ο συντελεστής  $f$  αντιστάσεων στα έδρανα των κυλίστρων λόγω τριβών λαμβάνει τιμές από 0,025 έως 0,03 για κύλινδρους με ένσφαιρους τριβείς. Η τιμή του αυξάνεται όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος λειτουργίας των κυλίστρων. Το φορτίο  $G_m$  σε  $kp$  ανά τρέχον μέτρο εξαρτάται από το πλάτος και τον τύπο του ιμάντα και η τιμή του προσδιορίζεται από τον Πίνακα 1.6.

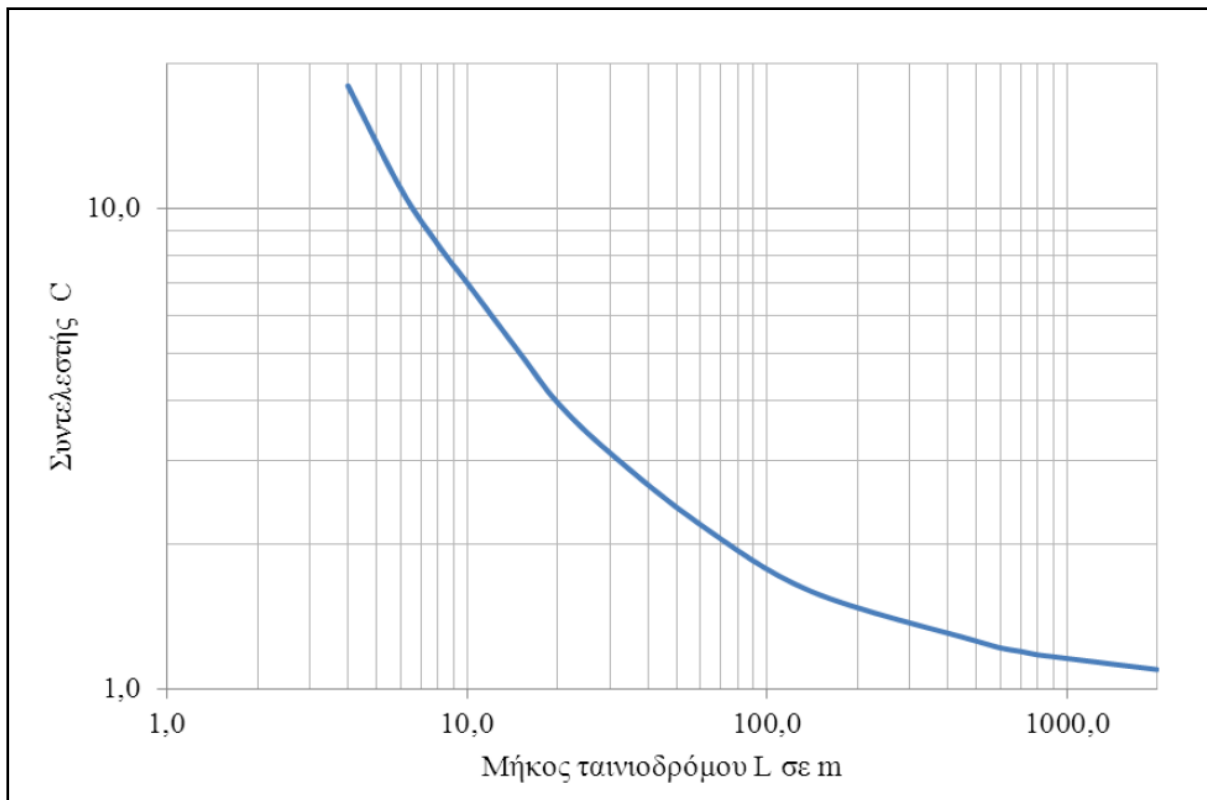
Η απαιτούμενη ισχύς για την οριζόντια κίνηση του φορτωμένου ιμάντα μεταφοράς υπολογίζεται από τη σχέση 1.10.



$$\text{Ισχύς για την οριζόντια κίνηση ταινίας} = \frac{C*f*L}{270} * Q_t \quad (1.10)$$

Τέλος η απαιτούμενη ισχύς για την ανύψωση του υλικού κατά Η μέτρα, σε περίπτωση κεκλιμένης ταινίας, υπολογίζεται από τη σχέση 1.11.

$$\text{Απαιτούμενη ισχύς ανύψωσης υλικού} = \frac{Q_t*H}{270} \quad (1.11)$$



Εικόνα 1.12:Μεταβολή του συντελεστή C με βάση το μήκος μεταφοράς [15]

Πίνακας 1.6:Βάρος μεταφορέα σε kp/m [15]

Πλάτος ιμάντα B σε mm	500	650	800	1000	Τύπος ενίσχυσης ιμάντα
Τρέχον βάρος μεταφορέα, G <sub>m</sub> , σε kp/m	24	30	38	47	Ενίσχυση λινού ή συνθετικού υφάσματος
	-	-	-	83	Ενίσχυση χαλύβδινων συρματιδίων

Η συνολικά η απαιτούμενη ισχύς  $N_a$  στον άξονα του τυμπάνου κίνησης προκύπτει από το άθροισμα των τριών προαναφερόμενων ισχύων:

*Συνολική ισχύς = ισχύς για οριζόντια κίνηση άδειας ταινίας + ισχύς για οριζόντια κίνηση υλικού επί της ταινίας + ισχύς για ανύψωση υλικού*

$$N_a = \frac{C*f*L}{270} * (3,6 * G_m * v + Q_t) + \frac{Q_t*H}{270} \quad (1.12)$$

Οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται στον τύπο 2.9 έχουν επιλεγεί για να υπολογίζεται η ισχύς σε ίππους (PS). Για τον υπολογισμό της ισχύος σε kW απαιτείται ο πολλαπλασιασμός με 0.75 (1PS =0.75kW).

#### 1.4: Υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος κατά CEMA (αναλυτική μέθοδος)

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου υπολογισμού ισχύος που βασίζεται στο πρότυπο της CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association). Οι υπολογισμοί γίνονται με βάση τις αναπτυσσόμενες τάσεις κατά μήκος του συστήματος μετάδοσης της κίνησης. Η απαιτούμενη ιπποδύναμη προκύπτει από την ενεργητική τάση στο τύμπανο κίνησης που είναι απαραίτητη για να υπερνικήσει τις τριβές και να ανυψώσει το υλικό. Λαμβάνονται επίσης υπόψη η επιτάχυνση και επιβράδυνση του συστήματος μεταφοράς. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στους υπολογισμούς ισχύος είναι οι παρακάτω:

##### **Φορτίο μεταφοράς**

Το φορτίο μεταφοράς εκφράζεται σε λίβρες ανά πόδια (*libres/feet*) και για τον προσδιορισμό του προαπαιτείται η γνώση του ειδικού βάρους μεταφερόμενου υλικού σε λίβρες ανά κυβικό πόδι ( $\frac{libres}{feet^3}$ ), καθώς και του πλάτους της μεταφορικής ταινίας σε ίντσες. Οι τιμές του φορτίου επιλέγονται από τον πίνακα 1.7.

Πίνακας 1.7: Εκτιμώμενο μέσο φορτίο μεταφοράς, lbs/ft [4]

Belt Width inches ( <i>b</i> )	Material Carried, lbs/ft <sup>3</sup>		
	30-74	75-129	130-200
18	3.5	4.0	4.5
24	4.5	5.5	6.0
30	6.0	7.0	8.0
36	9.0	10.0	12.0
42	11.0	12.0	14.0
48	14.0	15.0	17.0
54	16.0	17.0	19.0
60	18.0	20.0	22.0
72	21.0	24.0	26.0
84	25.0	30.0	33.0
96	30.0	35.0	38.0

### **Μήκος ταινιόδρομου**

Το μήκος ταινιόδρομου ορίζεται ως το μήκος της ταινίας στην επιφάνεια του εδάφους και όχι στην οριζόντια προβολή της απόστασης αυτής και δίνεται σε πόδια.

### **Ταχύτητα κίνησης μεταφορικού ιμάντα**

Η ταχύτητα κίνησης του ιμάντα ενός συστήματος ταινιόδρομου ρυθμίζεται κατά τον σχεδιασμό της παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές ιδιότητες, όπως το μέγεθος των τεμαχιδίων για το υλικό, την κλίση για τον ταινιόδρομο και το πλάτος του ιμάντα μεταφοράς. Μονάδες μέτρησης της ταχύτητας είναι η απόσταση που διανύει ο ιμάντας σε πόδια ανά λεπτό λειτουργίας του συστήματος (fpm).

### **Υψομετρική διαφορά**

Η υψομετρική διαφορά του σημείου έναρξης κίνησης του ιμάντα με το σημείο της τελικής απόθεσης του ίδιου μετριέται σε πόδια και καθορίζει σε υψηλό ποσοστό την κατανάλωση ισχύς ενός συστήματος μεταφορικών ταινιών.

### **Μεταφορική απόδοση**

Η μεταφορική απόδοση εξαρτάται από παράγοντες όπως το πλάτος και η ταχύτητα κίνησης ενός μεταφορικού ιμάντα. Η ποσότητα αυτή εκφράζεται σε τόνους θραυσμένου υλικού ανά ώρα λειτουργίας και αποτελεί έναν επιθυμητό στόχο για την κάλυψη μίας σχεδιαστικής τιμής παραγωγής ενός λατομικού χώρου.

### **Φορτίο μεταφερόμενου υλικού**

Τα φορτία που παραλαμβάνει ένα μεταφορικό σύστημα αφορούν το βάρος του ίδιου του μεταφορέα, καθώς και το βάρος του εδραζόμενου υλικού στην επιφάνεια του ιμάντα κίνησης. Οι μονάδες μέτρησης εδραζόμενου υλικού είναι οι λίβρες ανά πόδι (lbs/ft) και ο τύπος υπολογισμού 1.13:

$$W_m = \frac{33.3 * Q}{v}, \quad (1.13)$$

Όπου, Q η μεταφορική απόδοση του συστήματος σε τόνους ανά ώρα και v η ταχύτητα κίνησης του ιμάντα σε πόδια ανά λεπτό.

### **Απόσταση κυλίστρων κίνησης ιμάντα**

Η απόσταση κυλίστρων κίνησης του ιμάντα μεταφοράς εκφράζεται σε πόδια και χρησιμοποιείται στον προσδιορισμό της αντίστασης λόγω τριβών στα κύλιστα και της αντίστασης ολίσθησης μεταξύ κυλίστρων και ιμάντα του μεταφορικού συστήματος.

### **Απαιτούμενη δύναμη ιμάντα**

Ο ιμάντας μεταφοράς λειτουργεί τεταμένος, έτσι ώστε η δύναμη που αναπτύσσεται σε αυτήν την εντατική κατάσταση να υπερνικά την αντίσταση κίνησης των κυλίστρων λόγω τριβής καταλήγοντας στην περιστροφή εκείνων και τελικά στην κίνηση του ιμάντα. Η απαιτούμενη δύναμη του ιμάντα  $A_i$  επιλέγεται εμπειρικά και λαμβάνει τις παρακάτω τιμές:

- $A_i = 1,5$  για κύλιστα διαμέτρου 6 εκατοστών (CEMA C6, D6)
- $A_i = 1,8$  για κύλιστα διαμέτρου 5 εκατοστών (CEMA B5, C5, D5)
- $A_i = 2,3$  για κύλιστα διαμέτρου 4 εκατοστών (CEMA B4, C4)
- $A_i = 2,4$  για κύλιστα διαμέτρου 7 εκατοστών (CEMA E7)
- $A_i = 2,8$  για κύλιστα διαμέτρου 6 εκατοστών (CEMA E6)
- $A_i = 0$  για αναγεννητικούς ταινιόδρομους

### **Συντελεστής τριβής κυλίστρων κίνησης**

Για τον υπολογισμό των αντιστάσεων λόγω τριβής στα κύλιστα κίνησης, καθώς και των αντιστάσεων ολίσθησης μεταξύ κυλίστρων και μεταφορικού ιμάντα χρησιμοποιείται ο συντελεστής τριβής  $K_x$ . Οι αντιστάσεις εκφράζονται ως μονάδες βάρους ανά μονάδα μήκους ταινίας (lbs/ft) και ο τύπος υπολογισμού του συντελεστή αντιστάσεων αναγράφεται παρακάτω:

$$K_x = 0,00068 * (W_m + W_b) * \frac{A_i}{S_i}, \quad (1.14), \quad \text{όπου}$$

- $W_m$  είναι το φορτίο μεταφερόμενου υλικού
- $W_b$  το φορτίο μεταφορέα
- $A_i$  η απαιτούμενη δύναμη ταινίας και
- $S_i$  η απόσταση κυλίστρων κίνησης ιμάντα

Η αντίσταση περιστροφής των κυλίστρων οφείλεται πρωταρχικά σε στοιχεία όπως τα ρουλεμάν, τη σύσταση και τις ιδιότητες του γράσου, καθώς και τα μονωτικά πάματα των ίδιων. Αντίστοιχα, η αντίσταση ολίσθησης της ταινίας στην επιφάνεια των κυλίστρων αναπτύσσεται λόγω έλλειψης καθετότητας μεταξύ των κυλίστρων και της κατεύθυνσης κίνησης του μεταφορικού ιμάντα.

### ***Συντελεστής αντίστασης κάμψης ιμάντα***

Κατά την κίνηση του μεταφορικού ιμάντα πάνω από τα κύλιστα κίνησης αναπτύσσονται δυνάμεις οι οποίες αντιστέκονται στην κάμψη της ταινίας, όπως επίσης και στην κάμψη του ίδιου του μεταφερόμενου υλικού. Οι δυνάμεις αυτές υπολογίζονται ορίζοντας συντελεστή κάμψης  $K_y$ , ο οποίος επιλέγεται από τους παρακάτω πίνακες 1.8 και 1.9 με βάση το φορτίο μεταφορέα, την μεταφερόμενη ποσότητα υλικού, το μήκος και την κλίση ταινιόδρομου.

Η τιμή του συντελεστή κάμψης επιλέγεται από τους παραπάνω πίνακες για τιμές μήκους ταινιόδρομου μέχρι 3000 μέτρα με μονή κλίση και μέγιστο ποσοστό χαλάρωσης του ιμάντα μεταξύ κυλίστρων σκάφης και επιστροφής 3%. Η απόσταση μεταξύ των κυλίστρων επιστροφής θεωρείται 10 πόδια, ενώ η έδραση του υλικού στην επιφάνεια του ιμάντα ομοιόμορφη με συνεχή ροή.

Οι τιμές του συντελεστή κάμψης για άθροισμα φορτίου μεταφορέα και μεταφερόμενου υλικού μικρότερο από 50 lbs/ft αντιστοιχούν σε απόσταση κυλίστρων για το άνω μέρος της ταινίας (με φορτίο) 4,5 ft ενώ μεταξύ 50 και 99 lbs/ft σε απόσταση 4 ft. Αντιστοίχως η απόσταση για τιμές μεταξύ 100 και 149 lbs/ft είναι 3,5 ft και για 150 lbs/ft και άνω 3 ft.

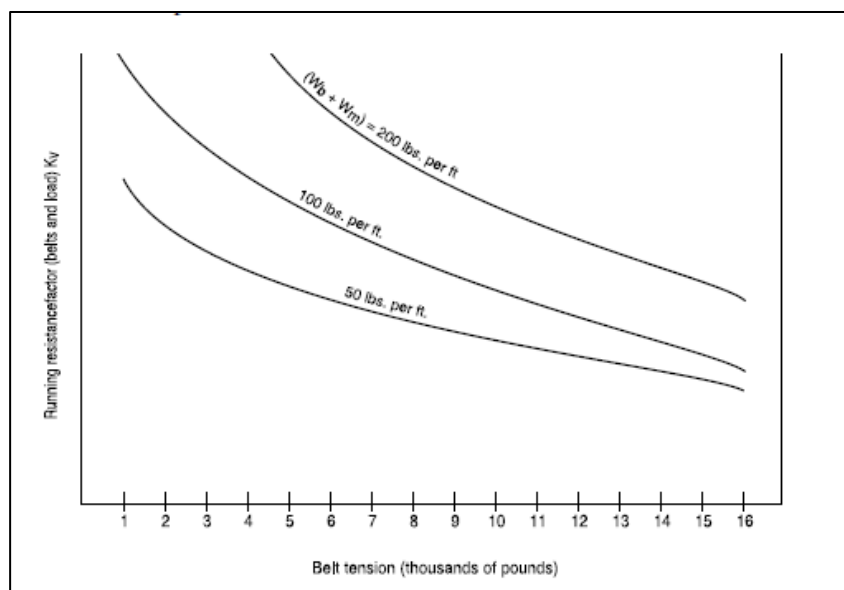
Πίνακας 1.8: Τιμές συντελεστή κάμψης  $K_y$  [4]

Conveyor Length (ft)	$W_b + W_m$ (lbs/ft)	Percent Slope						
		0	3	6	9	12	24	33
		Approximate Degrees						
		0	2	3.5	5	7	14	18
250	20	0.035	0.035	0.034	0.031	0.031	0.031	0.031
	50	0.035	0.034	0.033	0.032	0.031	0.028	0.027
	75	0.035	0.034	0.032	0.032	0.030	0.027	0.025
	100	0.035	0.033	0.032	0.031	0.030	0.026	0.023
	150	0.035	0.035	0.034	0.033	0.031	0.025	0.021
	200	0.035	0.035	0.035	0.035	0.032	0.024	0.018
	250	0.035	0.035	0.035	0.035	0.033	0.021	0.018
	300	0.035	0.035	0.035	0.035	0.032	0.019	0.018
400	20	0.035	0.034	0.032	0.030	0.030	0.030	0.030
	50	0.035	0.033	0.031	0.029	0.029	0.026	0.025
	75	0.034	0.033	0.030	0.029	0.028	0.024	0.021
	100	0.034	0.032	0.030	0.028	0.028	0.022	0.019
	150	0.035	0.034	0.031	0.028	0.027	0.019	0.016
	200	0.035	0.035	0.033	0.030	0.027	0.016	0.014
	250	0.035	0.035	0.034	0.030	0.026	0.017	0.016
	300	0.035	0.035	0.034	0.029	0.024	0.018	0.018
500	20	0.035	0.033	0.031	0.030	0.030	0.030	0.030
	50	0.034	0.032	0.030	0.028	0.028	0.024	0.023
	75	0.033	0.032	0.029	0.027	0.027	0.021	0.019
	100	0.033	0.031	0.029	0.028	0.026	0.019	0.016
	150	0.035	0.033	0.030	0.027	0.024	0.016	0.016
	200	0.035	0.035	0.030	0.027	0.023	0.016	0.016
	250	0.035	0.035	0.030	0.025	0.021	0.016	0.015
	300	0.035	0.035	0.029	0.024	0.019	0.018	0.018
600	20	0.035	0.032	0.030	0.029	0.029	0.029	0.029
	50	0.033	0.030	0.029	0.027	0.026	0.023	0.021
	75	0.032	0.030	0.028	0.026	0.024	0.020	0.016
	100	0.032	0.030	0.027	0.025	0.022	0.016	0.016
	150	0.035	0.031	0.026	0.024	0.019	0.016	0.016
	200	0.035	0.031	0.026	0.021	0.017	0.016	0.016
	250	0.035	0.031	0.024	0.020	0.017	0.016	0.016
	300	0.035	0.031	0.023	0.018	0.018	0.018	0.018
800	20	0.035	0.031	0.030	0.029	0.029	0.029	0.029
	50	0.032	0.029	0.028	0.026	0.025	0.021	0.018
	75	0.031	0.029	0.026	0.024	0.022	0.016	0.016
	100	0.031	0.028	0.025	0.022	0.020	0.016	0.016
	150	0.034	0.028	0.023	0.019	0.017	0.016	0.016
	200	0.035	0.027	0.021	0.016	0.016	0.016	0.016
	250	0.035	0.026	0.020	0.017	0.016	0.016	0.016
	300	0.035	0.025	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018

Πίνακας 1.9: Τιμές συντελεστή κάμψης  $K_y$  [4]

Conveyor Length (ft)	$W_b + W_m$ (lbs/ft)	Percent Slope						
		0	3	6	9	12	24	33
		Approximate Degrees						
		0	2	3.5	5	7	14	18
1000	50	0.031	0.028	0.026	0.024	0.023	0.019	0.016
	75	0.030	0.027	0.024	0.022	0.019	0.016	0.016
	100	0.030	0.026	0.022	0.019	0.017	0.016	0.016
	150	0.033	0.024	0.019	0.016	0.016	0.016	0.016
	200	0.032	0.023	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016
	250	0.033	0.022	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016
1400	300	0.033	0.021	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
	50	0.029	0.026	0.024	0.022	0.021	0.016	0.016
	75	0.028	0.024	0.021	0.019	0.016	0.016	0.016
	100	0.028	0.023	0.019	0.016	0.016	0.016	0.016
	150	0.029	0.020	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	200	0.030	0.021	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
2000	250	0.030	0.020	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016
	300	0.030	0.019	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
	50	0.027	0.024	0.022	0.020	0.018	0.016	0.016
	75	0.026	0.021	0.019	0.016	0.016	0.016	0.016
	100	0.025	0.020	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	150	0.026	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
2400	200	0.024	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	250	0.023	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	300	0.022	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
	50	0.026	0.023	0.021	0.018	0.017	0.016	0.016
	75	0.025	0.021	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016
	100	0.024	0.019	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
3000	150	0.024	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	200	0.021	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	250	0.021	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	300	0.020	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018
	50	0.024	0.022	0.019	0.017	0.016	0.016	0.016
	75	0.023	0.019	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
3000	100	0.022	0.017	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	150	0.022	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	200	0.019	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	250	0.018	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016
	300	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018	0.018

Η αντίσταση κάμψης του υλικού εξαρτάται από την τάση του ιμάντα μεταφοράς, τις ιδιότητες του υλικού, το σχήμα της επιφάνειας διατομής καθώς και την απόσταση μεταξύ των κυλίστρων του άνω μέρους της ταινίας (φορτωμένο). Ο παράγοντας με την μεγαλύτερη επιρροή είναι η τάση της ταινίας, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.13 για τυπικές τιμές απόστασης των κυλίστρων.



Εικόνα 1.13: Επίδραση τάσης ιμάντα στην αντίσταση κάμψης του υλικού [4]

Όσο μεγαλύτερη γίνεται η τάση του μεταφορικού ιμάντα, τόσο μεγαλύτερη γίνεται η αντίσταση στην κάμψη του υλικού. Για δεδομένη τιμή τάσης, η επίδραση του φορτίου είναι αυξητική. Σε περιπτώσεις όπου η απόσταση ανάμεσα στα κύλινδρα του φορτωμένου ιμάντα λαμβάνει διαφορετικές τιμές από τις προαναφερόμενες, η επιλογή του συντελεστή γίνεται από τον παρακάτω διορθωμένο πίνακα 1.10.

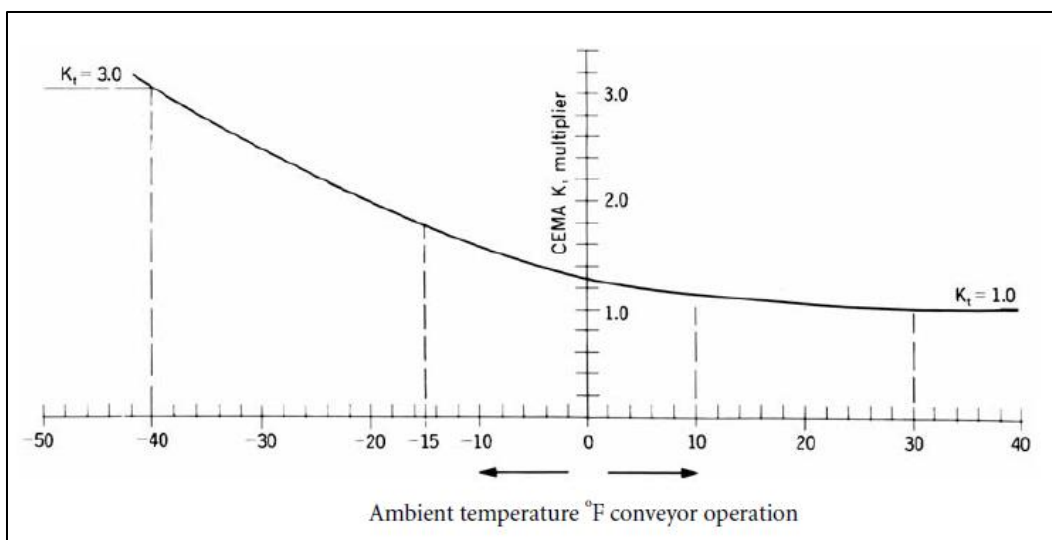


Πίνακας 1.10: Διορθωμένες τιμές συντελεστή κάμψης [4]

$W_b + W_m$ (lbs/ft)	$S_p$ (ft)	Reference Values of $K_y$ for Interpolation									
		0.016	0.018	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034
Less than 50	3.0	0.0160	0.0160	0.0160	0.0168	0.0183	0.0197	0.0212	0.0227	0.0242	0.0257
	3.5	0.0160	0.0160	0.0169	0.0189	0.0207	0.0224	0.0241	0.0257	0.0274	0.0291
	4.0	0.0160	0.0165	0.0182	0.0204	0.0223	0.0241	0.0259	0.0278	0.0297	0.0316
	4.5	0.016	0.018	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034
	5.0	0.0174	0.0195	0.0213	0.0236	0.0254	0.0273	0.0291	0.031	0.0329	0.0348
50 to 99	3.0	0.0160	0.0162	0.0173	0.0186	0.0205	0.0221	0.0239	0.026	0.0274	0.029
	3.5	0.0160	0.0165	0.0185	0.0205	0.0222	0.024	0.0262	0.0281	0.030	0.0321
	4.0	0.016	0.018	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034
	4.5	0.0175	0.0193	0.0214	0.0235	0.0253	0.0272	0.0297	0.0316	0.0335	0.035
	5.0	0.0184	0.021	0.023	0.0253	0.027	0.029	0.0315	0.0335	0.035	0.035
100 to 149	3.0	0.0160	0.0164	0.0186	0.0205	0.0228	0.0246	0.0267	0.0285	0.0307	0.0329
	3.5	0.016	0.018	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034
	4.0	0.0175	0.0197	0.0213	0.0234	0.0253	0.0277	0.0295	0.0312	0.033	0.035
	4.5	0.0188	0.0213	0.0232	0.0253	0.0273	0.0295	0.0314	0.033	0.0346	0.035
	5.0	0.0201	0.0228	0.0250	0.0271	0.0296	0.0316	0.0334	0.035	0.035	0.035
150 to 199	3.0	0.016	0.018	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034
	3.5	0.0172	0.0195	0.0215	0.0235	0.0255	0.0271	0.0289	0.031	0.0333	0.0345
	4.0	0.0187	0.0213	0.0235	0.0252	0.0267	0.0283	0.0303	0.0325	0.0347	0.035
	4.5	0.0209	0.023	0.0253	0.0274	0.0289	0.0305	0.0323	0.0345	0.035	0.035
	5.0	0.0225	0.0248	0.0272	0.0293	0.0311	0.0328	0.0348	0.035	0.035	0.035
200 to 249	3.0	0.016	0.018	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.030	0.032	0.034
	3.5	0.0177	0.0199	0.0216	0.0235	0.0256	0.0278	0.0295	0.031	0.0327	0.0349
	4.0	0.0192	0.0216	0.0236	0.0256	0.0274	0.0291	0.0305	0.0322	0.0339	0.035
	4.5	0.021	0.0234	0.0253	0.0276	0.0298	0.0317	0.0331	0.0347	0.035	0.035
	5.0	0.0227	0.0252	0.0274	0.0298	0.0319	0.0338	0.035	0.035	0.035	0.035

### Διορθωτικός συντελεστής θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Σε χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος παρατηρείται κατά τη λειτουργία ενός μεταφορικού συστήματος ταινιόδρομου αύξηση στις αντιστάσεις περιστροφής κυλίστρων, καθώς και στην ευκαμψία του ιμάντα μεταφοράς. Σε πολύ ακραίες συνθήκες ψύχους κρίνεται σημαντική η επιλογή κατάλληλης σύστασης γράσου για την μείωση των αντιστάσεων. Για να συμπεριληφθεί ο παράγοντας της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος στον υπολογισμό των αναπτυσσόμενων τάσεων χρησιμοποιείται ένας διορθωτικός συντελεστής (Εικόνα 1.14). Οι αυξημένες αντιστάσεις δημιουργούν μεγαλύτερες ενεργειακές απαιτήσεις για την λειτουργία του ταινιόδρομου, συνεπώς η χρήση του συντελεστή αυτού συμβάλει στην καλύτερη σχεδίαση ενός τέτοιου συστήματος.



Εικόνα 1.14: Διορθωτικός συντελεστής θερμοκρασίας περιβάλλοντος  $K_t$  [4]

### Συνολική αναπτυσσόμενη τάση ιμάντα λόγω εξαρτημάτων ταινιόδρομου

Η τυπική λειτουργία ενός συστήματος ταινιόδρομου περιέχει πολυάριθμα μηχανικά μέρη, τα οποία εξυπηρετούν διαφορετικές ανάγκες αλλά αναπτύσσουν αντιστάσεις κατά την κίνηση του μεταφορικού ιμάντα και λειτουργούν αυξητικά όσον αφορά τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος. Η συνολικά αναπτυσσόμενη τάση  $T_{ac}$  (lbs) δίνεται από τον τύπο 1.15:

$$T_{ac} = T_{sb} + T_{bc} + T_{pl} + T_{tr} \quad (1.15)$$

Όπου:

- $T_{sb}$  η αναπτυσσόμενη τάση λόγω τριβής του προστατευτικού καλύμματος ιμάντα (lbs)
- $T_{tr}$  η αναπτυσσόμενη τάση λόγω τριβής στα τύμπανα καθώς και κάμψης του ιμάντα (lbs)
- $T_{pl}$  η αναπτυσσόμενη τάση λόγω τριβής του ιμάντα μεταφοράς με τις λεπίδες απόθεσης και ανακατεύθυνσης του υλικού (lbs)
- $T_{bc}$  η αναπτυσσόμενη τάση λόγω τριβής του ιμάντα με τα εξαρτήματα καθαρισμού του (lbs)

Η τριβή που αναπτύσσεται στα τύμπανα προέρχεται από δύο διαφορετικές πηγές. Η πρώτη εμφανίζεται ως αντίσταση της ίδιας της ταινίας να καμφθεί γύρω από τα τύμπανα. Η αντίσταση αυτή είναι συνάρτηση της διαμέτρου των τυμπάνων καθώς και της σκληρότητας του ιμάντα μεταφοράς, η οποία εξαρτάται από την κατασκευή του και τις συνθήκες θερμοκρασίας που αναπτύσσονται στο περιβάλλον. Η δεύτερη πηγή είναι η αντίσταση στην στρέψη των ίδιων των τυμπάνων και προκαλείται από τριβές λόγω επαφής των ρουλεμάν, της ελλιπούς λίπανσης και της επαφής με προστατευτικά καλύμματα.

Συμπερασματικά, η συνολική αναπτυσσόμενη τάση λόγω εξαρτημάτων υπολογίζεται ως το άθροισμα της αντίστασης λόγω τριβής της ταινίας με το προστατευτικό κάλυμμα της ίδιας και της αντίστασης στρέψης των τυμπάνων, όπως περιγράφεται στη σχέση 1.16:

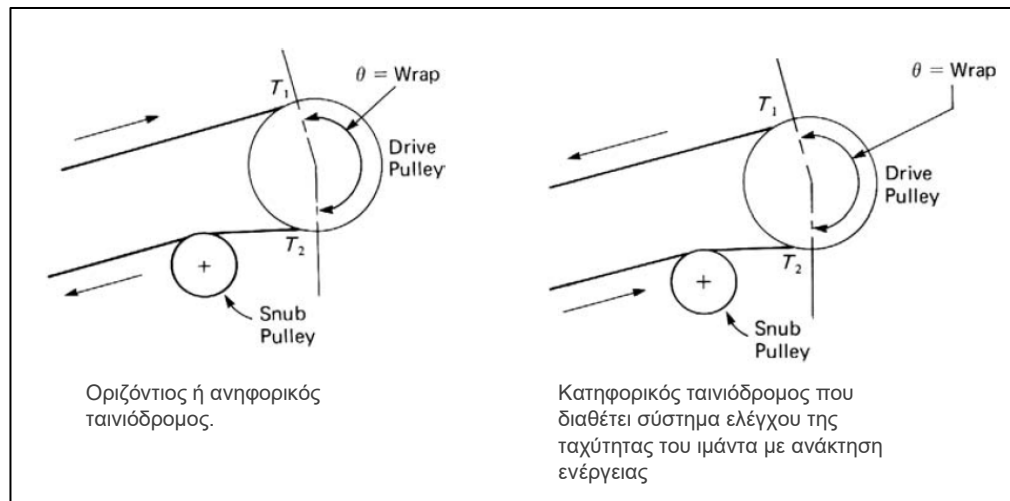
$$T_{ac} = T_{tr} + T_{sb} \quad (1.16)$$

Η κίνηση της μεταφορικής ταινίας γίνεται εφικτή έπειτα από διάδοση κινητήριων δυνάμεων μεταξύ της ίδιας και των τυμπάνων κίνησης (drive pulley) του συστήματος. Η διάδοση αυτή είναι το αποτέλεσμα δυνάμεων τριβής που αναπτύσσονται μεταξύ των επιφανειών εκείνων. Για να πραγματοποιηθεί απαιτείται μία διαφορά δυνάμεων μεταξύ του δυνάμεων του ελκόμενου ( $T_1$ ) και μη ελκόμενου ( $T_2$ ) κλάδου της ταινίας γύρω από τύμπανο (Εικόνα 1.15). Η διαφορά αυτή ισούται με τη δύναμη στρέψης  $T_{tr}$ .

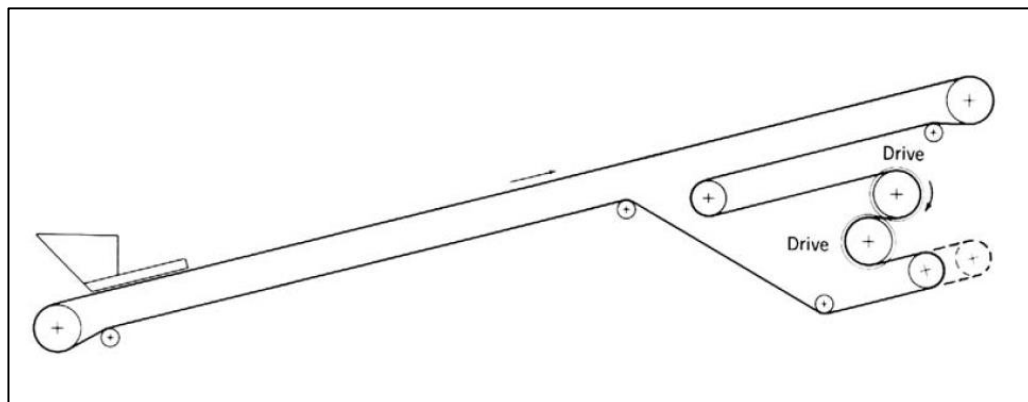
Η αντίσταση στρέψης  $T_{tr}$  στα μη οδηγητικά τύμπανα (pulleys) υπολογίζεται με βάση την γωνία επαφής του μεταφορικού ιμάντα και των ίδιων. Κατά την κίνηση και επαφή του ιμάντα πάνω στα τύμπανα αναπτύσσονται δύο διαφορετικών ειδών δυνάμεις, με την πρώτη να ορίζεται η δύναμη στο ελκόμενο κλάδο ( $T_1$ ) και την δεύτερη ως η δύναμη στον μη ελκόμενο ( $T_2$ ). Για ορισμένες τιμές συνήθεις της γωνίας επαφής, οι τιμές των δυνάμεων υπολογίζονται για κάθε τύμπανο του συστήματος από τον παρακάτω πίνακα 1.11 (εκφράζονται σε lbs).

Πίνακας 1.11: Απαιτούμενη δύναμη ανά τύμπανο σε σχέση με τον τύπο του τυμπάνου και τη γωνία επαφής τυμπάνου και ιμάντα. [4]

Location of Pulleys	Degrees Wrap of Belt	Pounds of Tension at Belt Line
Tight side	150° to 240°	200 lbs/pulley
Slack side	150° to 240°	150 lbs/pulley
All other pulleys	less than 150°	100 lbs/pulley
<b>Note:</b> Double the above values for pulley shafts that are not operating in antifriction bearings.		



Εικόνα 1.15: Αναπτυσσόμενες δυνάμεις και κινηματικές συνθήκες στο τύμπανο κίνησης για επίπεδο ή ανηφορικό ταινιόδρομο και για κατηφορικό ταινιόδρομο που διαθέτει σύστημα ελέγχου της ταχύτητας του ιμάντα με ανάκτηση ενέργειας [4]



Εικόνα 1.16: Τυπική διάταξη ανηφορικού ταινιόδρομου [4]

Με βάση τις τιμές του πίνακα 1.11, η απαιτούμενη δύναμη  $T_{tr}$  για την κίνηση του ιμάντα για μια τυπική διάταξη ενός ανηφορικού ταινιόδρομου όπως αυτού που δίνεται στην εικόνα 1.16 και έχει 2 οδηγητικά τύμπανα (Drive), είναι:

$$T_{tr} = 2 * 200 + 2 * 150 + 4 * 100 = 1100 \text{ lbs} \quad (1.17)$$

Το τελικό βήμα για την υπολογισμό της συνολικής δύναμης ιμάντα, με βάση τις προαναφερόμενες παραδοχές είναι ο υπολογισμός της δύναμης που απαιτείται για την κίνηση του ίδιου, όταν αυτός έρχεται σε επαφή με το προστατευτικό κάλυμμά του. Ο τύπος για τον υπολογισμό της τάσης αυτής είναι:

$$T_{sb} = T + 3 * 2 * L_b \quad (1.18)$$

Όπου, T είναι η απαιτούμενη τάση του ιμάντα έτσι ώστε να υπερνικηθεί η τριβή που αναπτύσσεται από τα δύο παράλληλα πλαστικά καλύμματα (lbs) και  $L_b$  είναι το μήκος του προστατευτικού καλύμματος σε πόδια. Στην παραπάνω τάση προστίθενται τρεις λίβρες για κάθε μονάδα μήκους προστατευτικού καλύμματος και για τις δύο πλευρές της μεταφορικής ταινίας με την οποία αυτό έρχεται σε επαφή. Η απαιτούμενη δύναμη T υπολογίζεται από το γινόμενο των παρακάτω όρων:

$$T = C_s * L_b * h_s^2 \quad (1.19)$$

Όπου:

- $C_s$  ο παράγοντας τριβής, ο οποίος επιλέγεται από τον πίνακα 1.12 και εξαρτάται από τις ιδιότητες του εκάστοτε υλικού
- $L_b$  το μήκος του προστατευτικού καλύμματος του μεταφορικού ιμάντα σε πόδια
- $h_s$  το βάθος του υλικού που έρχεται σε επαφή με το προστατευτικό κάλυμμα σε ίντσες

Πίνακας 1.12: Συντελεστής τριβής υλικού  $C_s$  [4]

Material	Factor $C_s$	Material	Factor $C_s$	Material	Factor $C_s$
Alumina, pulv. dry	0.1210	Coke, ground fine	0.0452	Limestone, pulv., dry	0.1280
Ashes, coal, dry	0.0571	Coke, lumps and fines	0.0186	Magnesium chloride, dry	0.0276
Bauxite, ground	0.1881	Copra, lumpy	0.0203	Oats	0.0219
Beans, navy, dry	0.0798	Cullet	0.0836	Phosphate rock, dry, broken	0.1086
Borax	0.0734	Flour, wheat	0.0265	Salt, common, dry, fine	0.0814
Bran, granular	0.0238	Grains, wheat, corn or rye	0.0433	Sand, dry, bank	0.1378
Cement, Portland, dry	0.2120	Gravel, bank run	0.1145	Sawdust, dry	0.0086
Cement clinker	0.1228	Gypsum, ½" screenings	0.0900	Soda ash, heavy	0.0705
Clay, ceramic, dry fines	0.0924	Iron ore, 200 lbs/cu ft	0.2760	Starch, small lumps	0.0623
Coal, anthracite, sized	0.0538	Lime, burned, ⅛"	0.1166	Sugar, granulated dry	0.0349
Coal, bituminous, mined	0.0754	Lime, hydrated	0.0490	Wood chips, hogged fuel	0.0095

Στον πίνακα 1.13 συνοψίζονται όλοι οι παράμετροι που απαιτούνται για τον αναλυτικό υπολογισμό της απαιτούμενης ισχύος για τη κίνηση του ταινιοδρόμου σύμφωνα με το την CEMA.

Πίνακας 1.13: Παράμετροι αναλυτικού μοντέλου υπολογισμού ισχύος κατά CEMA

Συμβολισμός	Παράμετροι μοντέλου	Μονάδες μέτρησης
$W_b$	Φορτίο Μεταφοράς	lbs/ft
$L$	Οριζόντια προβολή μήκους	ft
$V$	Ταχύτητα κίνησης ταινιόδρομου	fpm
$H$	Υψομετρική διαφορά μεταφερόμενου υλικού	ft
$Q$	Μεταφερόμενη ποσότητα υλικού	tph
$S_i$	Απόσταση υποβαστακτικών κυλίνδρων (πάνω μέρος ταινίας)	ft
$T_e$	Θερμοκρασία περιβάλλοντος	°F
$b$	Πλάτος ταινίας	in
$SW$	Ειδικό βάρος μεταφερόμενου υλικού	lbs/cu ft
$Drive$	Τύπος κινητήρα	-
$Wrap$	Γωνία επαφής	degrees
$C_w$	Συντελεστής επαφής για κινητήριο τύμπανο	-
$C_w$	Συντελεστής επαφής για δίδυμη έλξη I	-
$W_m$	Φορτίο μεταφερόμενου υλικού	lbs/ft
$K_t$	Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας περιβάλλοντος	-
$K_x$	Συντελεστής αντίστασης τριβής μεταξύ κυλίστρων/κυλίστρων-ταινίας	-
$K_y$	Συντελεστής λειτουργίας φορτωμένου ταινιόδρομου	-
$A_i$	Απαιτούμενη δύναμη ταινίας για να υπερνικήσει την τριβή αντίστασης στα κύλιστα κίνησης	lbs
$C_s$	Συντελεστής τριβής με προστατευτικές πλευρικές επιφάνειες	-
$L_b$	Διάκενο κυλίστρων επιστροφής	ft
$h_s$	10% του πλάτους ταινίας	ft
$T$	Δύναμη για υπερνίκηση της τριβής με προστατευτικές πλευρικές επιφάνειες	lbs
$T_{sb}$	Συνολική αντίσταση από τις προστατευτικές πλευρικές επιφάνειες	lbs
$f$	Συντελεστής τριβής με τα μη κινητήρια τύμπανα	lbs
$T_e$	Ενεργητική δύναμη για την κίνηση της ταινίας	lbs
$N$	Απαιτούμενη ισχύς για την κίνηση της ταινίας	hp
$L_f$	Απώλειες λόγω τριβών οδηγητικών τυμπάνων	hp
$L_d$	Απώλειες λόγω μείωσης της ταχύτητας	hp
$N_a$	Απαιτούμενη ισχύς στον άξονα του κινητήρα	hp

Όπως προαναφέρθηκε, σε ένα τυπικό σύστημα ταινιόδρομου αναπτύσσονται αντιστάσεις κατά την κίνηση του ιμάντα μεταφοράς. Οι αντιστάσεις αυτές θα πρέπει να περιληφθούν η κάθε μία ξεχωριστά για τον τελικό υπολογισμό της ενεργητικής δύναμης του ιμάντα. Η δύναμη αυτή, είναι προαπαιτούμενη για την κίνηση του οδηγητικού τυμπάνου συστήματος, όταν αυτό λειτουργεί με την ταχύτητα μεταφοράς που έχει σχεδιαστεί. Οι αναπτυσσόμενες αντιστάσεις εμφανίζονται με την μορφή των παρακάτω δυνάμεων:

- 1) Η βαρύτητα που ασκείται κατά την μεταφορά του υλικού από ανώτερο σε χαμηλότερο υψόμετρο ή το αντίστροφο.
- 2) Η τριβή, η οποία αναπτύσσεται λόγω επαφής του ιμάντα μεταφοράς με τα διαφορετικά εξαρτήματα του συστήματος, καθώς και με το σύστημα κίνησης του ίδιου, όταν αυτό λειτουργεί με την ονομαστική του απόδοση.
- 3) Η αντίσταση λόγω τριβής του ίδιου του μεταφερόμενου υλικού.

4) Η δύναμη που απαιτείται για την συνεχή επιτάχυνση της ταινίας όταν τροφοδοτείται με υλικό.

Η ενεργητική δύναμη  $T_e$  εκφράζεται σε λίβρες και ο τύπος υπολογισμού εκείνης για σύστημα ανηφορικού ταινιοδρόμου δίνεται από την σχέση :

$$T_e = L * K_t (K_x + K_y * W_b + 0.015 W_b) + W_m * (L * K_y + H) + T_{ac} \quad (1.20)$$

Η απαιτούμενη ισχύς για την κίνηση και λειτουργία ενός συστήματος ταινιοδρόμου υπολογίζεται με βάση την αναπτυσσόμενη ενεργητική δύναμη κατά την επιτάχυνση και επιβράδυνση του μεταφορικού ιμάντα, όταν εκείνος κινείται ταχύτητας  $V$  [feet per minute]. Η ισχύς του κινητήρα υπολογίζεται σε ίππους (hp) και ο τύπος υπολογισμού είναι:

$$Ισχύς (hp) = \frac{T_e * V}{33000} \quad (1.21)$$

Στην συνολική ισχύ λειτουργίας του μεταφορικού συστήματος προστίθεται η ισχύς που καταναλώνεται κατά την περιστροφή των οδηγητικών τυμπάνων λόγω αναπτυσσόμενων τριβών. Αν θεωρηθεί ότι το σύστημα διαθέτει δύο οδηγητικά τύμπανα (εικόνα 2.3), η καταναλισκόμενη ισχύς λόγω τριβών υπολογίζεται μέσω του πίνακα 2.11 για γωνία επαφής ιμάντα και τροχαλιών τις 240 μοίρες. Λαμβάνοντας ως σχεδιαστική τιμή ταχύτητας κίνησης της μεταφορικής ταινίας τα 500 πόδια ανά λεπτό και αναπτυσσόμενη δύναμη της ίδιας τις 200 λίβρες ανά τύμπανο, η ισχύς λόγω τριβών υπολογίζεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$Ισχύς \text{ λόγω τριβών στα οδηγητικά τύμπανα} = \frac{2 * 200 * 500}{33.000} = 6,06 \text{ hp} \quad (1.22)$$

Στη συνολική ιπποδύναμη του άξονα μετάδοσης κίνησης του κινητήρα προστίθεται η απώλεια ισχύος λόγω μείωσης της ταχύτητας του μεταφορικού ιμάντα. Η ταχύτητα αυτή θεωρείται ότι έχει μία μέση σταθερή τιμή καθόλη τη διάρκεια λειτουργίας του μεταφορικού συστήματος. Παρόλα αυτά εμφανίζονται διακυμάνσεις, οι οποίες οφείλονται σε χειρισμούς κατά τη λειτουργία και αφορούν πολλές φορές την μείωση της με σκοπό την σταθεροποίηση της ροής του υλικού, την αποφυγή φθορών μηχανικού εξοπλισμού καθώς και την ομαλή κίνηση του ιμάντα μεταφοράς πάνω από τα κύλινδρα. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για την επίτευξη των παραπάνω στόχων κατά την ελεγχόμενη μείωση της ταχύτητας μπορεί να είναι είτε μηχανικός είτε ηλεκτρικός και η βέλτιστη χρήση του γίνεται στο ξεκίνημα λειτουργίας του συστήματος, καθώς και σε περιπτώσεις ανοδικής ή καθοδικής κίνησης του ιμάντα μεταφοράς, όπου ο έλεγχος της κίνησης γίνεται απαραίτητος δεδομένων των βαρυτικών συνθηκών. Με βάση τους κανονισμούς της CEMA οι απώλειες λόγω μείωσης της ταχύτητας κίνησης του ιμάντα μεταφοράς λαμβάνουν τιμές της τάξης του 5%. Το ποσοστό υπολογίζεται στο άθροισμα των δύο προαναφερόμενων τιμών.

### 1.5: Απλοποιημένος υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος κατά CEMA (γραφική μέθοδος)

Ο απλοποιημένος υπολογισμός απαιτούμενης ισχύος κατά CEMA βασίζεται στη χρήση κατάλληλων γραφημάτων (νομογράμματα). Είναι κατάλληλη για τον υπολογισμό της ιπποδύναμης σε συστήματα ταινιοδρόμων με μεσαία δυναμικότητα και με σχετικά ευθεία κατεύθυνση. Η μέθοδος αυτή δεν ενδείκνυται για τον υπολογισμό της ιπποδύναμης σε κεκλιμένα συστήματα ταινιοδρόμων μεγάλης δυναμικότητας, πολυπλοκότητας κινητήρων, καθώς και συστημάτων με μεγάλο αριθμό προστατευτικών καλυμμάτων και διατάξεων καθαρισμού και ανακατεύθυνσης του υλικού, τα οποία αυξάνουν τις αντιστάσεις κατά την κίνηση του ιμάντα λόγω τριβών.

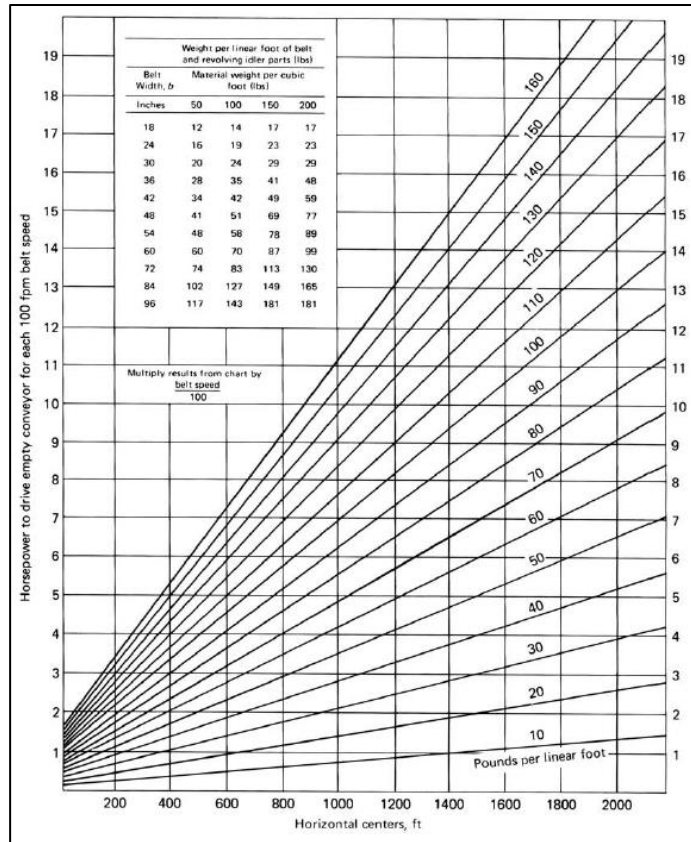
Η συνολική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση ενός ταινιοδρόμου με συγκεκριμένη δυναμικότητα και χαρακτηριστικά υπολογίζεται με τη βοήθεια νομογραμμάτων ως το άθροισμα :

1. της ισχύος που απαιτείται για την οριζόντια κίνηση του άδειου ταινιοδρόμου
2. της ισχύος που απαιτείται για την οριζόντια κίνηση του υλικού που είναι στον ταινιοδρόμο
3. της ισχύος που απαιτείται για την ανύψωση του υλικού (εφόσον πρόκειται για κεκλιμένο ταινιοδρόμο)
4. την προσαύξηση κατά 5% του αθροίσματος των 1,2,3.

Η ισχύς της άδειας μεταφορικής ταινίας υπολογίζεται από το νομόγραμμα της εικόνας 1.15 με βάση το μήκος διαδρομής, το πλάτος του μεταφορικού ιμάντα και το βάρος του κενού ελαστικού ιμάντα ανά μονάδα μήκους (lb/ft). Η υπολογιζόμενη αυτή τιμή αντιστοιχεί σε ταχύτητα κίνησης 100 fpm (feet per minute), οπότε για διαφορετική ταχύτητα η απαιτούμενη ισχύς σε hp δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Απαιτούμενη ισχύς κίνηση άδειας ταινίας (hp)} = \frac{\text{τιμή διαγράμματος} * \text{ταχύτητα}}{100} \quad (1.23)$$

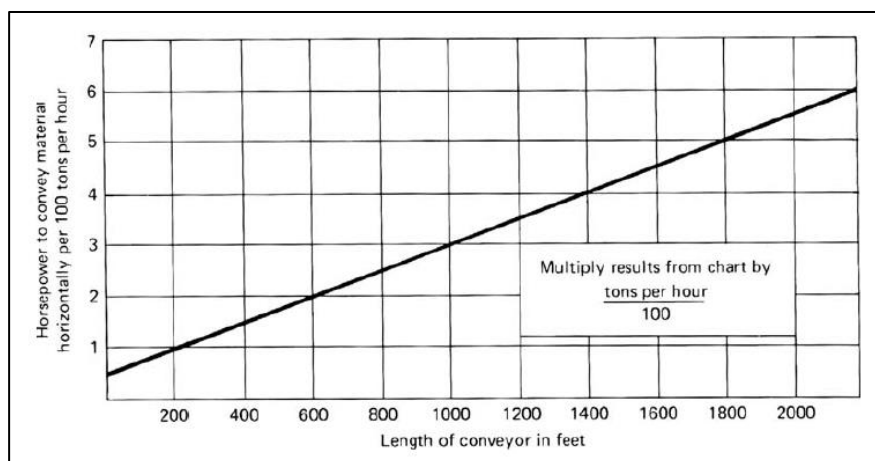




Εικόνα 1.17: Ιπποδύναμη για την κίνηση άδειας μεταφορικής ταινίας [4]

Η απαιτούμενη ισχύς για την οριζόντια μεταφορά του υλικού επί της ταινίας υπολογίζεται από το νομόγραμμα της εικόνας 1.17 με βάση το μήκος της ταινίας (feet). Η υπολογιζόμενη αυτή τιμή αντιστοιχεί για μεταφορική ικανότητα 100t ανά ώρα (tph), οπότε για διαφορετική μεταφορική ικανότητα η απαιτούμενη ισχύς σε hp δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

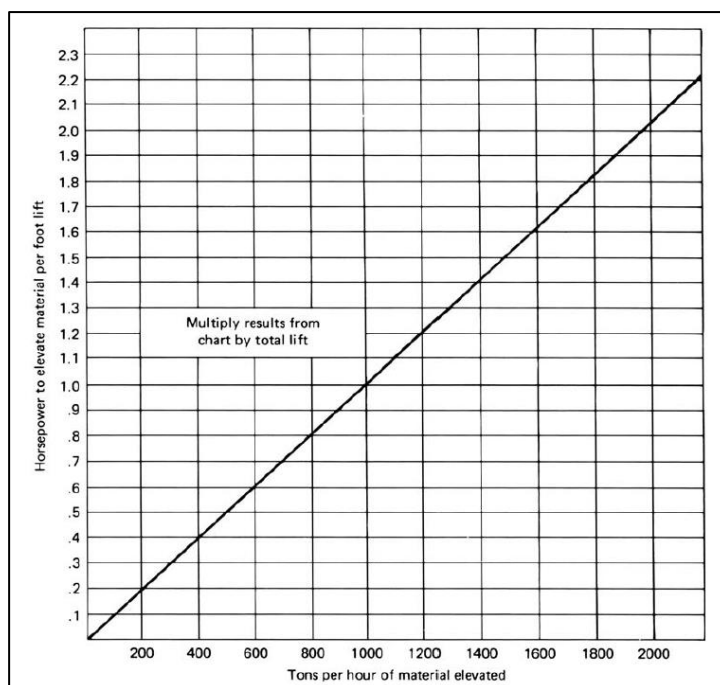
$$\text{Απαιτούμενη ισχύς οριζόντιας κίνησης υλικού (hp)} = \frac{\text{τιμή διαγράμματος} * \text{μεταφορική ικανότητα (tph)}}{100} \quad (1.24)$$



Εικόνα 1.18:Διάγραμμα υπολογισμού απαιτούμενης ισχύος για την οριζόντια μετακίνηση του υλικού [4]

Η απαιτούμενη ισχύς για την ανύψωση του υλικού υπολογίζεται από το νομόγραμμα της εικόνας 1.18 με βάση την μεταφορική ικανότητα του συστήματος εκφρασμένη σε τόνους ανά ώρα (tph). Η υπολογιζόμενη αυτή τιμή αντιστοιχεί για ανύψωση του υλικού κατά 1 ft, οπότε για διαφορετική υψομετρική διαφορά η απαιτούμενη ισχύς σε hp δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

Απαιτούμενη ισχύς για την ανύψωση του υλικού (hp) = τιμή διαγράμματος \* υψομετρική διαφορά (ft) (1.25)



Εικόνα 1.19:Απαραίτητη ιπποδύναμη για την ανύψωση υλικού [4]

Τέλος η συνολική απαιτούμενη ισχύς υπολογίζεται αφού ληφθεί υπόψη και η προσαύξηση 5%, όπως παρακάτω:

*Συνολική ισχύς (hp) = 1,05x[ ισχύς για οριζόντια κίνηση άδειας ταινίας + ισχύς για οριζόντια κίνηση υλικού + ισχύς για την ανύψωση του υλικού ] (1.26)*

Οι μονάδες για τα χρησιμοποιούμενα μεγέθη είναι οι παρακάτω:

- Μήκος διαδρομής σε πόδια (ft)
- Πλάτος ιμάντα μεταφοράς σε ίντσες (in)
- Ειδικό βάρος υλικού σε λίβρες ανά κυβικά πόδια (lbs/cu ft)
- Τρέχον φορτίο μεταφοράς σε λίβρες ανά πόδια (lbs/ft)
- Ταχύτητα κίνησης ταινίας σε πόδια ανά λεπτό (fpm)
- Ισχύς σε ίππους (hp)

## 1.6: Σύγκριση μεθόδων υπολογισμού της απαιτούμενης ισχύος και απόδοσης

Για τη σύγκριση των διαφόρων μεθόδων υπολογισμού της απαιτούμενης ισχύος έγινε υπολογισμός για μια διάταξη ταινιοδρόμου με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- α) Μήκος διαδρομής = 2000 πόδια
- β) Υψομετρική διαφορά = 200 πόδια
- γ) Ταχύτητα κίνησης μεταφορικού ιμάντα = 500 πόδια ανά λεπτό
- δ) Ειδικό βάρος μεταφερόμενου υλικού = 150 λίβρες ανά κυβικό πόδι (ασβεστόλιθος)
- ε) Πλάτος ιμάντα = 39 ίντσες
- στ) Φορτίο μεταφοράς = 55 λίβρες ανά μέτρο

Τα παραπάνω στοιχεία αφορούν την διάταξη του συστήματος, καθώς και το υλικό μεταφοράς και αποτελούν την βάση του σχεδιασμού ενός μεταφορικού συστήματος. Εκτός των παραπάνω παρατίθενται επιπλέον στοιχεία που χρειάζονται για τις αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού της ισχύος:

- ζ) Απόσταση διαδοχικών κυλίστρων = 4 πόδια
- η) Δύο προστατευτικά καλύμματα μήκους 15 ποδιών
- θ) Θερμοκρασία περιβάλλοντος 32 βαθμοί Fahrenheit
- ι) Συντελεστής επιπλήσματος υλικού = 1,3
- κ) Συντελεστής αντιστάσεων λόγω τριβών = 0,025
- λ) Κλίση πλευρικών κυλίστρων = 20 μοίρες
- μ) Συντελεστής πλήρωσης ταινίας = 0,8
- ν) Κύλίστρα διαμέτρου 6 εκατοστόμετρων

Οι μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν ανά υπολογιστικό μοντέλο ,καθώς και οι παράμετροι εισαγωγής με τις αναφερόμενες τιμές του σεναρίου που κατασκευάζεται αναγράφονται στον πίνακα 1.14 που ακολουθεί.

Πίνακας 1.14:Μονάδες υπολογιστικών μοντέλων

Παράμετροι εισαγωγής	DIN-ISO	Μονάδες	CEMA	Μονάδες
Μήκος διαδρομής	609,6	metres	2000	feet
Ταχύτητα κίνησης ιμάντα	2,54	m/s	500	fpm
Ειδικό βάρος υλικού	2400	Kg/m <sup>3</sup>	150	Lbs/cu ft
Υψομετρική διαφορά	61	metres	200	feet
Πλάτος ιμάντα	1000	millimetres	39	inches
Φορτίο μεταφορέα	83	kp/m	55	Lbs/ft
Μεταφερόμενη ποσότητα υλικού	1461	Tones / hour	1600	Tones / hour
Κλίση ιμάντα	5,7	degrees	10	Percentage %

Σημειώνεται ότι η μεταφερόμενη ποσότητα υλικού αποτελεί παράμετρο εισαγωγής κατά CEMA, σε αντίθεση με το μοντέλο κατά DIN, όπου εμφανίζεται ως υπολογιζόμενο μέγεθος.

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα και τις σχέσεις υπολογισμού της ισχύος κατά DIN προκύπτουν οι παρακάτω ενδιάμεσοι υπολογισμοί και ο τελικός υπολογισμός της απαιτούμενης ισχύος:

- α) Συντελεστής μήκους μεταφοράς = 1,15
- β) Σταθερά πλευρικών κυλίστρων  $\xi = 440$
- γ) Συντελεστής διόρθωσης λόγω κλίσης = 0,98
- δ) Επιφάνεια διατομής υλικού  $F = 0,09 \text{ m}^2$
- ε) Μεταφορική απόδοση ταινιόδρομου  $Q = 791,3 \text{ m}^3/\text{h}$
- στ) Μεταφερόμενη ποσότητα  $Q_i = 1460,9 \text{ t/h}$
- ζ) Ισχύς ανύψωσης υλικού = 325,3 Hp
- η) Απαιτούμενη ισχύς  $N_a = 473,98 \text{ Ps} \rightarrow \mathbf{467,3 \text{ hp}}$

Για τον αναλυτικό υπολογισμό ισχύος κατά CEMA προκύπτουν τα παρακάτω ενδιάμεσα αποτελέσματα και η απαιτούμενη ισχύς:

- α) Φορτίο μεταφερόμενου υλικού  $W_m = 106,6 \text{ lbs/ft}$
- β) Συντελεστής διόρθωσης θερμοκρασίας  $K_t = 1$
- γ) Συντελεστής τριβής κυλίστρων κίνησης  $K_x = 0,4853$
- δ) Συντελεστής κάμψης ταινίας  $K_y = 0,016$

ε) Δύναμη για την υπερνίκηση τριβής λόγω προστατευτικού καλύμματος  $T = 19,9 \text{ lbs}$

στ) Συνολική αντίσταση προστατευτικού καλύμματος  $T_{sb} = 109,9 \text{ lbs}$

ζ) Δύναμη για την στρέψη τυμπάνων  $T_{tr} = 1100 \text{ lbs}$

η) Συνολική αναπτυσσόμενη δύναμη λόγω εξαρτημάτων  $T_{ac} = 1209,9 \text{ lbs}$

ι) Ενεργητική δύναμη ταινίας  $T_e = 30353,96 \text{ lbs}$

κ) Απαιτούμενη ισχύς για την κίνηση της ταινίας  $= 459,91 \text{ hp}$

λ) Απώλειες λόγω μείωσης ταχύτητας  $= 23 \text{ hp}$

μ) Απώλειες λόγω τριβών οδηγητικών τροχαλίων  $= 6,06 \text{ hp}$

μ) Συνολική απαιτούμενη ισχύς  $= 488,96 \text{ hp}$

Για τον προσεγγιστικό υπολογισμό ισχύος κατά CEMA (μέσω των νομογραμμάτων) προκύπτουν τα παρακάτω ενδιάμεσα αποτελέσματα και η απαιτούμενη ισχύς:

α) Απαιτούμενη ισχύς για την οριζόντια κίνηση άδειας μεταφορικής ταινίας  $= 35 \text{ hp}$

β) Απαιτούμενη ισχύς για την οριζόντια κίνηση φορτωμένης ταινίας  $= 88 \text{ hp}$

γ) Απαιτούμενη ισχύς για την ανυψωτική κίνηση μεταφορικής ταινίας  $= 325 \text{ hp}$

δ) Συνολική ισχύς λειτουργίας  $= 470,53 \text{ hp}$

Παρατηρείται απόκλιση περίπου 20 ίπων στην τιμή της συνολικής ισχύς λειτουργίας του συστήματος, μεταξύ των δύο αναλυτικών μεθόδων. Η απόκλιση είναι της τάξης του 4 τοις εκατό και μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η μεταφερόμενη ποσότητα δεν είναι κοινή για τα δύο μοντέλα υπολογισμού. Η ιδιαιτερότητα αυτή προκύπτει καθώς στη μέθοδο κατά DIN η ποσότητα αυτή εξαρτάται από παράγοντες διάταξης συστήματος, σε αντίθεση με την δεύτερη περίπτωση όπου εισάγεται από τον μελετητή αυτούσια. Ένας ακόμα παράγοντας ο οποίος παρατηρείται ότι επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα μεταξύ των δύο αναλυτικών είναι ο συντελεστής αντιστάσεων λόγω τριβών στα κύλινδρα κίνησης. Στην περίπτωση της DIN το αποτέλεσμα φαίνεται να επηρεάζεται σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό από εκείνο της CEMA.

Η παρουσίαση και χρήση τριών μεθόδων έγινε με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων απαιτούμενης ισχύς και τον έλεγχο αξιοπιστίας τους. Η σύγκριση έδειξε ότι τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια και συνεπώς αξιόπιστα. Στη φάση αυτή κρίνεται ως ενδεικνυόμενη μέθοδος για το αρχικό στάδιο ενεργειακής μελέτης, καθώς και μελέτης ανάλυσης ευαισθησίας/αβεβαιότητας εκείνη κατά ISO και DIN. Πρόκειται για μία αναλυτική μέθοδο υπολογισμού, όπου το πλήθος των παραμέτρων εισαγωγής είναι μικρότερο σχετιζόμενο με τη μέθοδο της CEMA, αλλά επαρκές. Η γραφική μέθοδος δεν επιλέγεται, καθώς δεν μπορεί να συμπεριλάβει τις παραμέτρους εισαγωγής των δύο αναλυτικών, όντας πολύ πιο απλοποιημένη. Η αναλυτική μέθοδος κατά CEMA προτείνεται στην περίπτωση μίας πιο λεπτομερούς ανάλυσης σε ένα επόμενο στάδιο μελέτης.

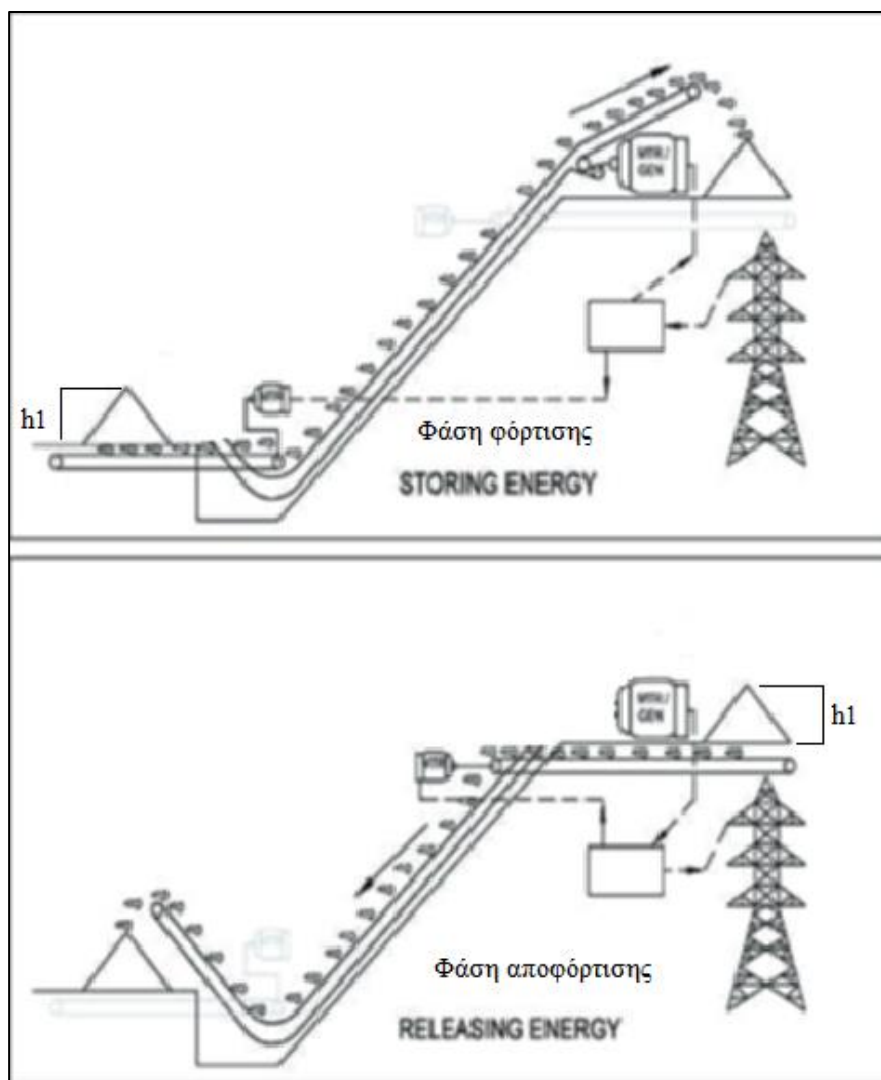
## Κεφάλαιο 2:Ενεργειακή ανάλυση συστήματος ταινιόδρομου ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

### 2.1: Ταινιόδρομοι μεταφοράς κοκκωδών χαλαρών υλικών ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Η ενεργειακή μετάβαση βασίζεται στην μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη συστημάτων παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική και ηλιακή. Οι πηγές αυτές δεν έχουν σταθερή παραγωγή ενέργειας και απαιτούν συστήματα αποθήκευσης για να εξασφαλιστεί η ευστάθεια του ηλεκτρικού δικτύου. Οι μπαταρίες ως συστήματα βραχυπρόθεσμης κυρίως αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και τα συστήματα αντλιοσταμείωσης για μακροπρόθεσμη αποθήκευση είναι σήμερα τα επικρατούντα σε παγκόσμιο επίπεδο. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με χρήση μπαταριών έχουν περιορισμένο πλήθος κύκλων λειτουργίας (μικρή σχετικά διάρκεια ζωής) και έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα καθώς υπάρχουν δυσκολίες στην ανακύκλωση μπαταριών λιθίου που αποτελούν τον κυριότερο τύπο χρησιμοποιούμενων μπαταριών. Σε σχέση με τις μπαταρίες τα συστήματα αντλιοσταμείωσης έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, αλλά έχουν συγκεκριμένες απαιτήσεις όσον αφορά την τοπογραφία και την ύπαρξη νερού (δύο ταμιευτήρες νερού μεγάλου μεγέθους με κατάλληλη υψομετρική διαφορά), με αποτέλεσμα η κατασκευή τους να υπόκειται σε περιορισμούς και να μην είναι εύκολη η κατασκευή νέων.

Μία ριζοσπαστική εναλλακτική σε αυτά τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σε μορφή βαρυτικής ενέργειας (Gravity Energy Storage, GES). Σε αυτά τα συστήματα μια ποσότητα υλικών μετακινείται από ένα σημείο χαμηλού υψομέτρου σε ένα υψηλότερο. Τέτοιου είδους συστήματα μπορούν να αποθηκεύσουν ενέργεια μέσω μεταφοράς άμμου ή χαλκιού ή άλλου χύδην θραυσμένου υλικού χρησιμοποιώντας συστήματα μεταφορικών ταινιών γνωστών και ως ταινιόδρομοι. Σε ένα τέτοιο σύστημα μια κεκλιμένη (ανηφορική) μεταφορική ταινία χρησιμοποιείται για την φόρτιση του συστήματος μέσω ανύψωσης του μεταφερόμενου υλικού σε μεγαλύτερο υψόμετρο και μία κατηφορική ταινία που διαθέτει σύστημα ανάκτησης της ενέργειας κατά την κατηφορική κίνηση του χρησιμεύει ως μέσο εκφόρτισης του συστήματος (Εικόνα 2.1). Η αποθηκευτική ικανότητα τέτοιων συστημάτων περιορίζεται μόνο από το μέγεθος και την γεωμετρία των σωρών αποθήκευσης, καθώς και από την υψομετρική διαφορά τους. Η ισχύς που παράγεται σε ένα τέτοιο σύστημα είναι συνάρτηση του ρυθμού μεταφοράς χύδην υλικού. Οι αλλαγές στην ταχύτητα κίνησης της ταινίας μπορούν να μεταβάλουν την παραγόμενη ισχύ του συστήματος μέσα σε δευτερόλεπτα. Κατάλληλοι χώροι εγκατάστασης συστημάτων αποθήκευσης βαρυτικής δυναμικής ενέργειας με χρήση μεταφορικών ταινιών μπορούν να θεωρηθούν οι εγκαταλειμμένοι λατομικοί και μεταλλευτικοί χώροι, όπου η πρόσβαση στο χαμηλότερο και υψηλότερο σημείο είναι ελεύθερη, το χύδην θραυσμένο υλικό διαθέσιμο και υπάρχει κατάλληλη υψομετρική διαφορά για αποθήκευση βαρυτικής δυναμικής ενέργειας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η επιρροή των παραμέτρων που επηρεάζουν την αποδοτικότητα ενός τέτοιου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μέσω ανάλυσης ευαισθησίας/αβεβαιότητας. Οι παράμετροι που λήφθηκαν υπόψη κατά την ανάλυση αφορούν αποστάσεις μεταφοράς και κλίσεις διάταξης, χαρακτηριστικά του υλικού προς μεταφορά, ύψος σωρών, καθώς και αντιστάσεις λόγω τριβής των ταινιών και κυλίστρων μεταφοράς.



Εικόνα 2.1: Σχεδιάγραμμα αποθήκευσης και ανάκτησης ενέργειας συστημάτων μεταφορικών ταινιόδρομων [5]

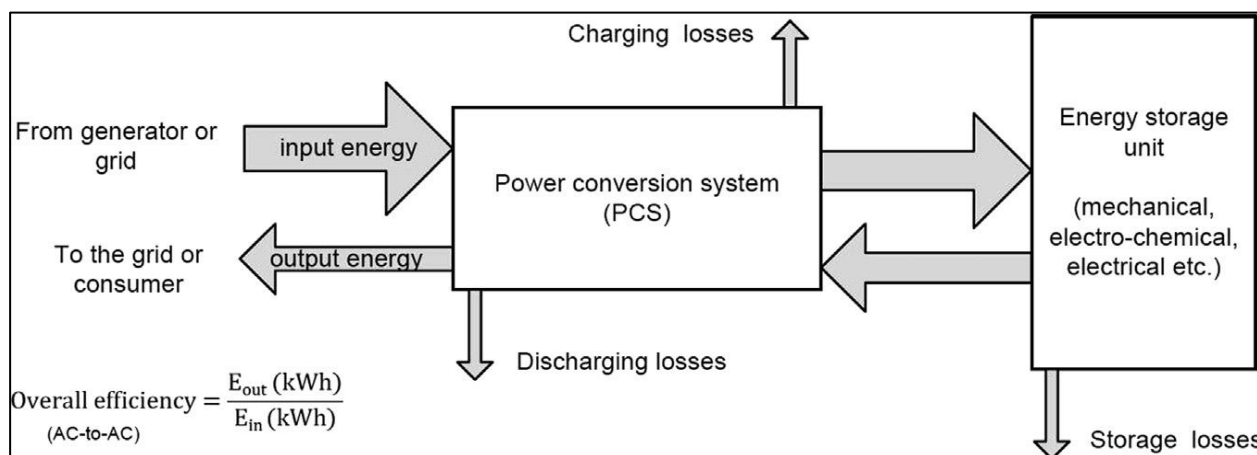
## 2.2 Θεωρητικό μοντέλο συστήματος μετατροπής – αποθήκευσης – ανάκτησης ηλεκτρικής ενέργειας

Το θεωρητικό μοντέλο ενός τυπικού συστήματος μετατροπής – αποθήκευσης – ανάκτησης ηλεκτρικής ενέργειας στο οποίο βασίστηκε η ενεργειακή ανάλυση φαίνεται στην εικόνα 2.2. Το σύστημα αυτό αποτελείται από δύο υποσυστήματα, τη διάταξη μετατροπής (Power conversions system) της ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλη άλλης μορφής (μηχανική, ηλεκτροχημική, κ.α.) κατάλληλης για αποθήκευση και στη μονάδα αποθήκευσης. Το σύστημα αυτό πραγματοποιεί διαδοχικούς κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης (Charge – Discharge). Κατά τη φόρτιση η διάταξη μετατροπής (Power conversions system) μετατρέπει την προς αποθήκευση ηλεκτρική ενέργεια (input energy) σε άλλη άλλης μορφής (μηχανική, ηλεκτροχημική, κ.α.) και η μονάδα αποθήκευσης (Energy storage unit) την αποθηκεύει στη νέα της μορφή. Κατά την εκφόρτιση η αποθηκευμένη ενέργεια μετατρέπεται πάλι σε ηλεκτρική από τη διάταξη μετατροπής και αποδίδεται η ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Τόσο κατά τη φόρτιση όσο και κατά την εκφόρτιση υπάρχουν απώλειες



(Charging, discharging losses) που οφείλονται στη μετατροπή της ενέργειας από μια μορφή σε άλλη. Επίσης κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης υπάρχουν απώλειες (Storage losses) που οφείλονται στο φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης και σε τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς των μονάδων αποθήκευσης. Ο συντελεστής απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος (overall efficiency) δίνεται ως ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται από το σύστημα στο δίκτυο (output energy) κατά την εκφόρτιση του προς την ενέργεια που έχει εισέλθει στο σύστημα (input energy) [6].

$$\text{Overall efficiency} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (2.1)$$



Εικόνα 2.2: Διάγραμμα ροής ενέργειας σε σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με μετατροπή της σε άλλη μορφή και εκ νέου ανάκτησης της [6]

### 2.3: Ενεργειακή ανάλυση του ταινιοδρόμου ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

Για την περίπτωση που εξετάζεται στην εργασία αυτή, η διάταξη μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο κεκλιμένος ταινιοδρόμος που μεταφέρει και αποθέτει κοκκώδη υλικά σε μεγαλύτερο υψόμετρο μετατρέποντας έτσι την ηλεκτρική ενέργεια σε βαρυτική κατά τη φόρτιση του συστήματος. Κατά την εκφόρτιση ο ταινιοδρόμος κινείται αντίστροφα και μεταφέρει το κοκκώδες υλικό από το ανώτερο υψομετρικό σημείο στο κατώτερο. Η βαρυτική ενέργεια μετατρέπεται έτσι σε ηλεκτρική μέσω του συστήματος κινητήρα/γεννήτριας που διαθέτει ο ταινιοδρόμος. Το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σε βαρυτική μορφή μέσω ταινιοδρόμων παρουσιάζει απώλειες κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση του που οφείλονται κατά κύριο λόγο στις δυνάμεις τριβών που πρέπει να υπερνικηθούν αλλά και στην απόδοση του κινητήριου συστήματος και της γεννήτριας. Δεν παρουσιάζει όμως απώλειες κατά την αποθήκευση σε αντίθεση με τα συστήματα μπαταριών (αυτοεκφόρτιση) αλλά και της αντλιοσταμείωσης (απώλειες νερού λόγω εξάτμισης ή διαρροών). Η ενεργειακή ανάλυση ενός συστήματος ταινιοδρόμου περιλαμβάνει τον υπολογισμό της απαιτούμενης ενέργειας κατά την φόρτιση, αποθήκευση και αποφόρτιση, τις απώλειες ενέργειας και τελικά τον υπολογισμό του συντελεστή απόδοσης ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Ο συντελεστής απόδοσης  $\eta_{es}$  του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι το πηλίκο της ανακτώμενης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την κάθοδο μίας



συγκεκριμένης ποσότητας υλικού ( $E_{out}$ ) προς την ενέργεια που απαιτήθηκε ( $E_{in}$ ) για την ανύψωση της ποσότητας αυτής του υλικού στο ανώτερο υψομετρικό σημείο.

$$n_{es} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \quad (2.2)$$

Για το υπολογισμό της ενέργειας φόρτισης, αποφόρτισης και των απωλειών του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται στον ταινιοδρόμο θεωρήθηκε ένα τυπικό σύστημα κεκλιμένου ταινιοδρόμου που πραγματοποιεί ένα πλήρη κύκλο (φόρτιση-εκφόρτιση) μεταφέροντας υλικό με την ονομαστική του ωριαία δυναμικότητα, όπως αυτό της εικόνας 2.2. Με βάση τη θεώρηση αυτή ο πλήρης κύκλος έχει διάρκεια 2 ωρών (1 ώρα φόρτισης + 1 ώρα εκφόρτισης). Για τον υπολογισμό της ωριαίας δυναμικότητας του ταινιοδρόμου αλλά και της απαιτούμενης ισχύος χρησιμοποιήθηκε η απλοποιημένη μεθοδολογία κατά ISO 5048 και DIN 22101 που έχει περιγραφεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι απαιτούμενοι υπολογισμοί έγιναν με χρήση του λογισμικού Excel.

Οι παράμετροι ταινιοδρόμου που απαιτούνται καθώς και οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται και αφορούν τη δυναμικότητα του, την απαιτούμενη ισχύ για την κίνηση του και την ενεργειακή ανάλυση παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 2.1

Πίνακας 2.1: Παράμετροι μοντέλου υπολογισμού συντελεστή απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας κατά ISO 5048 και DIN 22101

Παράμετρος	Συμβολισμός	Μονάδες Μέτρησης
<b>Χαρακτηριστικά ταινίας</b>		
Μήκος Μεταφορικής Ταινίας	L	m
Οριζόντια Κλίση Μεταφορικής Ταινίας	$\delta$	Degrees
Πλάτος Μεταφορικής Ταινίας	B	mm
Πλευρική Κλίση Μεταφορικών Κυλίστρων	$\alpha$	Degrees
Ταχύτητα Κίνησης Ιμάντα	v	m/s
Ειδικό Βάρος Μεταφερόμενου Υλικού	SW	t/m <sup>3</sup>
Ύψος Απόθεσης Σωρού Υλικού	h <sub>1</sub>	m
Συντελεστής Αντιστάσεων	f	-
Συντελεστής Επιπλήσματος	f <sub>s</sub>	-
Συντελεστής Απόδοσης Κινητήριου Συστήματος	f <sub>m</sub>	-
Συντελεστής Πλήρωσης Μεταφορικής Ταινίας	f <sub>f</sub>	-
Υψομετρική Διαφορά	H	m
Τύπος Ιμάντα Μεταφορικής Ταινίας	type	-
Πλήθος Μεταφορικών Κυλίστρων	Idler_number	-
Φορτίο άδειου μεταφορέα ανά τρέχον μέτρο	G <sub>m</sub>	kp/m
<b>Συντελεστές χαρακτηριστικών ταινίας</b>		
Συντελεστής Γωνίας Πλευρικών Κυλίστρων	$\xi$	-
Συντελεστής Διόρθωσης Οριζόντιας Κλίσης	$\lambda$	-
Συντελεστής Μήκους Μεταφοράς	C	-
<b>Μεταφορική ικανότητα</b>		
Επιφάνεια Διατομής Μεταφερόμενου Υλικού	F	m <sup>2</sup>
Μεταφορική Απόδοση	Q	m <sup>3</sup> /h
Μεταφερόμενη Ποσότητα	Q <sub>i</sub>	t/h
<b>Απαιτούμενη ισχύς για κίνηση</b>		
Ισχύς Οριζόντιας Κίνησης Άδειας Ταινίας	N_empty	kW
Ισχύς Οριζόντιας Κίνησης Φορτωμένης Ταινίας	N_horizontal	kW
Ισχύς Ανυψωτικής Κίνησης Μεταφορικής Ταινίας	N_lifted	kW
Ισχύς Αξονα Τυμπάνου Κίνησης	N <sub>a</sub>	kW
Συνολική Απαιτούμενη Ισχύς	N_total	kW
Ισχύς που αποδίδεται κατά την κατηφορική κίνηση του υλικού	N_discharge	kW

Ενέργεια ανά κύκλο λειτουργίας (1h φόρτιση, 1h εκφόρτιση)		
Τροφοδοτούμενη ενέργεια συστήματος	$E_{in}$	kWh
Απώλειες ενέργειας φόρτισης συστήματος	$L_{ch}$	kWh
Απώλειες ενέργειας συστήματος κατά την αποθήκευση	$L_{st}$	kWh
Απώλειες ενέργειας αποφόρτισης συστήματος	$L_{ds}$	kWh
Ενέργεια αποδιδόμενη	$E_{out}$	kWh
Συντελεστής Απόδοσης ως Σύστημα Αποθήκευσης Ενέργειας	$\eta_{es}$	-

Η ενέργεια τροφοδοσίας  $E_{in}$  καταναλώνεται από τον κινητήρα του συστήματος και είναι υπεύθυνη για την κίνηση του υλικού κατά τη διαδικασία φόρτισης του συστήματος. Με βάση το μοντέλο υπολογισμού ισχύος κατά DIN, η ενέργεια τροφοδοσίας  $E_{in}$  υπολογίζεται από τη συνολική απαιτούμενη ισχύ λειτουργίας του συστήματος (για χρόνο λειτουργίας  $\Delta t=1h$ ). Αυτή ισούται με το άθροισμα της ισχύος για την οριζόντια κίνηση του άδειου και του φορτωμένου ταινιοδρόμου και για την ανύψωση του υλικού.

Οι απώλειες ενέργειας ενός τέτοιου συστήματος κατά την φόρτιση  $L_{ch}$  ορίζονται ως το άθροισμα της ενέργειας που απαιτείται για την οριζόντια κίνηση άδειας μεταφορικής ταινίας, καθώς και φορτωμένης, μέσω του παρακάτω τύπου:

$$L_{ch} = \frac{C*f*L}{270} * (G_m * v + Q_t) \quad (2.3)$$

Με τον ίδιο τρόπο ορίζονται οι απώλειες κατά την αποφόρτιση του συστήματος αποθήκευσης  $L_{ds}$ , καθώς και στις δύο περιπτώσεις η οριζόντια κίνηση δεν συμμετέχει στη διαδικασία ανάκτησης ενέργειας.

Οι απώλειες ενέργειας αποθήκευσης του υλικού  $L_{st}$  σε ένα σύστημα μεταφορικών ταινιών είναι μηδενικές, καθώς το αποθηκευτικό μέσο στην προκειμένη περίπτωση είναι στερεά θραυσμένα τεμαχίδια συγκεντρωμένα σε σωρούς, τα οποία παραμένουν άθικτα στην αλλαγή των εξωτερικών συνθηκών.

Κατά την ανύψωση υλικού στη φάση φόρτισης του συστήματος αποθήκευσης αυτό συλλέγεται από τη βάση της σωρού με αποτέλεσμα να αυξάνεται η υψομετρική διαφορά από το σημείο τροφοδοσίας μέχρι το σημείο απόθεσης κατά ύψος σωρού απόθεσης  $h_1$ , αυξάνοντας τις απαιτήσεις ισχύος ως εξής:

$$E_{in} = \left[ \frac{C*f*L}{270} * (G_m * v + Q_t) + \frac{Q_t*(H+h_1)}{270} \right] \frac{1}{f_m} \Delta t \quad (2.4)$$

Αντιστοίχως, κατά την φάση ανάκτησης ενέργειας του συστήματος, το υλικό τροφοδοτείται στον ιμάντα μεταφοράς από τη βάση της σωρού απόθεσης, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την υψομετρική διαφορά και κατ' επέκταση την τιμή της ανακτώμενης ενέργειας του συστήματος, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$E_{out} = \left[ \frac{Q_t*(H-h_1)}{270} \right] f_m \Delta t \quad (2.5)$$

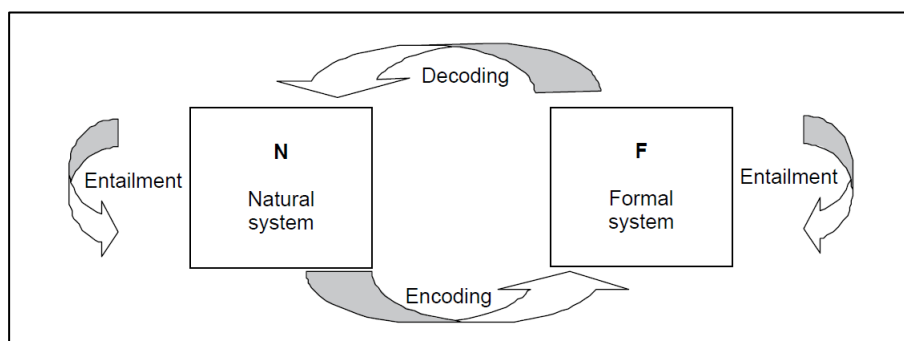
Τέλος ο συντελεστής απόδοσης ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας  $\eta_{es}$  δίνεται από την εξίσωση 2.6:

$$\eta_{es} = \frac{\left[ \frac{Q_t * (H - h_1)}{270} \right] f_m^2}{\left[ \frac{C * f * L}{270} * (G_m * v + Q_t) + \frac{Q_t * (H + h_1)}{270} \right]} \quad (2.6)$$

## Κεφάλαιο 3: Αξιολόγηση τυπικών διατάξεων ταινιοδρόμων ως συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας - ανάλυση αβεβαιότητας και ευαισθησίας

### 3.1: Γενικά για ανάλυση αβεβαιότητας-ευαισθησίας

Με τον όρο μοντέλο (Εικόνα 3.1) αναφερόμαστε σε μία μαθηματική σχέση υπολογισμού, η οποία απαρτίζεται από παραμέτρους εισαγωγής και καταλήγει σε ένα ή περισσότερα εξαγόμενα αποτελέσματα, με σκοπό να εξηγήσει μία συμπεριφορά είτε κάποιο φυσικό φαινόμενο με μαθηματικούς όρους. Παραμέτρους εισαγωγής καλούμε τα μεγέθη που εισάγονται στο μοντέλο υπολογισμού και επηρεάζουν την τελική παράμετρο εξαγωγής, ή διαφορετικά δημιουργούν διακύμανση στο μαθηματικό αποτέλεσμα και διακρίνονται σε παραμέτρους απόφασης και παραμέτρους αβεβαιότητας. Η έννοια της αβεβαιότητας συνοδεύει πάντα τους υπολογισμούς και εμπίπτει από το γεγονός ότι οι φυσικοί νόμοι δεν μπορούν να καθοριστούν με απόλυτη μαθηματική ακρίβεια. [11]



Εικόνα 3.1: Η έννοια της μοντελοποίησης βασισμένη στον Rosen (1991) [11]

Οι μέθοδοι εφαρμογής της ανάλυσης αβεβαιότητας/ευαισθησίας διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες, αυτές της τοπικής και της ολικής ανάλυσης. Στην πρώτη, μεταβάλλεται η τιμή της υπό εξέταση μεταβλητής, με τις τιμές των υπολοίπων παραμέτρων να διατηρούνται σταθερές. Αυτή η μέθοδος παρουσιάζει μειωμένη ακρίβεια καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τις αλληλοεπιδράσεις μεταξύ των παραμέτρων. Στην δεύτερη, οι τιμές των παραμέτρων εισαγωγής μεταβάλλονται ταυτοχρόνως. Αυτό δίνει ακριβέστερα αποτελέσματα καθώς λαμβάνεται υπόψη και η αλληλεπίδραση τους. [7]

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται η ολική μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιεί τη στοχαστική δειγματοληψία Monte Carlo για την επιλογή των τιμών των εισαγόμενων παραμέτρων κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση της ανάλυσης αβεβαιότητας – ευαισθησίας ήταν το Crystal Ball το οποίο λειτουργεί ως πρόσθετο στην εφαρμογή Excel.

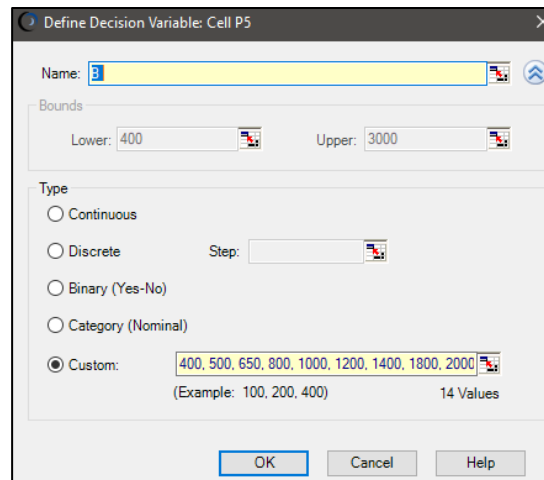
### 3.2: Παράμετροι αβεβαιότητας και παράμετροι απόφασης

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και στο οποίο γίνεται η ανάλυσης αβεβαιότητας – ευαισθησίας έχει ως εξαγόμενη παράμετρο τον συντελεστή απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας  $\eta_{es}$  (σχέση 2.6) καθώς και την παραγόμενη ενέργεια  $E_{out}$  (σχέση 2.5) ως δείκτες απόδοσης του συστήματος. Η ανάλυση ευαισθησίας του ενεργειακού μοντέλου προϋποθέτει τον διαχωρισμό των παραμέτρων εισόδου του μοντέλου σε παραμέτρους με αβεβαιότητα και παραμέτρους απόφασης ανάλογα με τη φύση και τις διαθέσιμες πληροφορίες για κάθε μία παράμετρο. Οι παράμετροι απόφασης λαμβάνουν καθορισμένες τιμές καθώς επιλέγονται από τον σχεδιαστή του συστήματος ανάλογα με τις απαιτήσεις της διαδικασίας παραγωγής, σε αντίθεση με τις παραμέτρους με αβεβαιότητα, οι οποίες μεταβάλλονται μεταξύ ενός εύρους τιμών ακολουθώντας μια συγκεκριμένη κατανομή. Κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης οι παράμετροι απόφασης παραμένουν σταθερές, ενώ οι παράμετροι με αβεβαιότητα μεταβάλλονται ανάλογα με την κατανομή που θεωρούνται ότι ακολουθούν.

Οι παράμετροι απόφασης που επιλέχθηκαν δίνονται στον πίνακα 3.1. Για κάθε παράμετρο απόφασης καθορίζεται ο τύπος της μεταβλητής. Οι τύποι των μεταβλητών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο λογισμικό Crystal Ball είναι η συνεχής (Continuous), διακριτή (Discrete), δυαδική (Binary), κατηγορική (Category) ή προκαθορισμένων τιμών (Custom). Ταυτόχρονα δίνονται ο συμβολισμός, οι μονάδες και το εύρος μεταβολής τους (Lower, Upper) ή το σύνολο των τιμών τους ανάλογα με τον τύπο τους. Η διαδικασία εισαγωγής μέσω του λογισμικού Crystal Ball φαίνεται στην Εικόνα 3.2.

Πίνακας 3.1: Παράμετροι απόφασης

Παράμετροι Απόφασης	Συμβολισμός	Μονάδες Μέτρησης	Τύπος Μεταβλητής	Lower	Base	Upper
Μήκος Μεταφοράς	L	m	Συνεχής	500	1000	1500
Οριζόντια Κλίση Μεταφορικής Ταινίας	$\delta$	Degrees	Custom	2	16	30
Πλάτος Μεταφορικής Ταινίας	B	mm	Custom	400	1000	1800
Ύψος Απόθεσης Σωρού Υλικού	$h_1$	m	Συνεχής	5	10	15
Κλίση πλευρικών κυλίστρων ιμάντα	$\alpha$	Degrees	Custom	0	20	35
Ταχύτητα Κίνησης Ιμάντα	v	m/s	Συνεχής	1	1,5	2



Εικόνα 3.2: Ορισμός του πλάτους μεταφορικής ταινίας ως παράμετρο απόφασης που λαμβάνει προκαθορισμένες τιμές (Custom)

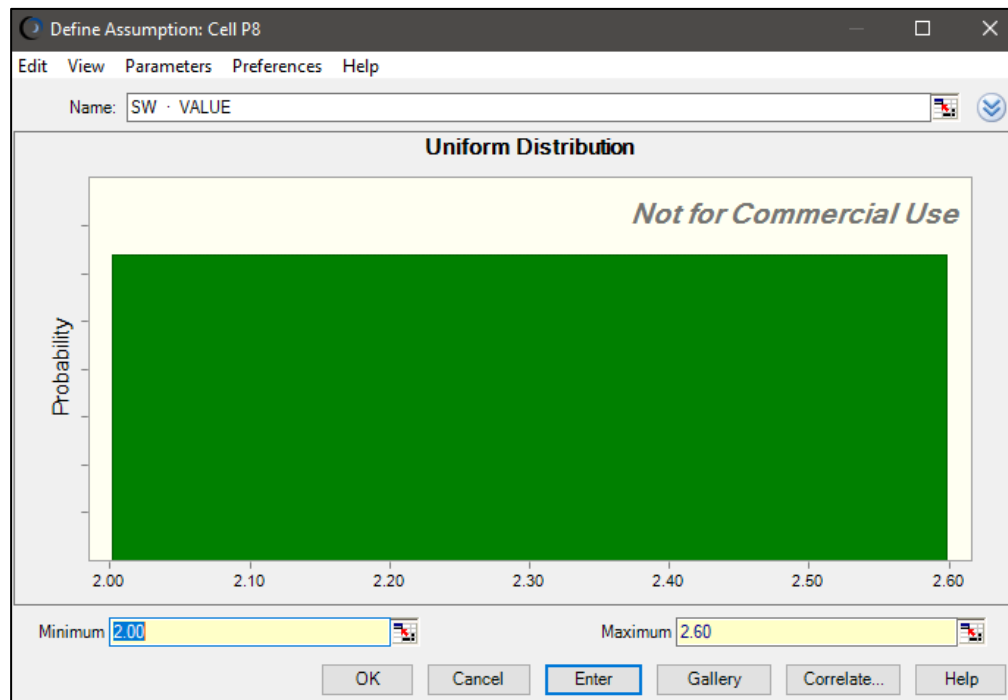
Οι παραπάνω επιλέχθηκαν ως παράμετροι απόφασης, καθώς αποτελούν τα βασικά στοιχεία σχεδιασμού του συστήματος. Το εύρος των τιμών για την κλίση του ταινιόδρομου, το πλάτος του ιμάντα μεταφοράς, καθώς και για τη κλίση πλευρικών κυλίστρων βασίστηκαν στις τιμές λειτουργίας που χρησιμοποιεί το πρότυπο DIN 22101. Για το πλάτος της ταινίας επιλέγεται η μέγιστη τιμή των 1,8 μέτρων και όχι η εκείνη των 3 μέτρων, καθώς θεωρήθηκε εξαιρετικά μεγάλη για την περίπτωση που εξετάζεται. Το εύρος ταχύτητας κίνησης του ιμάντα, το ύψος του σωρού απόθεσης του υλικού και το μήκος της ταινίας επιλέχθηκαν με βάση τις τιμές που χρησιμοποιούνται από υφιστάμενο ταινιόδρομο (λατομείο Ξηρορέματος) που μελετάται ως περίπτωση εφαρμογής σε επόμενο κεφάλαιο.

Οι παράμετροι αβεβαιότητας που θεωρήθηκαν στην ανάλυση με τις αντίστοιχες κατανομές τους δίνονται στον πίνακα 3.2. Οι κατανομές των επιλέχθηκαν με βάση τις διαθέσιμες πληροφορίες για τις παραμέτρους αυτές. Η τριγωνική κατανομή επιλέχθηκε για τις παραμέτρους εκείνες που είναι γνωστό ότι όπου υπάρχει μία συχνότερα εμφανιζόμενη τιμή (Likeliest) και μεταβάλλονται μεταξύ ενός συγκεκριμένου διαστήματος (Minimum, Maximum). Αντίθετα η ομοιόμορφη κατανομή επιλέχθηκε για παραμέτρους, όπου η πιθανότητα εμφάνισης είναι ίση για όλο το εύρος τιμών εμφάνισης τους.

Πίνακας 3.2: Παράμετροι αβεβαιότητας

Παράμετροι Αβεβαιότητας	Συμβολισμός	Μονάδες Μέτρησης	Κατανομές Συχνότητας	Minimum	Likeliest	Maximum
Ειδικό Βάρος Μεταφερόμενου Υλικού	SW	t/m <sup>3</sup>	Ομοιόμορφη	2		2,6
Συντελεστής Επιπλήσματος	f <sub>s</sub>	-	Τριγωνική	1,2	1,5	1,8
Συντελεστής Αντιστάσεων	f	-	Τριγωνική	0,02	0,025	0,03
Συντελεστής Πλήρωσης Μεταφορικής Ταινίας	f <sub>f</sub>	-	Ομοιόμορφη	0,1		1
Συντελεστής Απόδοσης Κινητήριου Συστήματος	f <sub>m</sub>	-	Τριγωνική	0,9	0,95	0,98

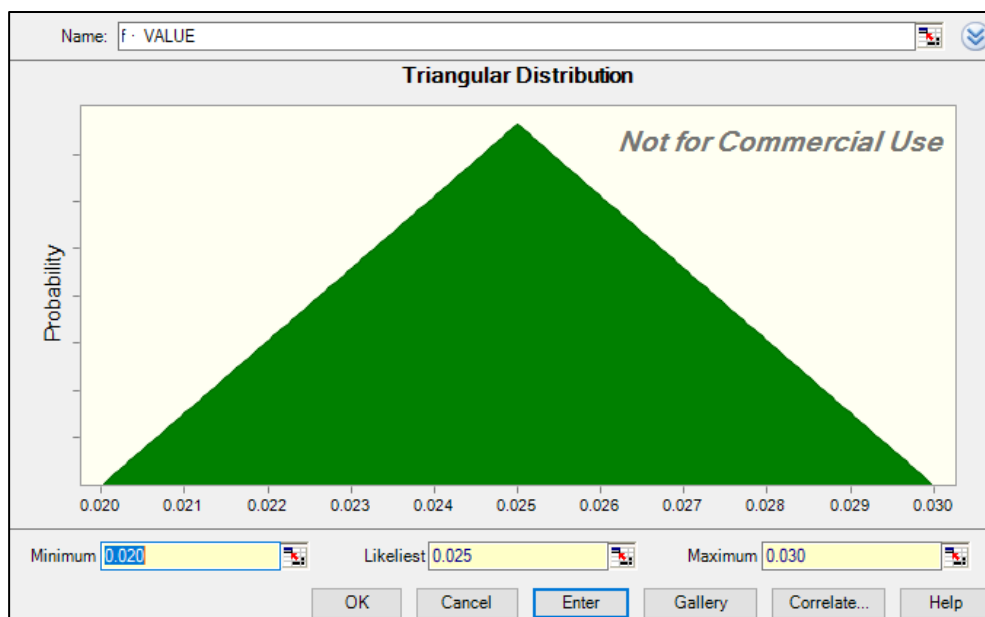
Το ειδικό βάρος του αδιατάρακτου υλικού λαμβάνει τιμές μεταξύ ενός εύρους τιμών (2,0-2,6) που θεωρούνται αντιπροσωπευτικές για τα γεωυλικά. Η ομοιόμορφη κατανομή επιλέχθηκε λόγω για τη γενική περίπτωση μελέτης όπου δεν υπάρχουν συγκεκριμένες πληροφορίες για τον τύπο του εξορυσσόμενου υλικού. Οι παράμετροι της κατανομής και ο τρόπος εισαγωγής τους μέσω του Crystal Ball δίνεται στην Εικόνα 3.3. Για την περίπτωση όπου υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες για τον τύπο του εξορυσσόμενου υλικού μπορεί, όπως για παράδειγμα ασβεστόλιθος, μπορεί να επιλεγεί και διαφορετική κατανομή με άλλες παραμέτρους.



Εικόνα 3.3:Εισαγωγή παραμέτρων ομοιόμορφης κατανομής για το ειδικό βάρος (SW) [12]

Επιπροσθέτως, ο συντελεστής επιπλήσματος θεωρείται παράγοντας με αβεβαιότητα αφού εξαρτάται τόσο από την διαδικασία εξόρυξης-θραύσης όσο και από τα γεωτεχνικά χαρακτηριστικά του υλικού που εμφανίζουν μεταβλητότητα. Η επιλογή των τιμών του και του είδους της κατανομής του βασίστηκε σε δεδομένα από τη βιβλιογραφία [4].

Ο συντελεστής αντιστάσεων αφορά την τριβή μεταξύ κυλίστρων και μεταφορικού ιμάντα κίνησης και εξαρτάται κυρίως από την παράμετρο του χρόνου, ανάλογα με την οποία σημειώνεται και ο ανάλογος βαθμός φθοράς. Όσο ο χρόνος χρήσης αυξάνεται, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η φθορά του εξοπλισμού, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μεγαλύτερων τιμών. Με βάση τις προτεινόμενες τιμές από τα πρότυπα DIN και ISO η συχνότερα εμφανιζόμενη τιμή για χρησιμοποιημένα κύλινδρα μεταφοράς εκτιμάται στο 0,025 με ελάχιστη την 0,02 για καινούργια και μέγιστη την 0,03 για χρησιμοποιημένα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Η μορφή και οι παράμετροι της κατανομής που επιλέχθηκε δίνονται στην εικόνα 3.4.



Εικόνα 3.4: Παράμετροι τριγωνικής κατανομής για τον συντελεστή αντιστάσεων (f) [12]

Το ποσοστό πλήρωσης του ιμάντα με υλικό (ως προς τη μέγιστη ποσότητα ανά τρέχον μέτρο), που εξαρτάται κυρίως από τις απαιτήσεις της παραγωγής και τους περιορισμούς στην διαδικασία τροφοδοσίας και απόθεσης, θεωρείται και αυτό ως παράμετρος αβεβαιότητας και επιλέχθηκε η ομοιόμορφη κατανομή για να αποδώσει τη μεταβλητότητα του. Τέλος για την απόδοση της αβεβαιότητας του συντελεστή απόδοσης κινητήριου συστήματος χρησιμοποιήθηκε η τριγωνική κατανομή με βάση τις τιμές της βιβλιογραφίας [15]. Να επισημανθεί ότι ο συντελεστής αυτός εξαρτάται κυρίως από τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά του συστήματος και τις ώρες λειτουργίας του.

### 3.3: Εφαρμογή της ανάλυσης αβεβαιότητας-ευαισθησίας για τυπικές διατάξεις ταινιοδρόμων και εύρεση βέλτιστων τιμών

Η ολοκληρωμένη μελέτη των δεικτών απόδοσης συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με χρήση μεταφορικών ταινιοδρόμων περιλαμβάνει την κατασκευή σεναρίων διαφορετικών τιμών για τις παραμέτρους εισαγωγής του μοντέλου ενεργειακής ανάλυσης κατά ISO 5048 και DIN22101. Σε αυτά παρουσιάζονται όλα τα ενδιάμεσα υπολογιζόμενα μεγέθη που οδηγούν στον υπολογισμό του βασικού κρίσιμου δείκτη που είναι ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Στη συνέχεια γίνεται η ανάλυση ευαισθησίας/αβεβαιότητας για κάθε σενάριο παραμέτρων απόφασης και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με άλλα υπάρχοντα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας προς εξαγωγή συμπερασμάτων και προτάσεων.

Τα σενάρια που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4 και είναι δύο: Το σενάριο 1 που προέκυψε ως το βέλτιστο μετά από την βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς που έγινε με χρήση του πρόσθετου Solver του Excel και το σενάριο 2 που θεωρήθηκε ως μια τυπική περίπτωση ενός ταινιοδρόμου. Για το σενάριο 1 θεωρήθηκαν οι ιδανικές συνθήκες λειτουργίας (μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση ταινιοδρόμου, ελάχιστη τιμή συντελεστή τριβών, μέγιστη πλήρωση ταινίας, μέγιστος συντελεστής απόδοσης κινητήρα/γεννήτριας, κ.α.) και κατά συνέπεια ο υπολογιζόμενος συντελεστής απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης θα πρέπει να

θεωρηθεί ως ο μέγιστος που μπορεί να επιτευχθεί. Οι περιορισμοί (κατώτερη, ανώτερη τιμή) που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του ταινιοδρόμου δίνονται στον Πίνακα 3.3 και βασίστηκαν σε στοιχεία κατασκευαστών ταινιοδρόμων σε σχέση με τα όρια λειτουργίας τους καθώς και στις προτεινόμενες τιμές από τα πρότυπα DIN και ISO.

Πίνακας 3.3: Περιορισμοί σεναρίου βελτιστοποίησης δεικτών απόδοσης συστήματος

Παράμετρος	Συμβ/μός	Κατώτερη τιμή	Ανώτερη τιμή
Μήκος Μεταφορικής Ταινίας	L (m)	500	1500
Οριζόντια Κλίση Μεταφορικής Ταινίας	$\delta$ (Deg)	2	30
Πλάτος Μεταφορικής Ταινίας	B (mm)	400	1800
Κλίση πλευρικών Κυλίστρων	$\alpha$ (deg)	0	35
Ταχύτητα Κίνησης Ιμάντα	v (m/s)	1	2
Ειδικό Βάρος Μεταφερόμενου Υλικού	SW (t/m <sup>3</sup> )	2	2,6
Ύψος Απόθεσης Σωρού Υλικού	h <sub>1</sub> (m)	5	15
Συντελεστής Αντιστάσεων	f	0,02	0,03
Συντελεστής Επιπλήσματος	f <sub>s</sub>	1,2	1,8
Συντελεστής Απόδοσης Κινητήριου Συστήματος	f <sub>m</sub>	0,9	0,98
Συντελεστής Πλήρωσης Μεταφορικής Ταινίας	f <sub>r</sub>	0,1	1

Παράμετροι Επίλυσης

Ορισμός στόχου:

Σε: ☒ Μέγιστη ☐ Ελάχιστη ☐ Ίση του:

Με αλλαγή μεταβλητών κελιών:

Σύμφωνα με τους περιορισμούς:

- $SP8 \geq SQ8$
- $SP7 \geq SQ7$
- $SP9 \leq SS8$
- $SP7 \leq SS7$
- $SP6 \geq SQ6$
- $SP6 \leq SS6$
- $SP9 \leq SS9$
- $SP3 \geq SQ3$
- $SP4 \geq SQ4$
- $SP5 \geq SQ5$
- $SP9 \geq SQ9$
- $SP5 \leq SS5$
- $SP10 \leq SS10$

☒ Καταστήστε τις μεταβλητές που δεν έχουν περιορισμούς μη αρνητικές

Επιλέξτε μια μέθοδο επίλυσης:

Μέθοδος επίλυσης

Επιλέξτε το μη γραμμικό GRG μηχανισμό για προβλήματα της Επίλυσης που είναι ομαλά μη γραμμικά. Επιλέξτε το μηχανισμό LP Simplex για γραμμικά προβλήματα της Επίλυσης και επιλέξτε το μηχανισμό Evolutionary για προβλήματα της Επίλυσης που δεν είναι ομαλά.

Βοήθεια

Εικόνα 3.5: Πρόσθετο επίλυσης (Solver) [12]

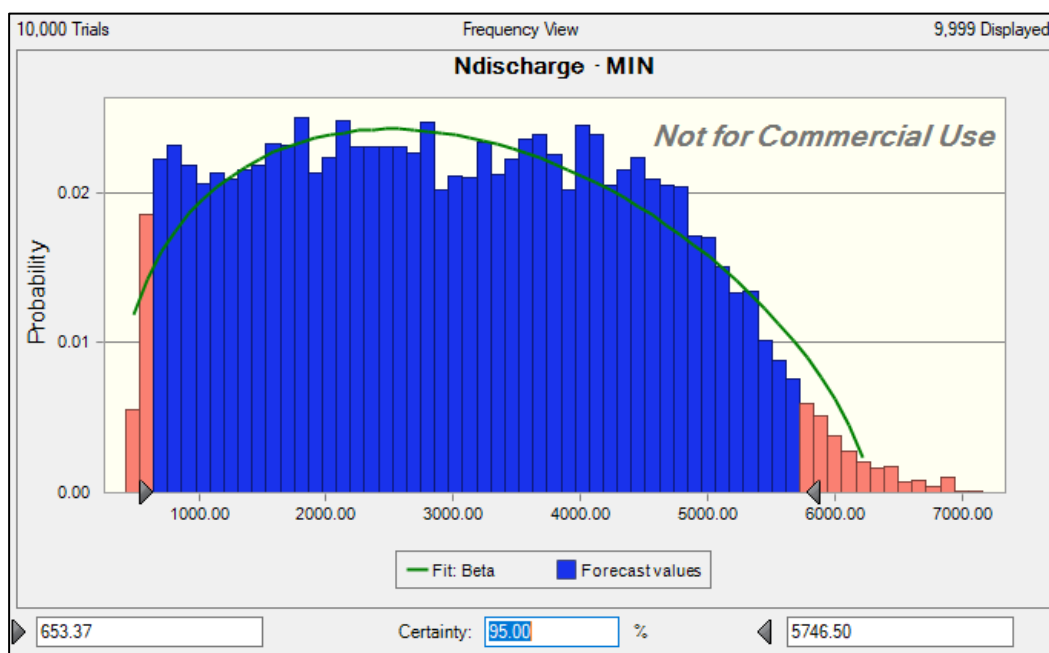


Πίνακας 3.4:Σενάρια τιμών παραμέτρων εισαγωγής

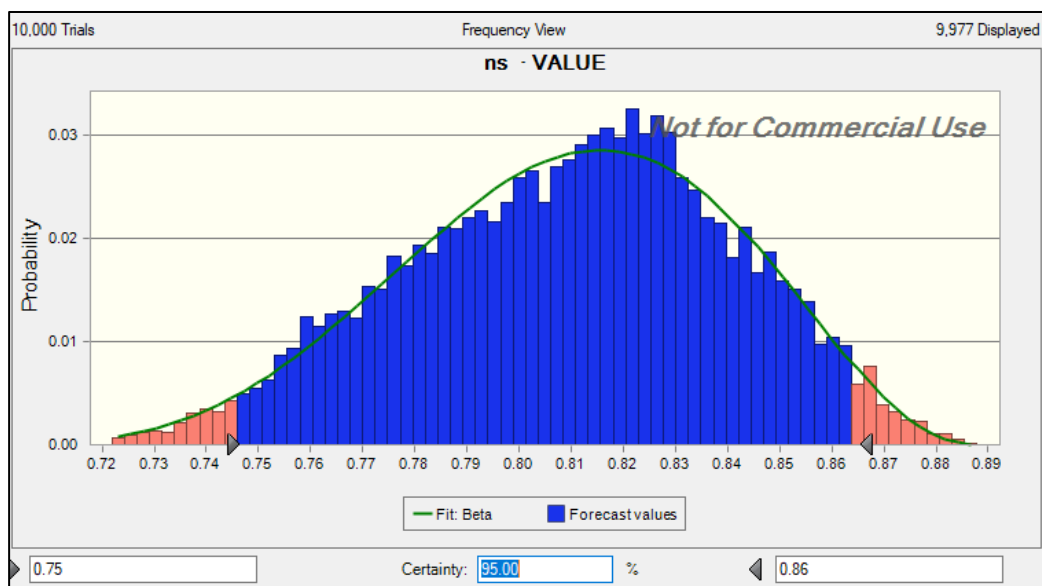
Παράμετρος	Συμβ/μός	Σενάριο 1 (Βέλτιστο)	Σενάριο 2 (Τυπικό)
Μήκος Μεταφορικής Ταινίας	L (m)	1500	500
Οριζόντια Κλίση Μεταφορικής Ταινίας	$\delta$ (Deg)	26	12
Πλάτος Μεταφορικής Ταινίας	B (mm)	1800	1000
Κλίση πλευρικών Κυλίστρων	$\alpha$ (deg)	35	35
Ταχύτητα Κίνησης Ιμάντα	v (m/s)	2	2
Ειδικό Βάρος Μεταφερόμενου Υλικού	SW (t/m <sup>3</sup> )	2,6	2,6
Ύψος Απόθεσης Σωρού Υλικού	h <sub>1</sub> (m)	5	5
Συντελεστής Αντιστάσεων	f	0,02	0,02
Συντελεστής Επιπλήσματος	f <sub>s</sub>	1,2	1,2
Συντελεστής Απόδοσης Κινητήριου Συστήματος	f <sub>m</sub>	0,98	0,98
Συντελεστής Πλήρωσης Μεταφορικής Ταινίας	f <sub>f</sub>	1	0,7
Υψομετρική Διαφορά	H (m)	658	104
Τύπος Ιμάντα Μεταφορικής Ταινίας	type	Σκαφ/τός	Σκαφ/τός
Πλήθος Μεταφορικών Κυλίστρων	Idler_number	3	3
Φορτίο Μεταφορέα	G <sub>m</sub> (kp/m)	30	30
Συντελεστής Γωνίας Πλευρικών Κυλίστρων	$\xi$	587	587
Συντελεστής Διόρθωσης Οριζόντιας Κλίσης	$\lambda$	0,68	0,93
Συντελεστής Μήκους Μεταφοράς	C	1,07	1,15
Επιφάνεια Διατομής Μεταφερόμενου Υλικού	F (m <sup>2</sup> )	0,27	0,11
Μεταφορική Απόδοση	Q (m <sup>3</sup> /h)	1957	792
Μεταφερόμενη Ποσότητα	Q <sub>t</sub> (t/h)	4239	1201
Ισχύς Οριζόντιας Κίνησης Άδειας Ταινίας	N <sub>emp</sub> (kW)	19	7
Ισχύς Οριζόντιας Κίνησης Φορτωμένης Ταινίας	N <sub>hor</sub> (kW)	396	45
Ισχύς Ανοψωτικής Κίνησης Μεταφορικής Ταινίας	N <sub>lifted</sub> (kW)	7802	363
Ισχύς Άξονα Τυμπάνου Κίνησης	N <sub>a</sub> (kW)	8366	417
Συνολική Απαιτούμενη Ισχύς	N <sub>total</sub> (kW)	8385	424
Παραγόμενη ισχύς κατά την κατηφορική κίνηση ταινίας	N <sub>dis</sub> (kW)	7684	330
Συντελεστής Απόδοσης Αποθήκευσης	n <sub>es</sub>	0,90	0,76

Για το σενάριο 1 που είναι το βέλτιστο ο υπολογιζόμενος συντελεστή απόδοσης  $\eta_{es}$  ανέρχεται σε 0,90 και αναφέρεται σε ταινιόδρομο μεγάλης δυναμικότητας (4239 t/h) μήκους 1500 m με κλίση 26° (υψομετρική διαφορά 658m) και μέγιστη παραγόμενη ισχύ  $N_{dis}=7864$  kW. Αντίθετα στην περίπτωση του σεναρίου 2, όπου οι τιμές των παραμέτρων θεωρούνται ότι ανταποκρίνονται σε ένα μικρότερο τυπικό σύστημα ταινιοδρόμου μικρότερης δυναμικότητας (1200 t/h) μήκους 500 m με κλίση 12° (υψομετρική διαφορά 104 m) ο συντελεστής απόδοσης  $\eta_{es}$  ανέρχεται σε 0,76 και μέγιστη παραγόμενη ισχύ  $N_{dis}=330$  kW.

Η ανάλυση αβεβαιότητας-ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε στη συνέχεια για τις περιπτώσεις των δύο ανωτέρω σεναρίων προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση των παραμέτρων με αβεβαιότητα του Πίνακα 3.3 στην υπολογιζόμενη τιμή των  $\eta_{es}$  και  $N_{dis}$ . Στις Εικόνες 3.6 και 3.7 δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης αβεβαιότητας (ιστογράμματα) για το  $\eta_{es}$  και  $N_{dis}$  για 10000 επαναλήψεις για το σενάριο 1. Στα ιστογράμματα αυτά εκτός από την προσαρμογή της πλέον κατάλληλης θεωρητικής κατανομής (στην περίπτωση αυτή είναι η κατανομή Βήτα) υπολογίζεται και το εύρος διακύμανσης των  $\eta_{es}$  και  $N_{dis}$  με βεβαιότητα 95%. Τα εύρη αυτά υπολογίστηκαν και για τα δυο σενάρια που μελετήθηκαν και δίνονται στον Πίνακα 3.5.



Εικόνα 3.6:Κατανομή Παραγόμενης ισχύος  $N_{dis}$  σεναρίου 1



Εικόνα 3.7: Κατανομή συντελεστή απόδοσης συστήματος αποθήκευσης  $n_{es}$  σεναρίου 1

Πίνακας 3.5: Πίνακας δεικτών απόδοσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ( $n_{es}$  και  $N_{dis}$ ) για βεβαιότητα 95%

Δείκτης απόδοσης	Εύρος διακύμανσης για βεβαιότητα 95%	
	Σενάριο 1	Σενάριο 2
$n_s$	0,75 - 0,86	0,52 - 0,72
$N_{dis}$ (kW)	653 - 5746	40 - 352

Υπολογίστηκαν επίσης η μέση τιμή (mean), η τυπική απόκλιση (Standard deviation), ο συντελεστής μεταβλητότητας (Coeff. of variation), το ελάχιστο (Minimum) και το μέγιστο (Maximum) των  $n_{es}$  και  $N_{dis}$  για τα δυο σενάρια που μελετήθηκαν και δίνονται στους Πίνακες 3.6 και 3.7. Ο συντελεστής μεταβλητότητας ορίζεται ως το πηλίκο της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή και αποτελεί μέτρο της σχετικής μεταβλητότητας.

Πίνακας 3.6: Πίνακας στατιστικών μεγεθών για τον συντελεστή απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας  $n_{es}$  σεναρίου 1

Σενάρια	Μέση τιμή (mean)	Τυπική απόκλιση (Standard deviation)	Συντελεστής μεταβλητότητας (Coeff. of variation)	Ελάχιστο (Minimum)	Μέγιστο (Maximum)
Σενάριο 1	0,81	0,03	0,04	0,68	0,9
Σενάριο 2	0,65	0,05	0,07	0,44	0,75

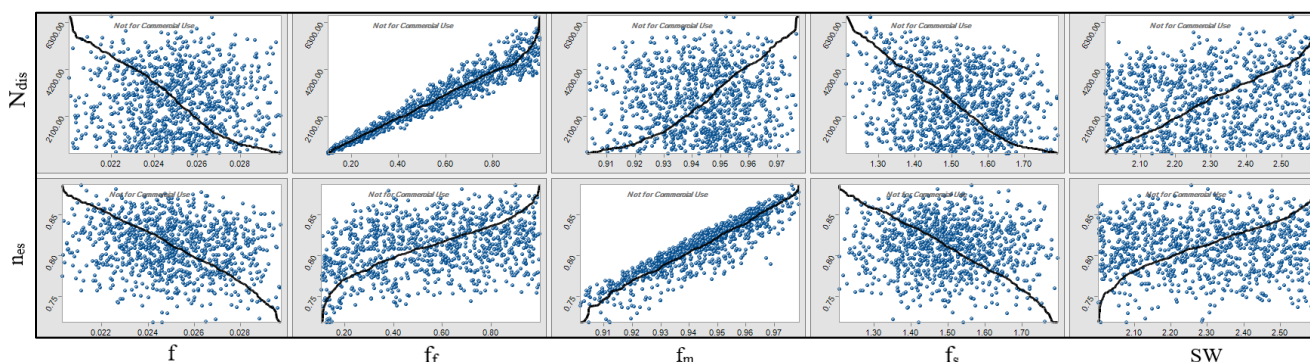
Πίνακας 3.7: Πίνακας στατιστικών μεγεθών για την παραγόμενη ισχύ  $N_{dis}$  σεναρίου 1

Σενάρια	Μέση τιμή (mean)	Τυπική απόκλιση (Standard deviation)	Συντελεστής μεταβλητότητας (Coeff. of variation)	Ελάχιστο (Minimum)	Μέγιστο (Maximum)
Σενάριο 1	3030	1463	0,48	300	6261
Σενάριο 2	185	90	0,48	27	436

Ο συντελεστής μεταβλητότητας του  $n_{es}$ , που είναι ίσος με 0,04 και 0,07 για το σενάριο 1 και 2 αντίστοιχα, θεωρείται αρκετά χαμηλός . Αντιθέτως, ο συντελεστής μεταβλητότητας της παραγόμενης ισχύς  $N_{dis}$  είναι και για τα δύο σενάρια ίσος με 0,48 και θεωρείται υψηλός [7]. Δηλαδή το εύρος τιμών της  $N_{dis}$  είναι πολύ μεγαλύτερο από το εύρος τιμών  $n_{es}$ . Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα συχνότητας των τιμών της  $N_{dis}$ , της Εικόνας 3.6, όπου το διάστημα μεταβολής της παραγόμενης ισχύς  $N_{dis}$  για επίπεδο εμπιστοσύνης 95% κυμαίνεται από 653kW έως 5746kW. Σε αντίθεση ο συντελεστή απόδοσης  $n_{es}$  για το ίδιο επίπεδο εμπιστοσύνης κυμαίνεται από 0,75 έως 0,86 (Εικόνα 3.7). Η μεγάλη μεταβολή της παραγόμενης ισχύς  $N_{dis}$  σχετίζεται με το μεγάλο εύρος τιμών του συντελεστή πλήρωσης  $f_f$  που είναι βασική παράμετρος αβεβαιότητας για την παραγόμενη ισχύ  $N_{dis}$ , όπως φαίνεται και στην ανάλυση ευαισθησίας που ακολουθεί.

Η συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων αβεβαιότητας και των δεικτών απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας ( $n_{es}$  και  $N_{dis}$ ) απεικονίζεται με τη μορφή διαγραμμάτων διασποράς στην εικόνα 3.8.

Από την εικόνα 3.8 φαίνεται ότι η παραγόμενη ισχύς  $N_{dis}$  παρουσιάζει την ισχυρότερη συσχέτιση με τον συντελεστή πλήρωσης ταινίας  $f_f$ , ενώ ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης  $n_{es}$  με τον συντελεστή απόδοσης του κινητήριου συστήματος  $f_m$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι αβεβαιότητας παρουσιάζουν σαφώς ασθενέστερη συσχέτιση με  $N_{dis}$  και  $n_{es}$ .



Εικόνα 3.8: Διαγράμματα διασποράς αβέβαιων παραμέτρων - δεικτών απόδοσης συστήματος αποθήκευσης σεναρίου 1

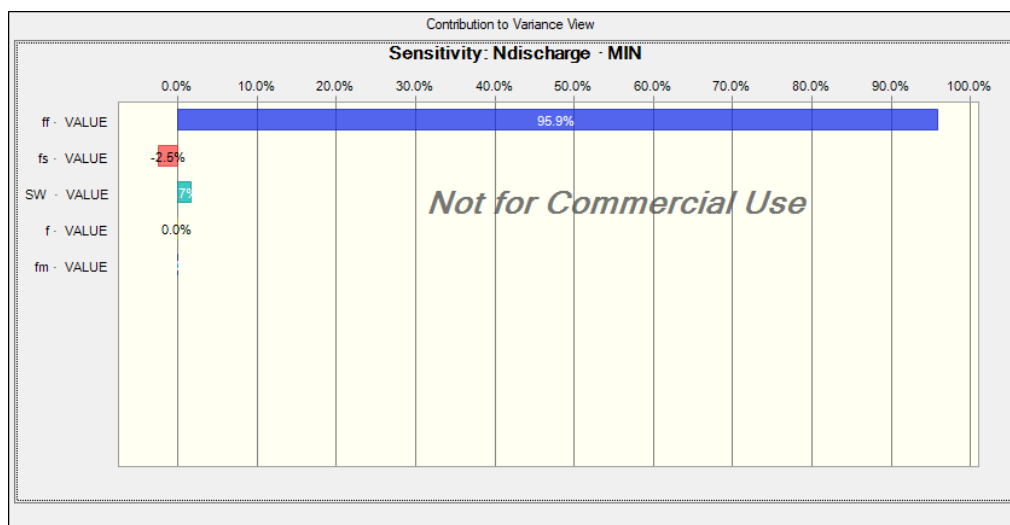
Ο υπολογισμός της συνεισφοράς κάθε παράγοντα αβεβαιότητας υπολογίστηκε με βάση την ανάλυση της διασποράς (ANOVA) και δίνεται στους πίνακες 3.8 και 3.9 για τα σενάρια 1 και 2 αντίστοιχα. Στους ίδιους πίνακες δίνεται επίσης και ο συντελεστής συσχέτισης κατά Spearman (rank correlation) των παραμέτρων αβεβαιότητας με  $N_{dis}$  και  $n_{es}$ . Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας του Πίνακα 3.8 για το σενάριο 1 απεικονίζονται στα ραβδογράμματα των Εικόνων 3.9 και 3.10, ενώ για το σενάριο 2 στις Εικόνες 3.11 και 3.12.

Πίνακας 3.8: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας σεναρίου 1

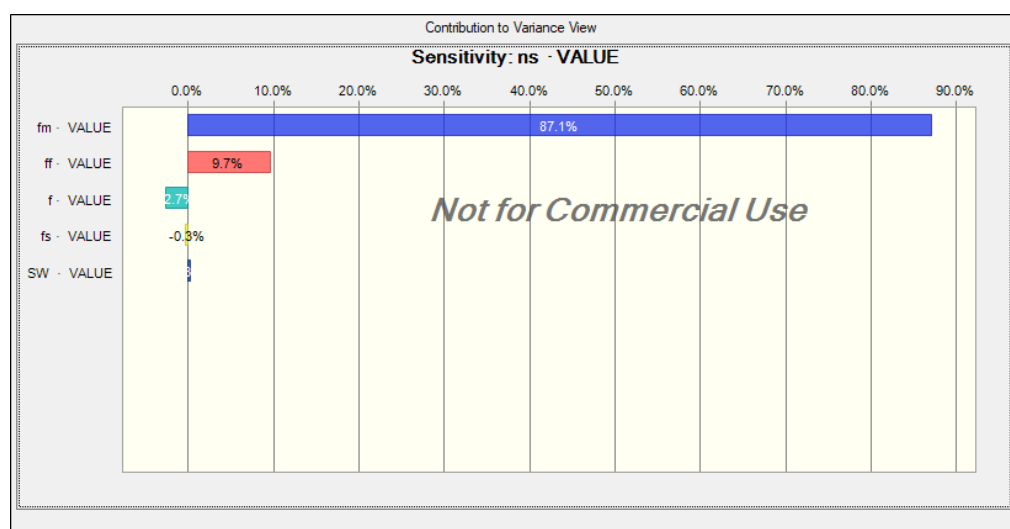
Παράμετροι αβεβαιότητας	Συνεισφορά στη διακύμανση		Συντελεστής συσχέτισης (Spearman)	
	$n_{es}$	$N_{dis}$	$n_{es}$	$N_{dis}$
$f_f$	9,7 %	96 %	0,3	0,97
$f_s$	0,3 %	2,5 %	0	-0,16
SW	0,2 %	2 %	0,05	0,13
$f$	3 %	0	-0,16	-0,004
$f_m$	87 %	0	0,91	0,002

Πίνακας 3.9: Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας σεναρίου 2

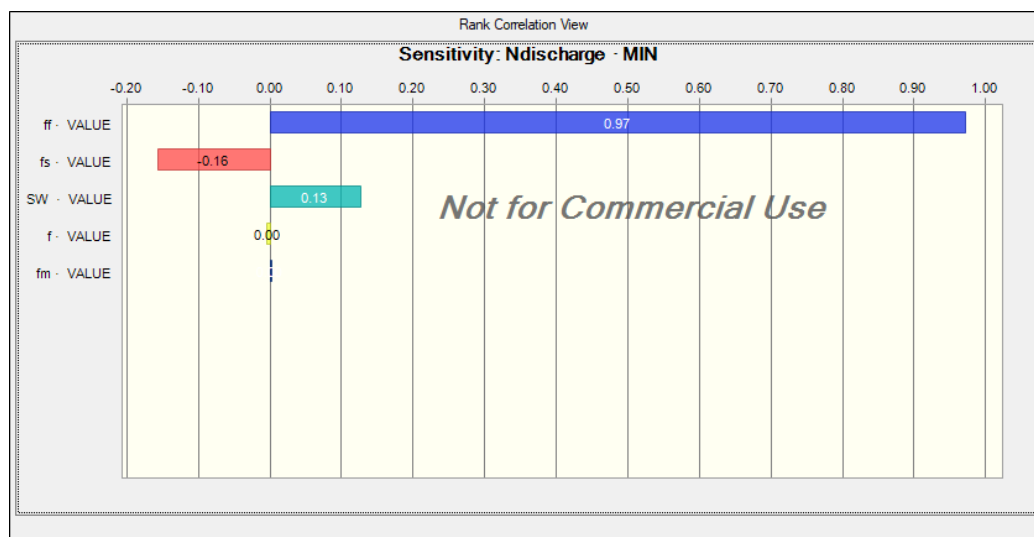
Παράμετροι αβεβαιότητας	Συνεισφορά στη διακύμανση		Συντελεστής συσχέτισης (Spearman)	
	$n_{es}$	$N_{dis}$	$n_{es}$	$N_{dis}$
$f_f$	58 %	95 %	0,72	0,97
$f_s$	0,9 %	2 %	-0,09	-0,15
SW	0,9 %	2 %	0,09	0,15
$f$	6 %	0	-0,23	-0,014
$f_m$	34 %	0	0,55	-0,006



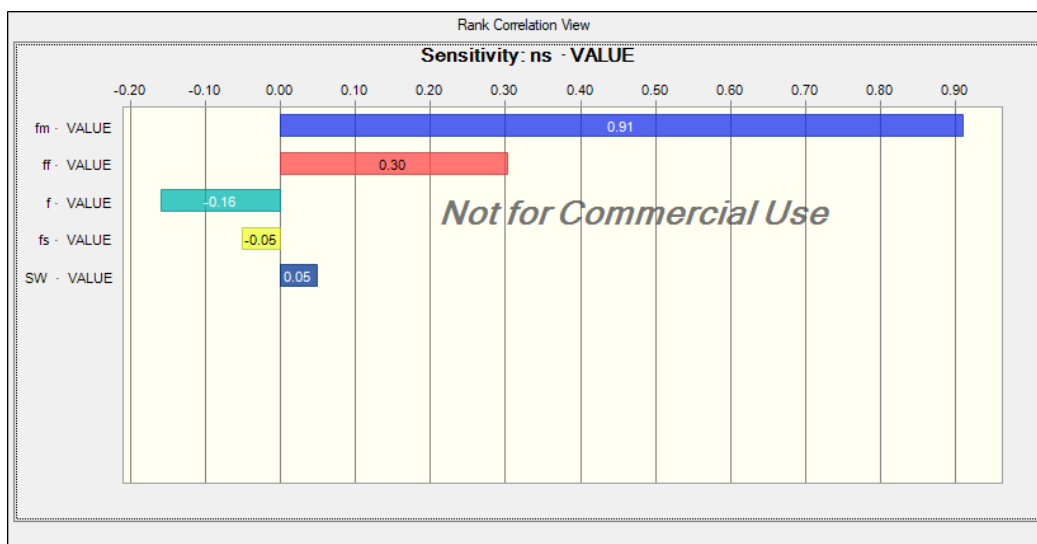
Εικόνα 3.9: Ποσοστό συνεισφοράς των παραμέτρων αβεβαιότητας στη διακύμανση παραγόμενης ισχύος  $N_{dis}$  (σενάριο 1)



Εικόνα 3.10: Ποσοστό συνεισφοράς των παραμέτρων αβεβαιότητας στη διακύμανση συντελεστή απόδοσης  $n_{es}$  (σενάριο 1)



Εικόνα 3.11: Συντελεστές συσχέτισης παραμέτρων αβεβαιότητας και συντελεστή απόδοσης  $N_{dis}$  (σενάριο 1)

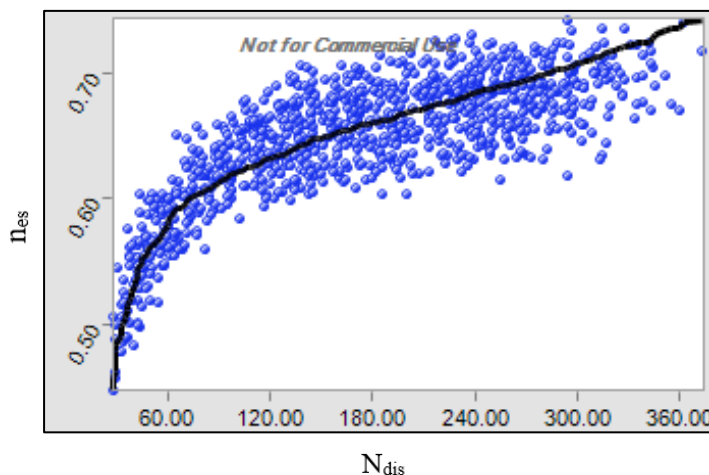


Εικόνα 3.12: Ραβδόγραμμα βαθμών συσχέτισης μεταξύ αβέβαιων παραμέτρων και παραγόμενης ισχύος  $n_{es}$  σεναρίου 1

Τόσο από τους πίνακες όσο και από διαγράμματα φαίνεται ότι για το σενάριο 1 η παράμετρος αβεβαιότητας που επηρεάζει την παραγόμενη ισχύ  $N_{dis}$  είναι ο συντελεστής πλήρωσης ταινίας  $f_f$  (συνεισφορά 96%), ενώ ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης  $n_{es}$  επηρεάζεται κυρίως από τον συντελεστή απόδοσης του κινητήριου συστήματος  $f_m$  (συνεισφορά 87%). Οι υπόλοιπες παράμετροι αβεβαιότητας παρουσιάζουν σαφώς επίδραση σε  $N_{dis}$  και  $n_{es}$  αφού η συνεισφορά τους είναι εξαιρετικά χαμηλότερη (από 0-9,7%). Στο σενάριο 2, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 3.9, για την παραγόμενη ισχύ  $N_{dis}$  εξακολουθεί να είναι ο συντελεστής πλήρωσης ταινίας  $f_f$  η παράμετρος αβεβαιότητας που την επηρεάζει καθοριστικά (συνεισφορά 95%). Αντίθετα ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης  $n_{es}$  φαίνεται να επηρεάζεται

σημαντικά τόσο από τον συντελεστή πλήρωσης ταινίας  $f_f$  (συνεισφορά 58%) όσο και από τον συντελεστή απόδοσης του κινητήριου συστήματος  $f_m$  (συνεισφορά 34%).

Τέλος στην Εικόνα 3.13 δίνεται το διάγραμμα συσχέτισης της απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με την παραγόμενη ισχύ  $N_{dis}$  για το σενάριο 2. Η αύξηση της παραγόμενης ισχύος οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης. Η συσχέτιση είναι μη γραμμική με ταχεία αύξηση του  $\eta_{es}$  στην αρχή και μικρότερη αύξηση στη συνέχεια με τάση σταθεροποίησης. Η συμπεριφορά αυτή είναι αναμενόμενη αφού είναι γνωστό ότι μικρός βαθμός πλήρωσης της ταινίας που οδηγεί σε χαμηλή παραγόμενη ισχύ οδηγεί ταυτόχρονα και σε μειωμένο συντελεστή απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.



Εικόνα 3.13: Συσχέτιση της απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με την αποδιδόμενη ισχύ (σενάριο 2)

### 3.4: Σύγκριση απόδοσης με άλλα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Ο συντελεστής απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας  $\eta_{es}$  που βασίζεται σε ταινιοδρόμους (Conveyor Energy Storage ή CES) συγκρίθηκε με τους αντίστοιχους συντελεστές άλλων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται σήμερα. Τέτοια συστήματα είναι η αντλιοταμίευση (PHS, pumped hydro storage), τα συστήματα περιστρεφόμενων σφονδύλων (FES, flywheel energy storage και τα προηγμένα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μπαταρίες (ABES, advanced battery energy storage). Ως εύρος τιμών του τιμή του  $\eta_{es}$  θεωρήθηκαν οι μέσες τιμές που υπολογίστηκαν για τα σενάρια 1 και 2 και κυμαίνονται από 65 έως 81%.

Οι τιμές των δεικτών απόδοσης των διαφόρων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας δίνονται στον Πίνακα 3.10 [5]. Συγκρινόμενη με άλλα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η μέθοδος CES εμφανίζεται ανταγωνιστική, ιδιαίτερα αν ληφθεί υπόψη ότι τα συστήματα CES έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, δεν έχουν απώλειες αποθήκευσης και δεν παράγουν απόβλητα κατά τη λειτουργία τους.

Πίνακας 3.10: Συντελεστές απόδοσης διαφορετικών τύπων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας [5]

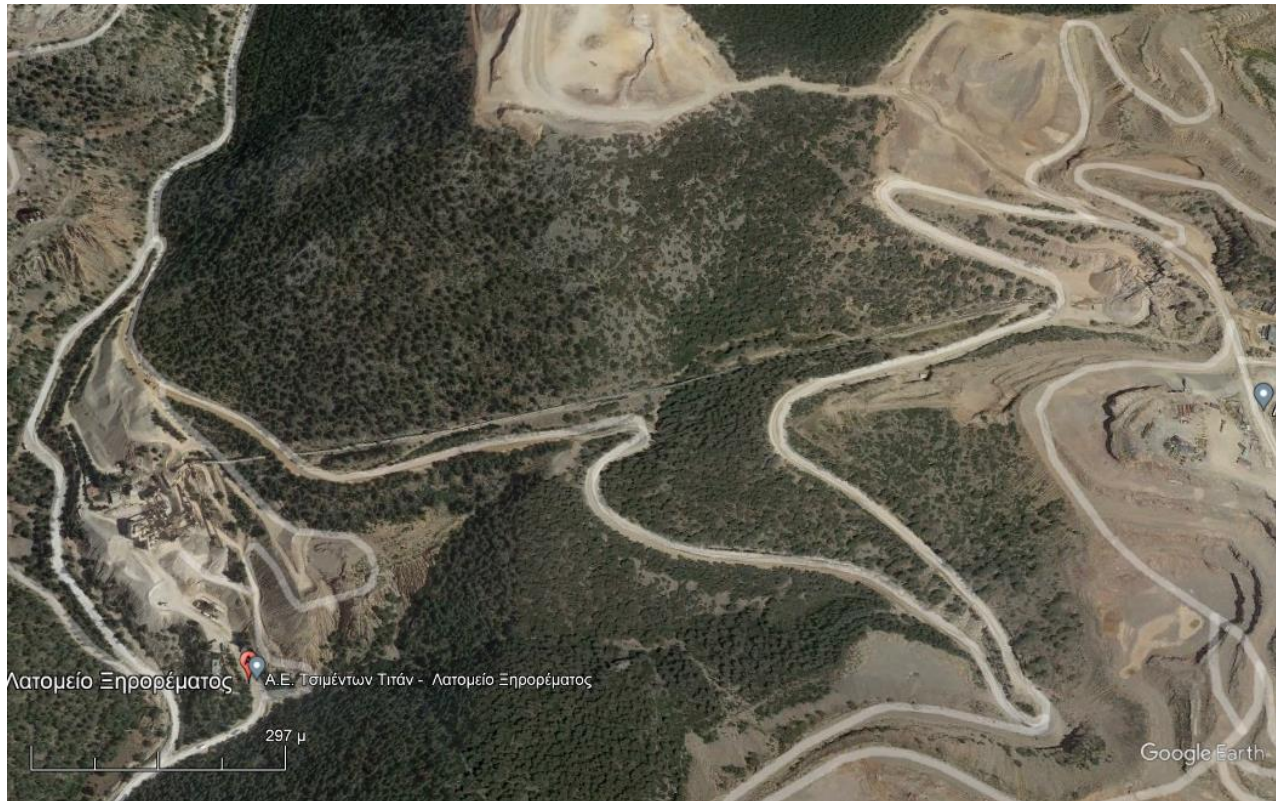
Δείκτης απόδοσης	CES (Conveyor Energy Storage)	PHS (Pumped Hydro Storage)	ABES (Advanced Battery Energy Storage)	FES (Flywheel Energy Storage)
$\eta_{es}$	65% - 81%	76% - 85%	60% - 95%	85% - 87%



## Κεφάλαιο 4: Εφαρμογή σε υπάρχουσα εγκατάσταση ταινιοδρόμου λατομείου

### 4.1: Περιγραφή της εγκατάστασης και του συστήματος ταινιοδρόμων

Στο κεφάλαιο αυτό εξετάζεται υπάρχουσα εγκατάσταση συστήματος κατηφορικού ταινιοδρόμου που εκτός από τη μεταφορά υλικών ανακτά και ενέργεια κατά τη λειτουργία του. Το σύστημα είναι εγκατεστημένο στο λατομείο Ξηρορέματος Αττικής (Εικόνα 4.1) που στην Α.Ε Τσιμέντων ΤΙΤΑΝ. Στο λατομείο γίνεται εξόρυξη ασβεστολιθικών αδρανών υλικών για τις ανάγκες της εταιρείας. Η εξόρυξη γίνεται με χρήση εκρηκτικών υλών με το υλικό να μεταφέρεται από χώρο εξόρυξης (βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο) στον χώρο επεξεργασίας του την χρήση ενός καινοτόμου συστήματος ταινιοδρόμου αποκαλούμενο MT6 (Εικόνα 4.2). Πιο συγκεκριμένα το υλικό μεταφέρεται έπειτα από ανατίναξη από τα μέτωπα εξόρυξης σε ειδικούς σπαστήρες και από εκεί καταλήγει σε ένα σωρό απόθεσης. Στη συνέχεια μέσω της ταινίας τροφοδοτή MT5, το υλικό φορτώνεται στον MT6 και από εκεί ξεκινά η καθοδική κίνησή του. Η λειτουργία του συστήματος του ταινιοδρόμου MT6 δεν περιορίζεται στην διαδικασία της μεταφοράς και απόθεσης του υλικού αλλά αποσκοπεί και στην ανάκτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά την καθοδική κίνησή του μέσω αναγεννητικών γεννητριών.



Εικόνα 4.1: Αεροφωτογραφία των εγκαταστάσεων του λατομείου Ξηρορέματος, όπου φαίνεται το ταινιοδρόμος ΤΔ6.





Εικόνα 4.2: Αριστερά: Αεροφωτογραφία των εγκαταστάσεων του λατομείου Ξηρορέματος, όπου φαίνεται η θέση φόρτωσης του υλικού από τους σωρούς στον ταινιόδρομο ΤΔ6. Δεξιά: Θέση απόθεσης του υλικού από τον ταινιόδρομο ΤΔ6 σε σωρούς.

## 4.2: Υπολογισμός της απόδοσής του MT6 ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας – ανάλυση αβεβαιότητας και ευαισθησίας

Τα χαρακτηριστικά της ταινίας και του μεταφερόμενου υλικού δίνονται στον Πίνακα 4.1 και αποκτήθηκαν έπειτα από επικοινωνία με τον υπεύθυνο μηχανικό και τον ηλεκτρολόγο του λατομείου. Το σύστημα του ταινιοδρόμου MT6 εξετάστηκε ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και υπολογίστηκε η ισχύς του και ο συντελεστής απόδοσης του θεωρώντας ένα κύκλο φόρτισης και ένα κύκλο εκφόρτισης διάρκειας μια ώρας έκαστος. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι δείκτες απόδοσης όσον αφορά την αποθηκευτική ικανότητα του συστήματος, σύμφωνα με το μοντέλο κατά DIN 22101 και ISO 5048 που αναλύθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά ταινιοδρόμου MT6 του λατομείου Ξηρορέματος

Συμβολισμός	Χαρακτηριστικά ταινιοδρόμου και μεταφερόμενου υλικού	Values	Μονάδες μέτρησης
L	Μήκος μεταφοράς	1000	m
B	Πλάτος μεταφορικού ιμάντα	1200	mm
H	Υψομετρική διαφορά	174	m
$\delta$	Οριζόντια κλίση ταινιοδρόμου	10	Degrees
$\alpha$	Κλίση πλευρικών κυλίστρων	35	Degrees
v	Ταχύτητα κίνησης ιμάντα μεταφοράς	1	m/s
type	Τύπος ιμάντα μεταφοράς	σκαφιδωτός	-
$h_1$	Ύψος σωρού απόθεσης	15	m
$f_f$	Συντελεστής πλήρωσης ταινίας	0,7	-
$f_m$	Συντελεστής απόδοσης κινητήριου συστήματος	0,95	-
f	Συντελεστής αντιστάσεων λόγω τριβής κυλίστρων	0,02	-
$f_s$	Συντελεστής επιπλήσματος μεταφερόμενου υλικού	1,5	-
SW	Ειδικό βάρος μεταφερόμενου υλικού	2,6	t/m <sup>3</sup>
Idler_number	Πλήθος κυλίστρων	3	-
$G_m$	Φορτίο μεταφορά ανά τρέχον μέτρο	30	kp

Οι συντελεστές που αντιστοιχούν στα παραπάνω χαρακτηριστικά ταινιοδρόμου και η επιφάνεια διατομής του μεταφερόμενου υλικού επί της ταινίας σύμφωνα με του πίνακες της μεθόδου κατά DIN 22101 και ISO 5048 δίνονται στον πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Συντελεστές που αντιστοιχούν χαρακτηριστικά ταινιόδρομου MT6 του λατομείου Ξηρορέματος

Συμβολισμός	Περιγραφή	Τιμή
$\xi$	Συντελεστής γωνίας πλευρικών κυλίστρων	587
$\lambda$	Συντελεστής διόρθωσης οριζόντιας κλίσης	0,95
C	Συντελεστής μήκους μεταφοράς	1,09
F	Επιφάνεια διατομής μεταφερόμενου υλικού (m <sup>2</sup> )	0,17

Τα υπολογιζόμενα μεγέθη όσον αφορά την μεταφορική ικανότητα του MT6, και την ισχύ, δίνονται στον πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Συντελεστές που αντιστοιχούν χαρακτηριστικά ταινιόδρομου MT6 του λατομείου Ξηρορέματος

Συμβολισμός	Υπολογιζόμενα μεγέθη	Τιμές
Q	Μεταφορική ικανότητα (m <sup>3</sup> /h)	594
Q <sub>t</sub>	Μεταφορική ικανότητα (t/h)	720
N <sub>empty</sub>	Απαιτούμενη ισχύς για την οριζόντια κίνηση άδειου ταινιόδρομου	6
N <sub>horizontal</sub>	Απαιτούμενη ισχύς για την οριζόντια κίνηση φορτωμένου ταινιόδρομου (kW)	50
N <sub>lifted</sub>	Απαιτούμενη ισχύς για την ανηφορική κίνηση φορτωμένου ταινιόδρομου (kW)	377
N <sub>total</sub>	Συνολική απαιτούμενη ισχύς λειτουργίας ταινιόδρομου (kW)	457
N <sub>a</sub>	Ισχύς άξονα τυμπάνου κίνησης (kW)	450
N <sub>discharged</sub>	Παραγόμενη ισχύς λόγω κατηφορικής κίνησης φορτωμένου ταινιόδρομου (kW)	302

Στον πίνακα 4.4 παρουσιάζονται οι δείκτες απόδοσης του MT6 θεωρούμενου ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με βάση το μοντέλο ενεργειακής ανάλυσης του κεφαλαίου 2. Τα υπολογιζόμενα μεγέθη αναφέρονται σε ένα κύκλο που περιλαμβάνει φόρτιση διάρκειας 1 ώρας και ένα εκφόρτιση ίσης διάρκειας.

Πίνακας 4.4: Δείκτες απόδοσης του MT6 θεωρούμενου ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας

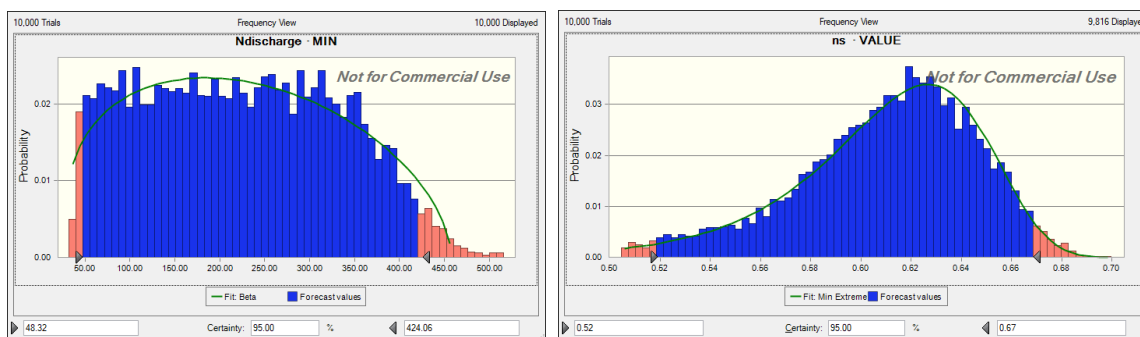
Συμβολισμός	Δείκτες απόδοσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας	Τιμές (kWh)
E <sub>in</sub>	Ενέργεια τροφοδοσίας συστήματος	457
L <sub>ch</sub>	Απώλειες ενέργειας κατά τη φόρτιση συστήματος	57
L <sub>st</sub>	Απώλειες ενέργειας κατά τη διάρκεια αποθήκευσης	-
L <sub>ds</sub>	Απώλειες ενέργειας κατά την αποφόρτιση του συστήματος	57
E <sub>out</sub>	Αποδιδόμενη ενέργεια συστήματος	302

Η αποδοτικότητα του συστήματος ως μονάδα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται από το πηλίκο της αποδιδόμενης ενέργειας προς την ενέργεια τροφοδοσίας συστήματος:

$$n_{es} = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{302}{457} = 0,66 \quad (4.1)$$

Με βάση την παραπάνω ανάλυση φαίνεται ότι το σύστημα του ταινιοδρόμου MT6 του λατομείου Ξηρορέματος, αν λειτουργήσει με στόχο την αποθήκευση ενέργειας μπορεί να πετύχει βάσει των σχεδιαστικών και λειτουργικών του χαρακτηριστικών (όπως δίνονται στον Πίνακα 4.1) απόδοση  $\eta_{es}=66\%$ . Ο συντελεστής απόδοσης είναι απέχει αρκετά από τη βέλτιστη τιμή του σεναρίου θεωρητικών τιμών στο 0,9. Η τιμή αυτή είναι μικρότερη από εκείνη ενός τυπικού συστήματος που εξετάστηκε στο σενάριο 2 που ήταν 76%. Η απόκλιση αυτή οφείλεται κυρίως στην διαφορά τιμών οριζόντιας κλίσης του ταινιοδρόμου ( $12^\circ$  για το τυπικό σύστημα και  $10^\circ$  για τον MT6). Αντίθετα οι απώλειες ενέργειας κατά την φόρτιση και αποφόρτιση του συστήματος λόγω ύψους σωρού απόθεσης φαίνεται ότι δεν επηρέασαν σημαντικά την απόδοση του συστήματος.

Και στο σύστημα του ταινιοδρόμου MT6 έγινε ανάλυση αβεβαιότητας και τα διαγράμματα συχνότητας της για τους δείκτες απόδοσης φαίνονται στα ιστογράμματα της Εικόνας 4.3. Το ιστόγραμμα της παραγόμενης ισχύος  $N_{discharge}$  και συντελεστή απόδοσης  $\eta_{es}$  φαίνεται ότι προσεγγίζονται καλύτερα από την κατανομή βήτα (Beta) και από την κατανομή ακραίων τιμών (Extreme value). Υπολογίστηκε το εύρος διακύμανσης της  $N_{discharge}$  και  $\eta_{es}$ , ενώ για βεβαιότητας 95% αντίστοιχα σε 48,3kW – 424,1 kW και 52%-67%.



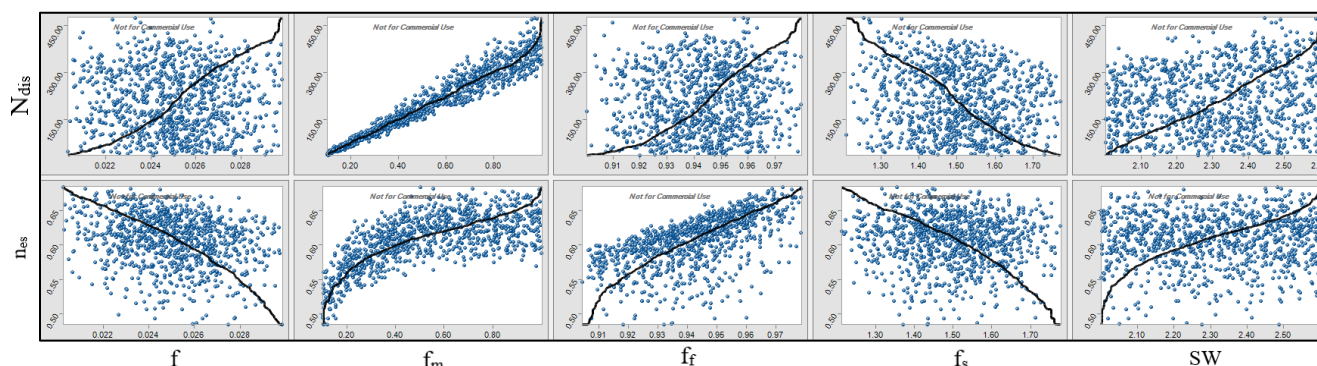
Εικόνα 4.3:Κατανομές συχνότητας δεικτών απόδοσης σεναρίου τιμών λατομείου Ξηρορέματος

Υπολογίστηκαν επίσης η μέση τιμή (mean), η τυπική απόκλιση (Standard deviation), ο συντελεστής μεταβλητότητας (Coeff. of variation), το ελάχιστο (Minimum) και το μέγιστο (Maximum) των  $\eta_{es}$  και  $N_{discharge}$  και δίνονται στον Πίνακα 4.5. Φαίνεται ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας για την παραγόμενη ισχύ είναι πολύ υψηλότερος σε σχέση με εκείνο του συντελεστή απόδοσης.

Πίνακας 4.5:Στατιστικά στοιχεία δεικτών απόδοσης συστήματος MT6 του λατομείου Ξηρορέματος

Δείκτες απόδοσης	Mean	Standard deviation	Coeff. Of variation	Minimum	Maximum
$\eta_{es}$	0,61	0,04	0,06	0,44	0,7
$N_{discharge}$	223	110	0,49	25	459

Η συσχέτιση μεταξύ αβέβαιων παραμέτρων και δεικτών απόδοσης του T6 δίνεται στην εικόνα 4.5 με τη μορφή διαγραμμάτων διασποράς. Φαίνεται ότι οι παράμετροι με την μεγαλύτερη επίπτωση στα εξαγόμενα αποτελέσματα του μοντέλου είναι δύο. Πρόκειται για τον συντελεστή απόδοσης κινητήριου συστήματος  $f_m$ , καθώς και τον συντελεστή πλήρωσης της μεταφορικής ταινίας  $f_f$ . Οι υπόλοιπες αβέβαιες παράμετροι δεν φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά την τιμή των δεικτών απόδοσης του συστήματος αποθήκευσης.



Εικόνα 4.4: Διαγράμματα διασποράς αβεβαιών παραμέτρων – δεικτών απόδοσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας λατομείου Ξηρορέματος

Η επίδραση των αβεβαιών παραμέτρων στην τιμή των δεικτών απόδοσης συστήματος ποσοτικοποιείται με βάση τους δείκτες ευαισθησίας του πίνακα 4.6, όπου περιλαμβάνεται ο ταξινομικός δείκτης συσχέτισης κατά Spearman, καθώς και το ποσοστό συνεισφοράς εκείνων στη διακύμανση των δεικτών απόδοσης συστήματος αποθήκευσης όπως έχει υπολογιστεί από την ανάλυση της διασποράς. Επιλέχθηκε ο ταξινομικός δείκτης συσχέτισης καθώς μπορεί να εκφράσει και μία μη γραμμική σχέση μεταξύ παραμέτρων και δεικτών απόδοσης, όπως στην περίπτωση του συντελεστή  $f_m$ . Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.7 φαίνεται η σημαντική επίδραση των  $f_f$  και  $f_s$  για τον συντελεστή στον  $n_{es}$  και του  $f_f$  στο  $N_{discharge}$ .

Πίνακας 4.6: Δείκτες ευαισθησίας για τον MT6 του λατομείου Ξηρορέματος

Παράμετροι αβεβαιότητας	Συνεισφορά στη διακύμανση		Συντελεστής συσχέτισης (Spearman)	
	$n_{es}$	$N_{discharge}$	$n_{es}$	$N_{discharge}$
$f_f$	47,2%	95,6%	0,64	0,97
$f_s$	0,68%	2,2%	-0,08	-0,15
SW	0,73%	2,2%	0,08	0,15
$f$	6,08%	0	-0,23	0,01
$f_m$	45,4%	0	0,63	0,003

### 4.3: Σύγκριση των θεωρητικών υπολογισμών με πραγματικά απολογιστικά στοιχεία

Στο Πίνακα 4.7 δίνονται τα απολογιστικά δεδομένα του έτους 2022 που αφορούν την ετήσια μεταφερόμενη ποσότητα θραυσμένου υλικού σε τόνους, καθώς και την ενέργεια που ανακτήθηκε σε MWh από τον MT6. Η παραγόμενη ισχύς του συστήματος, καθώς και ο συντελεστής απόδοσης ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας υπολογίστηκαν με βάση τα απολογιστικά στοιχεία και συγκρίθηκαν με τις εξαγόμενες τιμές του μοντέλου ενεργειακής ανάλυσης κατά DIN. Για τους υπολογισμούς θεωρήθηκε η μέση μεταφορική ικανότητα είναι 600 t/h (τιμή που δόθηκε από τους υπεύθυνους της εταιρείας) και ότι οι ώρες λειτουργίας υπολογίστηκαν μέσω διαίρεσης της συνολικής παραγωγής του μήνα με τη μέση μεταφορική ικανότητα. Η ενέργεια που ανακτάται ( $E_{out}$ ) κατά την μεταφορά του υλικού από το μέτωπο στην πλατεία και η ενέργεια που απαιτείται για μεταφορά από την πλατεία στο μέτωπο ( $E_{in}$ ) υπολογίστηκαν με βάση τις σχέσεις 2.5 και 2.4 αντίστοιχα. Η θεωρητική

απόδοση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας υπολογίστηκε ως το πηλίκο της ενέργειας που ανακτάται θεωρητικά προς την ενέργεια που απαιτείται θεωρητικά. Η πραγματική απόδοση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας υπολογίστηκε ως το πηλίκο της ενέργειας που ανακτήθηκε 9απολογιστικά στοιχεία) προς την ενέργεια που απαιτείται θεωρητικά.

Πίνακας 4.7: Απολογιστικά στοιχεία μεταφοράς υλικού και ανάκτησης ενέργειας του λατομείου Ξηρορέματος για το έτος 2022

Μήνας	Παραγωγή (tn)	Ενέργεια που ανακτήθηκε (MWh)	Ώρες λειτουργίας (600 t/h)	Ενέργεια που ανακτάται θεωρητικά(MWh)	Ενέργεια που απαιτείται θεωρητικά(MWh)	$\eta_{es}$ Θεωρητικό	$\eta_{es}$ πραγματικό
Ιανουάριος	100087	22,91	167	55,87	82,12	0,68	0,28
Φεβρουάριος	111137	27,12	185	62,04	91,18	0,68	0,30
Μάρτιος	122935	29,90	205	68,62	100,86	0,68	0,30
Απρίλιος	104780	23,65	175	58,49	85,97	0,68	0,8
Μάιος	126956	31,78	212	70,87	104,16	0,68	0,31
Ιούνιος	114742	31,27	191	64,05	94,14	0,68	0,33
Ιούλιος	104572	29,07	174	58,37	85,80	0,68	0,34
Αύγουστος	72503	20,26	121	40,47	59,49	0,68	0,34
Σεπτέμβριος	115028	32,53	192	64,21	94,37	0,68	0,34
Οκτώβριος	117574	33,03	196	65,63	96,46	0,68	0,34
Νοέμβριος	129715	35,64	216	72,41	106,42	0,68	0,33
Δεκέμβριος	129186	35,12	215	72,11	105,99	0,68	0,33
<b>Σύνολα</b>	<b>1349215</b>	<b>352,27</b>	<b>2249</b>	<b>753,14</b>	<b>1106,97</b>	<b>0,68</b>	<b>0,32</b>

Παρατηρώντας τα δεδομένα του πίνακα 4.7 γίνεται φαίνεται ότι οι πραγματικές τιμές της ανακτώμενης ενέργειας, καθώς και του συντελεστή απόδοσης  $\eta_{es}$  είναι μικρότερες από τις υπολογιζόμενες του θεωρητικές βάσει του μοντέλου DIN 22101. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα του ταινιόδρομου ΤΔ6 του λατομείου Ξηρορέματος δεν έχει σχεδιαστεί και κατασκευασθεί ως σύστημα αποθήκευσης, αλλά ως σύστημα μεταφοράς υλικού. Ο συντελεστής πλήρωσης του μεταφορικού ιμάντα δεν είναι σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του αλλά μεταβάλλεται προκειμένου να εξυπηρετεί τις ανάγκες της παραγωγής για συνεχή ροή του υλικού γεγονός που επιδρά αρνητικά στον  $\eta_{es}$ . Επιπροσθέτως, οι τιμές του συντελεστή απόδοσης του κινητήριου συστήματος και του συντελεστή αντιστάσεων τριβών είναι πιθανόν να είναι μην είναι αντιπροσωπευτικές του συστήματος. Εκτιμάται ότι η τιμή του συντελεστή απόδοσης ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας  $\eta_{es}$  θα πλησιάσει την θεωρητικά υπολογισθείσα τιμή αν το εν λόγω σύστημα βελτιστοποιηθεί κατάλληλα για να λειτουργήσει ως σύστημα αποθήκευσης ενέργειας και λειτουργεί με μια σταθερά υψηλή τιμή του συντελεστή πλήρωσης της ταινίας. Επιπλέον θα συμβάλει στην επίτευξη υψηλού  $\eta_{es}$  η επιλογή κυλίστρων με χαμηλό συντελεστή αντιστάσεων τριβής καθώς και ο υψηλό συντελεστή απόδοσης του κινητήριου συστήματος.



## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα - προτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκε η απόδοση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται στην μεταφορά εξορυγμένων υλικών από θέσεις με υψομετρική διαφορά με χρήση μεταφορικών ταινιοδρόμων (conveyor energy storage, CES). Το σύστημα αυτό εκμεταλλευόμενο την βαρυτική δυναμική ενέργεια του θραυσμένου υλικού που βρίσκεται σε υψηλότερο σημείο και την κίνηση του με κεκλιμένους ταινιοδρόμους προς το χαμηλότερο σημείο μετατρέπει την βαρυτική δυναμική σε ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση ειδικής διάταξης ανάκτησης της κινητικής ενέργειας (κινητήρας/γεννήτρια). Η διερεύνηση βασίστηκε στα υφιστάμενα μοντέλα υπολογισμού της μεταφορικής ικανότητας και της απαιτούμενης ισχύς λειτουργίας κατά ISO 5048 και DIN 22101 αφού φάνηκε από την συγκριτική μελέτη που έγινε με εκείνα που προτείνονται κατά CEMA ότι είναι καταλληλότερα.

Εξετάστηκαν θεωρητικά δυο σενάρια που ανταποκρίνονται σε ένα βελτιστοποιημένο σύστημα ταινιοδρόμων και σε ένα τυπικό. Για κάθε σενάριο υπολογίστηκε η επίδραση των παραμέτρων αβεβαιότητας στην απόδοση του συστήματος αποθήκευσης ενέργειας και ποιο συγκεκριμένα στον συντελεστή απόδοσης αποθήκευσης ενέργειας ( $n_{es}$ ) και στην ισχύ εξόδου ( $N_{discharge}$ ).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι από τους παράγοντες αβεβαιότητας που εξετάστηκαν εκείνοι με την μεγαλύτερη επίδραση στους δείκτες απόδοσης συστήματος αποθήκευσης ενέργειας είναι ο συντελεστής πλήρωσης της μεταφορικής ταινίας  $f_f$  και ο συντελεστής απόδοσης κινητήριου συστήματος (κινητήρας/γεννήτρια)  $f_m$ . Η υπολογισθείσα τιμή για τον συντελεστή αποθήκευσης ενέργειας ( $n_{es}$ ) κυμαίνεται από 0,68-0,90 για το βελτιστοποιημένο σύστημα (σενάριο 1) ενώ για το τυπικό σύστημα (σενάριο 2) κυμαίνεται από 0,44-0,75. Οι τιμές αυτές του  $n_{es}$  είναι συγκρίσιμες με άλλα υπάρχοντα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας (αντλιοσταμείωση, πεπιεσμένος αέρας, μπαταρίες και περιστρεφόμενοι σφόνδυλοι). Επιπλέον τα συστήματα CES έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής, μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, δεν έχουν απώλειες αποθήκευσης και δεν παράγουν απόβλητα κατά τη λειτουργία τους.

Όσον αφορά την ισχύ εξόδου ( $N_{discharge}$ ) των συστημάτων CES από την ανάλυση προέκυψε ότι η αυτή καθορίζεται από την μεταφορική ικανότητα του ταινιοδρόμου, το μήκος μεταφοράς και την κλίση του. Συστήματα CES μεγάλης ισχύος εξόδου έχουν υψηλότερους δείκτες  $n_{es}$ .

Τέλος τα αποτελέσματα της ανάλυσης υφιστάμενου συστήματος κατηφορικού ταινιοδρόμου (εγκατεστημένου σε λατομείο) που εκτός από τη μεταφορά υλικών ανακτά και ενέργεια κατά τη λειτουργία του έδειξαν ότι οι τιμές του συντελεστή  $n_{es}$ , όπως υπολογίστηκε από πραγματικά στοιχεία παραγωγής, είναι μικρότερες από τις θεωρητικά υπολογιζόμενες. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι το σύστημα δεν έχει βελτιστοποιηθεί με βάση τη λειτουργία του ως σύστημα αποθήκευσης αλλά ως σύστημα μεταφοράς υλικού. Ως κύρια αιτία της απόκλισης θεωρήθηκε ο χαμηλός και μεταβαλλόμενος συντελεστής πλήρωσης της ταινίας με υλικό  $f_f$ , που από την ανάλυση αβεβαιότητας ευαισθησίας φάνηκε ότι επηρεάζει καθοριστικά την τιμή του του συντελεστή  $n_{es}$ .

Για την λεπτομερέστερη μελέτη και ανάλυση ενός τέτοιου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας (CES) προτείνεται να γίνει οικονομική ανάλυση και προσομοίωση της λειτουργίας του για μεγάλα χρονικά διαστήματα έτσι ώστε να ληφθεί υπόψη η μεταβαλλόμενη προσφορά και ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιαίτερα σε δίκτυα στα οποία υπάρχει υψηλή διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

## Βιβλιογραφία

- [1] M. Sarstedt and E. Mooi, *Regression Analysis*, 2014, pp. 193–233. doi: 10.1007/978-3-642-53965-7\_7.
- [2] Γ. Παπαδόπουλος, 2015, *Εισαγωγή στις Πιθανότητες και τη Στατιστική*, Εκδόσεις Gutenberg
- [3] J. C. Helton, J. D. Johnson, C. J. Sallaberry, and C. B. Storlie, 2006, *Survey of Sampling-Based Methods for Uncertainty and Sensitivity Analysis*, SANDIA REPORT. [Online]. Available: <http://www.doc.gov/bridge>
- [4] Conveyor Equipment Manufacturers Association (CEMA), 1997, *Belt Conveyors for Bulk Materials*, Fifth Edition, Chapter 6.
- [5] Andrew Jennings, 2020, *Conveyor Energy Storage: A Battery and Pumped Hydro Alternative*, Power-News and Technology for the Global Energy Industry [Online]. Available: <https://www.powermag.com/conveyor-energy-storage-a-battery-and-pu...>
- [6] B. Zakeri, S.Syri, 2015, *Electrical energy storage systems A comparative life cycle cost analysis*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 42569-596.
- [7] M. Galetakis, C. Roumpos, G. Alevizos, and D. Vamvuka, Dec. 2011, *Production scheduling of a lignite mine under quality and reserves uncertainty*, Reliab Eng Syst Saf, vol. 96, no. 12, pp. 1611–1618, doi: 10.1016/j.ress.2011.08.005.
- [8] T. Mathaba and X. Xia, 2017, *Optimal and energy efficient operation of conveyor belt systems with downhill conveyors*, *Energy Effic*, vol. 10, no. 2, pp. 405–417, doi: 10.1007/s12053-016-9461-8.
- [9] Α. Δασκαλάκης, 2018, *Διάγνωση Προβλημάτων Λειτουργίας Μεταφορικών Μηχανών με Χρήση Ανέπαφων Αισθητήρων*, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διπλωματική Εργασία.
- [10] DIN, 2011, *Continuous conveyors - Belt conveyors for loose bulk materials - Basis for calculation and dimensioning*, Deutsches Institut für Normung E.V.
- [11] A. Saltelli, M. Ratto, T. Andres, F. Campolongo, J. Cariboni, D. Gatelli, M. Saisana, S. Tarantola, 2007, *Global Sensitivity Analysis, The Primer*, (e-book), Wiley, DOI:10.1002/9780470725184.
- [12] Oracle® Crystal Ball, 2007, *User's Guide*, Release 11.1.2.
- [13] K. P. Shah, *Construction and Maintenance of Belt Conveyors for Coal and Bulk Material Handling Plants* [Online]. Available: [www.practicalmaintenance.net](http://www.practicalmaintenance.net)
- [14] DUNLOP-ENERKA, *Conveyor Belt Technique - Design and Calculation*
- [15] Μ. Γαλετάκης, 2013, *Περιγραφή-Επιλογή και Υπολογισμός Απόδοσης Εξοπλισμού Επιφανειακών Εκμεταλλεύσεων*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις Πολυτεχνείου Κρήτης

