



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΦΟΡΕΙΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΤΥΠΩΜΑΤΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΑΣΤΙΚΩΝ
ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΩΝ ΣΕ ΘΕΣΕΙΣ ΜΕΓΑΛΗΣ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑΣ**



ΜΑΡΙΑ – ΟΛΓΑ ΠΑΠΑΝΑΣΤΑΣΙΟΥ
Επιβλέπων: Αθ. Μπαλλής, Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2018

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά:

Τον επιβλέποντα αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ κ. Αθανάσιο Μπαλλή για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την παροχή απαραίτητου τεχνικού εξοπλισμού.

Τον τ. επίκουρο καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Λυμπέρη για την επιστημονική καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια του.

Τον κ. Φώτιο Μερτζάνη μέλος ΕΔΠ για την υποστήριξη του σε τεχνικά θέματα με το πρόγραμμα υπολογισμού περιτυπώματος.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διευρέυνηση της εγγραφής των αστικών σιδηροδρομικών οχημάτων και στη συνέχεια του περιτυπώματος σε θέσεις μεγάλης οριζοντιογραφικής καμπυλότητας, δηλαδή σε ακτίνες μικρότερες των 400 μέτρων. Εξετάζονται τα οχήματα που κινούνται επί των γραμμών του Μετρό της Αθήνας.

Για την εγγραφή των φορέων γίνεται καταγραφή με χρήση μικροκάμερας των αποστάσεων όνυχα και σιδηροτροχίας σε οριακή καμπύλη του υπόψη δικτύου, ώστε να διαπιστωθεί η θέση των φορέων και στη συνέχεια να χαράχθουν τα αντίστοιχα διαγράμματα με την μέθοδο Vogel.

Στη συνέχεια σχεδιάζονται τα περιτύπωμα και εξετάζονται η ελάχιστη αξονική απόσταση δύο συρμών, η ελάχιστη διάμετρος εσωραχείου μονής και διπλής σήραγγας και η συσχέτιση της με την οριζοντιογραφική ακτίνα καμπυλότητας. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου Vogel και των τύπων υπολογισμού των αποκλίσεων του άξονα του οχήματος από τον άξονα της γραμμής στην μέση του οχήματος και στα άκρα.

Τέλος, υπολογίζονται οι κατευθυντήριες δυνάμεις κα εκείνες καθοδήγησης που αναπτύσσονται κατά την κύλιση των οχημάτων σύμφωνα με την μέθοδο ελαχίστου Heumann.

Abstract

The purpose of this thesis is to research the behavior of urban railway vehicles and the maximum periphery in acute horizontal curves, namely radius of less than 400 meters. The vehicles that are examined are the ones used in the Athens Subway System.

The gap between the nail of the wheel and the rail was recorded in a specific position of high curvature of the Subway System measurements in order to research the behavior of the bogies. The purpose is to determine the location of the bogies on the rails and then plot charts according to the Vogel method.

Furthermore, charts of maximum periphery of the train are plotted and the minimum axial distance between two trains is calculated. Moreover, object of examination are the minimum diameter of single and double tunnels and the correlation between this diameter and the horizontal radius of curvature. In addition, the results of the Vogel method and the types of calculation of vehicle axle deviations from the line axis are compared.

Finally, the guiding and steering forces developed during the rolling of the vehicles according to the Heumann minimal method were calculated.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Συμβολισμοί.....	7
Κατάλογος εικόνων.....	9
Κατάλογος πινάκων.....	9
Κατάλογος σχημάτων.....	10
Κεφάλαιο 1 ^ο : Εισαγωγικά στοιχεία.....	13
1.1: Εισαγωγή.....	13
1.2 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	14
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας.....	14
Κεφάλαιο 2 ^ο : Γενικά.....	15
2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του σιδηροδρόμου.....	15
2.2 Τροχαίο υλικό.....	16
2.3 Σιδηροδρομική γραμμή.....	19
2.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενου δικτύου.....	21
2.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενου τροχαίου υλικού.....	26
Κεφάλαιο 3 ^ο : Κύλιση.....	29
3.1 Γενικές αρχές κύλισης.....	29
3.2 Η κύλιση στην ευθυγραμμία.....	30
3.3 Η κύλιση στην καμπύλη.....	31
3.4 Η μέθοδος Vogel.....	32
3.5 Οι θέσεις των αξόνων και των οχημάτων στις καμπύλες.....	35
3.6 Πειραματικός υπολογισμός θέσης των φορέων.....	38
3.7 Αρχές σχεδίασης διαγραμμάτων Vogel.....	42
3.8 Διαγράμματα Vogel.....	44

Κεφάλαιο 4 ^ο : Περιτύπωμα.....	51
4.1 Η έννοια του περιτυπώματος.....	51
4.2 Υπολογισμός του κινηματικού περιτυπώματος.....	53
4.3 Υπολογισμός του κινηματικού περιτυπώματος με την χρήση του προγράμματος.....	61
4.4 Υπολογισμός του κινηματικού περιτυπώματος για σήραγγα ενός αξόνα.....	63
4.5 Υπολογισμός του κινηματικού περιτυπώματος για σήραγγα δύο αξόνων.....	65
4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου Vogel και γεωμετρικών αποκλίσεων.....	69
Κεφάλαιο 5 ^ο : Υπολογισμός δυνάμεων μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς.....	71
5.1 Γενικές αρχές μεθόδου ελαχίστου Heumann.....	71
5.2 Υπολογισμός θέσης τριβής και δυνάμεων καθοδήγησης.....	73
Κεφάλαιο 6 ^ο : Συμπεράσματα.....	75
Κεφάλαιο 7 ^ο : Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα.....	76
Βιβλιογραφία	77
Παράρτημα (πίνακες συντεταγμένων σημείων και σχέδια περιτυπωμάτων)	78

Συμβολισμοί

R(m): Οριζοντιογραφική ακτίνα

V(km/h): Ταχύτητα κίνησης συρμού

F(N): Φυγόκεντρος δύναμη

m(kg): Μάζα συρμού

h(mm): Υπερύψωση σιδηροτροχιάς

h_θ(mm): Θεωρητική υπερύψωση σιδηροτροχιάς

s(mm): Απόσταση σιδηροτροχιών

g(m/s²): Επιτάχυνση της βαρύτητας

α(mm): Ανεπάρκεια υπερύψωσης

π(mm): πλεόνασμα Υπερύψωσης

e(%): Επίκλιση

ρ(m/s²): περίσσεια εγκάρσιας επιτάχυνσης

c(m/s²): έλλειμα εγκάρσιας επιτάχυνσης

δ(mm): Διάκενο

2α(m): Μεταξόνιο

Lox(m): Μήκος οχήματος από μέτωπο σε μέτωπο

u(b) (m): Ύψος οχήματος από ΑΚΣ (σε συνάρτηση με το πλάτος)

b(u(m)): Πλάτος οχήματος (σε συνάρτηση με το ύψος)

α(m): Απόσταση μεταξύ των ομφαλών των φορείων

ρ(m): Απόσταση αξόνων στο φορείο

η(m): απόσταση της υπόψη διατομής του οχήματος από τον πλησιέστερο ομφαλό φορείου

dmin(mm): ελάχιστη απόσταση ίχνους

emax(mm): μέγιστο εύρος γραμμής

β :γωνία από υψομετρικό σφάλμα σιδηροτροχιών

$q(\text{mm})$:εγκάρσια ανοχή μεταξύ αξόνων και φορείου

$w(\text{mm})$: πλευρική ταλάντωση αμαξώματος από άξονα γραμμής λόγω πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ανάρτησης

$u\text{Π}(\text{m})$: ύψος πόλου οχήματος από ΑΚΣ

μ : Συντελεστής τριβής

$Q(\text{kN})$: Φορτίο τροχού

$q_i(\text{mm})$: Βραχίονες δυνάμεων τριβής

$\xi(\text{μόιρες})$: Γωνία βραχιόνων q_i

$P(\text{kN})$: Κατευθυντήρια δύναμη

$Y(\text{kN})$: Δύναμη καθοδήγησης

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Σύστημα τροχών – Σιδηροτροχιάς

Εικόνα 2.2: Διαξονικό φορείο

Εικόνα 3.1: Οφιοειδής κίνηση των τροχών κατά Klingel

Εικόνα 3.2: Τοποθετημένη μικροκάμερα επί της σιδηροτροχιάς

Εικόνα 3.3: Στιγμιότυπο καταγραφής κάμερας με το προφίλ τροχού - σιδηροτροχιάς

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Κανονιστικές διαπλατύνσεις σύμφωνα με τον ΟΣΕ

Πίνακας 2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συρμών Γραμμής 1

Πίνακας 2.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συρμών Γραμμής 2 & 3

Πίνακας 3.1: Υπολογισμός εύρους καναλιού Vogel στην στρεβλή κλίμακα

Πίνακας 3.2: Πίνακας αποστάσεων ονύχα – παρειάς σιδηροτροχιάς

Πίνακας 3.3: Ελάχιστη ταχύτητα εισόδου στην καμπύλη και ελάχιστη απόσταση καμπύλης από σταθμό

Πίνακας 3.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συρμού και γραμμής για ακτίνα καμπυλότητας 250 ως 600 μέτρων

Πίνακας 3.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συρμού και γραμμής για ακτίνα καμπυλότητας 200 μέτρων

Πίνακας 4.1: Δεδομένα εισόδου προγράμματος υπολογισμού περιτυπώματος

Πίνακας 4.2: Ακτίνες ελάχιστης διατομής σήραγγας για διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας

Πίνακας 4.3: Γεωμετρικές απόκλισεις στο μέσο του οχήματος (Ei)

Πίνακας 4.4: Γεωμετρικές απόκλισεις στο μέτωπο (Ea)

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Διατομή τροχού

Σχήμα 2.2: Διατομή τροχού – σιδηροτροχιάς, Απεικόνιση εύρους και απόστασης ίχνους

Σχήμα 2.3: Διατομή συρμού σε στροφή και ασκούμενες δυνάμεις

Σχήμα 3.1: Προσομοίωση κύκλου με παραβολή

Σχήμα 3.2: Απεικόνιση οριζοντιογραφικής κυκλικής καμπύλης με την μέθοδο Vogel

Σχήμα 3.3: Τυπικές θέσεις οχήματος με δύο άξονες σε κυκλική καμπύλη

Σχήμα 3.4: Vogelplan διαξονικού φορείου

Σχήμα 3.5: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=600m$

Σχήμα 3.6: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=500m$

Σχήμα 3.7: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=400m$

Σχήμα 3.8: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=350m$

Σχήμα 3.9: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=300m$

Σχήμα 3.10: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=250m$

Σχήμα 3.11: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=200m$ σε σφηνοειδή θέση

Σχήμα 3.12: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=200m$ με διαπλάτυνση $5mm$

Σχήμα 3.13: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=150m$ με διαπλάτυνση $5mm$

Σχήμα 4.1: Διατομή γραμμής με το περιτύπωμα οχήματος και το περιτύπωμα σταθερών εμποδίων

Σχήμα 4.2: Διατομή γραμμής με το στατικό και το κινηματικό περιτύπωμα

Σχήμα 4.3: Σχηματική σύγκριση στατικού και κινηματικού περιτυπώματος οχήματος

Σχήμα 4.4: Σχηματική απεικόνιση οχήματος σε καμπύλη με τις γεωτρικές αποκλίσεις E_i , E_a

Σχήμα 4.5: Γωνίες στρεβλότητας β και υπερύψωσης δ του επιπέδου κύλισης στην καμπύλη

Σχήμα 4.6: Συνολική μετατόπιση εσωτερικού σημείου T για κίνηση συρμού σε δεξιά καμπύλη και δεξιά στροφή περί τον πόλο

Σχήμα 4.7: Συνολική μετατόπιση εξωτερικού σημείου Φ για κίνηση συρμού σε δεξιά καμπύλη και αριστερή στροφή περί τον πόλο

Σχήμα 4.8: Δυσμενέστερη θέση περιτυπωμάτων που καθορίζει την απόσταση στο εσωράχιο της σήραγγας

Σχήμα 4.9: Δυσμενέστερη θέση περιτυπωμάτων που καθορίζει την απόσταση μεταξύ των γραμμών

Σχήμα 4.10: Δυσμενέστερη θέση περιτυπωμάτων που καθορίζει την απόσταση στο εσωράχιο της σήραγγας στην καμπύλη

Σχήμα 4.11: Δυσμενέστερη θέση περιτυπωμάτων που καθορίζει την απόσταση μεταξύ των γραμμών στην καμπύλη

Σχήμα 4.12: Θέση αξόνων γραμμών σε επίπεδο συντεταγμένων x, y

Σχήμα 4.13: Διατομή κινηματικού περιτυπώματος στη δυσμενέστερη θέση για οριζοντιογραφική ακτίνα $R=200m$

Σχήμα 4.14: Διατομή κινηματικού περιτυπώματος στη δυσμενέστερη θέση για οριζοντιογραφική ακτίνα $R=250m$

Σχήμα 4.15: Διατομή κινηματικών περιτυπωμάτων στη δυσμενέστερη θέση για την απόσταση των αξόνων για οριζοντιογραφική ακτίνα $R=200m$

Σχήμα 4.16: Διατομή κινηματικών περιτυπωμάτων στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για οριζοντιογραφική ακτίνα $R=200m$

Σχήμα 4.17: Διατομή κινηματικών περιτυπωμάτων στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για οριζοντιογραφική ακτίνα $R=250m$

Σχήμα 4.18: Συσχέτιση οριζοντιογραφικής ακτίνας με ελάχιστη ακτίνα διατομής μονής σήραγγας

Σχήμα 4.19: Συσχέτιση οριζοντιογραφικής ακτίνας με ελάχιστη ακτίνα διατομής διπλής σήραγγας

Σχήμα 5.1: Ολισθήσεις και δυνάμεις μεταξύ τροχού και σιδηροτροχίας κατά την κίνηση στροφής του οχήματος στην καμπύλη

Σχήμα 5.2: Μέθοδος ελαχίστου Heumann για όχημα με δύο φορεία

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγικά στοιχεία

1.1 Εισαγωγή

Ο σιδηρόδρομος αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα μέσα για την μεταφορά επιβατών και αγαθών. Το μεγαλύτερο μέρος των σιδηροδρομικών υπεραστικών δικτύων δημιουργήθηκε πριν από πολλές δεκαετίες με στοιχεία χάραξης που αφορούσαν τις ατμομηχανές ή ντιζελομηχανές και για τον λόγο αυτό οι κατά μήκος κλίσεις και οι ταχύτητες μελέτης υπήρξαν χαμηλές. Αργότερα, ο σιδηρόδρομος χρησιμοποιήθηκε και ως αστικό μέσο μεταφοράς επιβατών τόσο υπέργεια, όσο και υπόγεια, ενώ το δίκτυο του διευρύνεται συνεχώς.

Παρά την σημερινή ανάπτυξη ορισμένων υπεραστικών δικτύων σε δίκτυα με υψηλές ταχύτητες ένα μεγάλο ποσοστό αυτών λειτουργεί ακόμα με συμβατικές ταχύτητες ($V \leq 160 \text{ km}$). Σε ότι αφορά τα αστικά δίκτυα οι υψηλές ταχύτητες δεν είναι δυνατόν να εισαχθούν εξαιτίας της μικρής απόστασης των στάσεων σε συνδυασμό με το μεγάλο μήκος πέδησης. Επιπλέον, οι ανάγκες σύνδεσης συγκεκριμένων σημείων όπου είναι δυνατή η δημιουργία σταθμού αλλά και η προσαρμογή στο υπάρχον αστικό περιβάλλον για την περίπτωση του υπέργειου δικτύου οδηγούν στην χάραξη της γραμμής τμήματα με μεγάλης καμπυλότητας και συνεπώς μικρές οριζοντιογραφικές καμπύλες ($R \leq 400 \text{ m}$). Οι καμπυλότητες αυτές καθώς και η ύπαρξη εγκαταστάσεων ελιγμών με μικρές ακτίνες και συνήθως χωρίς τόξα συναρμογής οδηγούν στην κατασκευή της γραμμής σύμφωνα με τους κανονισμούς διαπλάτυνσης του εύρους.

Η διαπλάτυνση του εύρους είναι αναγκαία, όπου απαιτείται για την ομαλή κύλιση του τροχαίου υλικού, έτσι ώστε να αποφεύγονται σημαντικές φθορές τόσο στο τροχαίο υλικό όσο και στις σιδηροτροχιές και συμβάλει γεωμετρικά στην εγγραφή των οχημάτων σε συγκεκριμένες καμπύλες αυξημένης καμπυλότητας. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας του τροχαίου υλικού οι οριακές οριζοντιογραφικές ακτίνες για την εφαρμογή της διαπλάτυνσης του εύρους διαμορφώνονται σε $R \leq 400 \text{ m}$.

Η εγγραφή των οχημάτων στα τμήματα μεγάλης καμπυλότητας επιτυγχάνεται προσεγγιστικά με την σχετική απόκλιση του ευθέος οχήματος στα άκρα από κυκλικό τόξο της γραμμής. Λαμβάνοντας υπόψη και το γεγονός ότι η θέση του οχήματος στις στροφές αποκλίνει και από τον κατακόρυφο άξονα απαραίτητη κρίνεται η μελέτη του περιτυπώματος του κυρίως για τον υπόγειο σιδηρόδρομο. Ακόμα, στην περίπτωση δημιουργίας σταθμού σε θέση οριζοντιογραφικής καμπύλης απαιτείται η ακριβής γνώση του περιτυπώματος για την διαμόρφωση της αποβάθρας.

1.2 Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η διερεύνηση των τύπων σιδηροδρομικών οχημάτων που κινούνται στο αστικό δίκτυο σταθερής τροχιάς της Αθήνας, ως προς την εγγραφή τους σε οριζοντιογραφικές καμπύλες με ακτίνα $R \leq 400\text{m}$. Πιο συγκεκριμένα θα ληφθούν στοιχεία για το δίκτυο του Μετρό και του ΗΣΑΠ λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά του τροχαίου υλικού αλλά και του υπάρχοντος, του υπό μελέτη και υπό κατασκευή δικτύου. Στη συνέχεια θα υπολογιστεί το περιτύπωμα σε υπάρχοντα καμπύλα τμήματα σε σχέση με τις πραγματικές ταχύτητες κίνησης των οχημάτων αλλά και την ταχύτητα μελέτης. Επίσης θα γίνει αναφορά στην καταπόνηση των σιδηροτροχιών από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κύλιση των οχημάτων στις συγκεκριμένες καμπύλες.

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 2^ο: Γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά του σιδηροδρόμου και ακολουθεί περιγραφή της επιδομής, του τροχαίου υλικού και των χαρακτηριστικών της γραμμής. Επιπλέον, αναφέρονται τα κανονιστικά όρια για τις οριζοντιογραφικές ακτίνες και περιγράφονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των οχημάτων που μελετούνται.

Κεφάλαιο 3^ο: Περιγράφονται οι γενικές αρχές της κύλισης επί των σιδηροτροχιών. Αναλυτικότερα εξηγείται η κύλιση στην ευθυγραμμία και στην καμπύλη και αναλύονται οι δυνατές θέσεις των αξόνων στις καμπύλες. Αναλύονται οι γενικές αρχές της μεθόδου Vogel για την εγγραφή των οχημάτων. Στη συνέχεια εφαρμόζεται η μέθοδος για τους προαναφερθέντες τύπους οχημάτων σε τυπικές καμπύλες και χαράσσεται το ανάλογο διάγραμμα (Vogelplan). Τέλος ελέγχεται η θέση του φορείου σε καμπύλη του δικτύου της αθήνας με μικροκάμερα.

Κεφάλαιο 4^ο: Εισάγονται τα γενικά στοιχεία σχετικά με το περιτύπωμα και την μέθοδο υπολογισμού του ενώ ακολουθεί διερεύνηση του στα υπό μελέτη οχήματα. Συγκρίνονται τα αποτελέσματα της μεθόδου Vogel με τους αναλυτικούς υπολογισμούς αποκλίσεων. Διερευνάται η ελάχιστη απαραίτητη διατομή για μονές και διπλές σήραγγες.

Κεφάλαιο 5^ο: Περιγράφεται η μέθοδος του Ελαχίστου του Heumann για τον υπολογισμό των δυνάμεων στους άξονες. Ακολουθεί αναλυτικός υπολογισμός για τις τυπικές ταχύτητες (μέγιστες – ελάχιστες – σχεδιασμού) σε τυπικές καμπύλες για τους εξεταζόμενους τύπους οχημάτων.

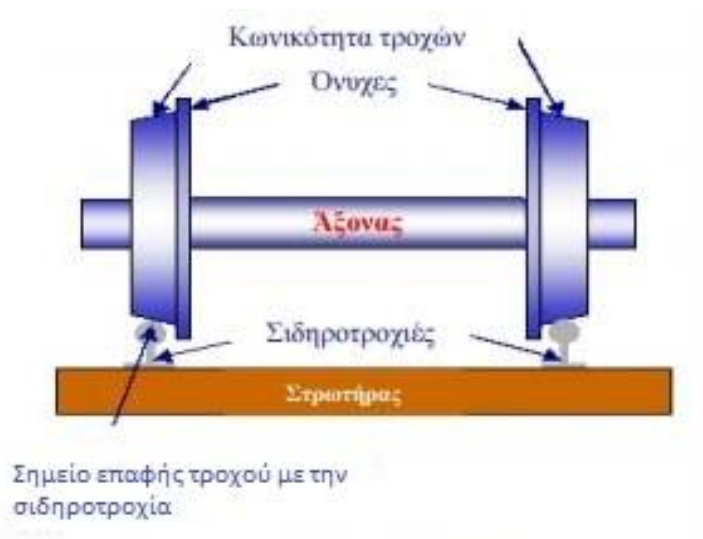
Κεφάλαιο 6^ο: Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την διερεύνηση.

Κεφάλαιο 7^ο: Γίνονται εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2^ο: Γενικά στοιχεία του σιδηρόδρομου

2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του σιδηροδρόμου

Σιδηρόδρομος ονομάζεται το μέσο μαζικής μεταφοράς με τροχοφόρα οχήματα σταθερής τροχιάς κινούμενα αποκλειστικά σε ειδικά διαμορφωμένο διάδρομο. Ο διάδρομος κυκλοφορίας υλοποιείται με δύο παράλληλες μεταξύ τους χαλύβδινες σιδηροτροχιές πάνω στις οποίες κυλίσουν κωνικοί τροχοί που φέρουν όνυχες στο εσωτερικό τους ώστε να εξασφαλίζεται η κίνηση τους επί της σιδηροτροχιάς.



Εικόνα 2.1: Σύστημα τροχών - Σιδηροτροχιές

Οι τεχνικές συνιστώσες του συστήματος είναι:

- Το τροχαίο υλικό, δηλαδή τα οχήματα που κινούνται μέσω των χαλύβδινων τροχών στις σιδηροτροχιές.
- Τη σιδηροδρομική υποδομή, που αποτελείται από τη σιδηροδρομική γραμμή, τα τεχνικά έργα και τις εγκαταστάσεις για την εξασφάλιση και ρύθμιση της κυκλοφορίας.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, θα ληφθούν υπόψη μόνο επιμέρους στοιχεία που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των τροχοφόρων αξόνων και των σιδηροτροχιών, τη γεωμετρική διάταξη των φορείων και των τροχοφόρων αξόνων σε αυτά, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής ειδικότερα στα καμπύλα τμήματα. Ειδικότερα, οι παράμετροι που θα ληφθούν υπόψη είναι:

- Η απόσταση μεταξύ των φορείων, (απόσταση ομφαλών φορείων)
- Το μεταξόνιο (απόσταση τροχοφόρων αξόνων ενός φορείου

- Η μορφή της διατομής των τροχών
- Το ίχνος καθοδήγησης
- Το εύρος γραμμής

2.2 Τροχαίο υλικό

Τα σύνολο των σιδηροδρομικών οχημάτων που κινούνται επί της σιδηροδρομικής γραμμής αποτελούν το τροχαίο υλικό. Οι κατηγορίες στις οποίες διακρίνεται το τροχαίο υλικό είναι οι ακόλουθες:

- Επιβατικά οχήματα
- Εμπορικά οχήματα κλειστού η ανοικτού τύπου
- Ειδικά οχήματα (όπως πλατφόρμες μεταφοράς υλικού)
- Μηχανές έλξης
- Μηχανήματα συντήρησης

Τα σιδηροδρομικά οχήματα συντίθενται από τρία τμήματα: το αμάξωμα, τα φορεία και τους τροχοφόρους άξονες.

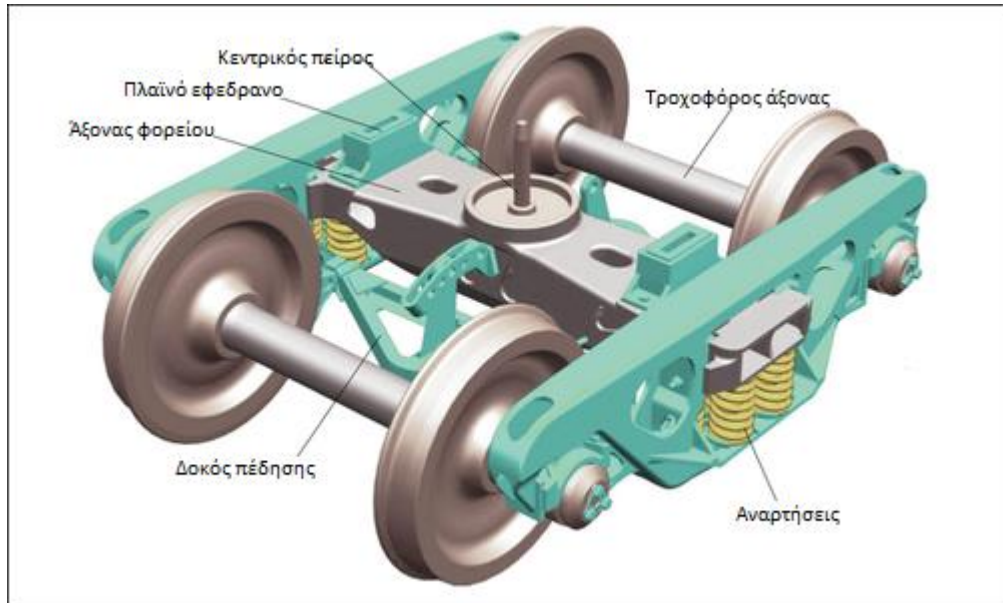
Αμάξωμα

Το αμάξωμα αποτελεί το ανώτερο τμήμα του τροχαίου υλικού, στο οποίο μεταβαίνουν οι επιβάτες για τα επιβατικά οχήματα, τοποθετούνται τα εμπορεύματα για τα εμπορικά οχήματα, ή διαμορφώνεται ο θάλαμος οδήγησης και το σύστημα έλξης στην περίπτωση των μηχανών έλξης. Το αμάξωμα εδράζεται στα φορεία ενώ η μορφή του εξαρτάται από το τύπο και την λειτουργικότητα του συρμού.

Φορεία

Τα φορεία εξασφαλίζουν την ευσταθή κύλιση του οχήματος και αποτελώντας βάση για τα αμαξώματα μεταβιβάζουν τα κατακόρυφα φορτία μέσω των τροχοφόρων αξόνων στην σιδηροτροχιά. Επιπλέον, διαθέτουν συνήθως κατακόρυφους και οριζόντιους μηχανισμούς αναρτήσεων με σκοπό να περιορίζουν τις ταλαντώσεις του οχήματος ώστε να παρέχεται καλύτερο επίπεδο μετακίνησης στους επιβάτες.

Τα οχήματα στηρίζονται συνήθως σε δύο φορεία, κάθε ένα από τα οποία διαθέτει δύο (διαξονικό) η τρεις (τριαξονικό) τροχοφόρους άξονες.



Εικόνα 2.2: Διαξονικό φορείο

Τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα φορεία σε έλκοντα και ελκόμενα οχήματα ονομάζονται κανονικά ή συμβατικά. Τα φορεία διαθέτουν δύο τροχοφόρους άξονες οι τροχοί των οποίων είναι άκαμπτα συνδεδεμένοι μεταξύ τους με συνέπεια να κινούνται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Το πλαίσιο του φορείου συνδέεται με το αμάξωμα μέσω πείρου και με τους άξονες των τροχών με σύστημα ελατηρίων και αποσβεστήρων απορροφώντας τους κραδασμούς και στις δύο διευθύνσεις.

Τα φορεία ανάλογα με την ανάρτηση χωρίζονται σε **αρθρωτά και μη**. Αν και τα πρώτα προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση έχουν επικρατήσει τα μη αρθρωτά λόγω τις απλότητας της δομής τους και της ευκολίας συντήρησής τους. Έτσι, σε ένα συρμό συνήθως το πρώτο αμάξωμα στο πίσω μέρος καθώς και το τελευταίο στο μπροστινό του τμήμα στηρίζονται σε ένα αρθρωτό φορείο ενώ στις υπόλοιπες θέσεις και εξολοκλήρου στα ενδιάμεσα αμαξώματα τοποθετούνται μη αρθρωτά φορεία.

Ανάλογα με την δυνατότητα προσαρμογής των τροχών στις οριζοντιογραφικές καμπύλες τα φορεία διακρίνονται σε **καθοδηγούμενων αξόνων και μη**. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν εκείνα που επιτρέπουν την σχετική κίνηση του τροχού με το σώμα του φορείου με αποτέλεσμα την προσαρμογή των τροχοφόρων αξόνων στην καμπύλη σε ακτινική θέση. Αντίθετα, το σώμα των φορείων μη καθοδηγούμενων αξόνων είναι άκαμπτα συνδεδεμένο με τους άξονες εξαναγκάζοντας τους τροχούς σε υποακτινική ή υπερακτινική θέση στα καμπύλα τόξα. Η κατηγορία αυτή είναι η πλέον διαδεδομένη ενώ τα φορεία καθοδηγούμενων αξόνων χρησιμοποιούνται μόνο σε ελάχιστα τρένα υψηλών ταχυτήτων.

Τροχοφόροι άξονες

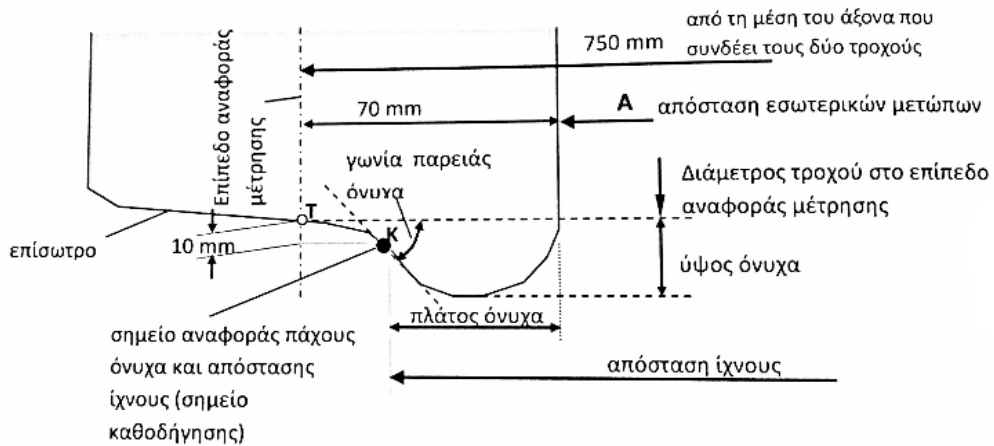
Οι τροχοφόροι άξονες αποτελούνται από τον κύριο άξονα, τους δύο τροχούς με τους οποίους είναι σταθερά συνδεδεμένος και τα δύο λιποκιβώτια μέσα στα οποία βρίσκονται τα ρουλεμάν - έδρανα πάνω στα οποία εδράζεται. Το συγκεκριμένο σύστημα μεταβιβάζει τα φορτία του αμαξώματος στην επιδομή και εξασφαλίζει την ομαλή κύλιση του οχήματος επί των σιδηροτροχιών τόσο στην ευθυγραμμία όσο και τις καμπύλες.

Τροχοί

Ο ρόλος των τροχών δεν περιορίζεται μόνο στην κύλιση επί του σιδηροδρομικού άξονα αλλά ταυτόχρονα επιδιώκεται και η εξασφάλιση της κίνησης πάνω στις σιδηροτροχιές περιορίζοντας τη φθορά του ίδιου του τροχού και της γραμμής. Οι στόχοι αυτοί έχουν συντελέσει στην διαμόρφωση της ιδιαίτερης γεωμετρίας των σιδηροδρομικών τροχών. Πιο συγκεκριμένα, η περιμετρική επιφάνεια χωρίζεται σε δύο ζώνες: την επιφάνεια κύλισης και τον όνυχα. Η πρώτη βρίσκεται εξωτερικά και είναι κωνικής μορφής ώστε να υπάρχει η δυνατότητα προσαρμογής του μεγέθους της περιμέτρου κύλισης ανάλογα με τις οριζοντιογραφικές ανάγκες. Στο εσωτερικό διαμορφώνεται ο όνυχας ο οποίος αποτρέπει την έξοδο του τροχού από την γραμμή θέτοντας ένα εσωτερικό όριο στο σημείο επαφής. Η κλίση στο εξωτερικό του όνυχα επιδιώκεται να μην είναι μικρή για να αποφεύγεται το ενδεχόμενο αναρρίχησης του τροχού ενώ δεν είναι επιθυμητές ούτε οι μεγάλες κλίσεις που επιφέρουν μεγαλύτερες φθορές και στον τροχό αλλά και στην σιδηροτροχιά. Τεχνικά αυτή η κλίση διαμορφώνεται με γωνιά περίπου 70 μοιρών.

Από την μέση του σώματος του άξονα που συνδέει τους δύο τροχούς και σε απόσταση 750mm ορίζεται το επίπεδο αναφοράς μέτρησης της διαμέτρου του τροχού. Από τη θέση τομής του επιπέδου και της επιφάνειας κύλισης (σημείο T) και σε 10mm κατακόρυφα επί της παρειάς του όνυχα, ορίζεται το σημείο αναφοράς του ίχνους ή σημείο καθοδήγησης (σημείο K). Επιπλέον, από την ίδια θέση (σημείο T) μετράται το ύψος του όνυχα ενώ από το σημείο καθοδήγησης το πλάτος του. Το πλάτος του όνυχα συμμετέχει υπό προϋποθέσεις στην εγγραφή των φορείων.

Σημαντική παράμετρο στην διερεύνηση της εγγραφής του οχήματος αποτελεί η απόσταση του ίχνους, η οποία ορίζεται μεταξύ των σημείων καθοδήγησης των δύο τροχών ενός τροχοφόρου άξονα. Η τιμή της σε γραμμές κανονικού εύρους είναι 1426mm, με ελάχιστη τιμή τα 1410mm. Το εύρος της γραμμής και η απόσταση ίχνους καθορίζουν το διάκενο (δ) μεταξύ του τροχοφόρου άξονα και της γραμμής.

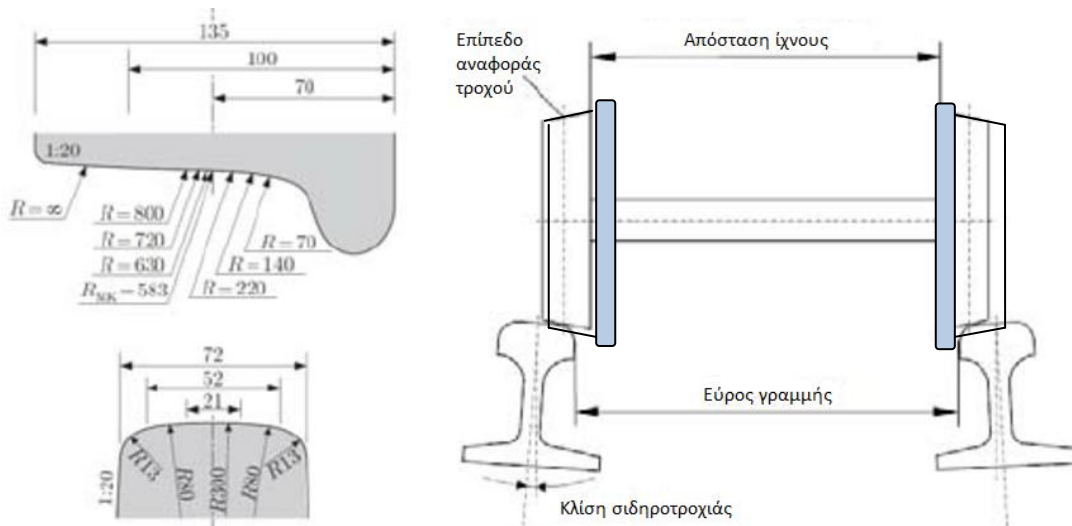


Σχήμα 2.1: Διατομή τροχού

Για την διατήρηση της γεωμετρίας του τροχού σε όλη τη διάρκεια λειτουργίας του ορίζεται το μέτρο φθοράς q_R . Το στοιχείο αυτό δείχνει πόσο υλικό μπορεί να φθαρεί μέχρι ο τροχός να χρειάζεται συντήρηση.

2.3 Σιδηροδρομική γραμμή

Η σιδηροδρομική γραμμή αποτελείται από τις δύο σιδηροτροχιές τοποθετημένες σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους και σταθερά συνδεδεμένες με τις εγκάρσιες διαδοκίδες.



Σχήμα 2.2: Διατομή τροχού – σιδηροτροχιάς (αριστερά), Απεικόνιση εύρους και απόστασης ίχνους (δεξιά)

Ως **εύρος γραμμής** ορίζεται η απόσταση των εσωτερικών παρειών των δύο σιδηροτροχιών. Μετράται σε απόσταση 14mm κάτω από την Άνω στάθμη Κεφαλής Σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ). Στις γραμμές κανονικού εύρους, το εύρος ορίζεται στα 1435mm με ελάχιστη τιμή τα 1430mm και μέγιστη 1470mm, όρια που αφορούν την διαπλάτυνση ή την φθορά της γραμμής.

Η οριζοντιογραφική χάραξη της σιδηροδρομικής γραμμής υλοποιείται με διαδοχικά τμήματα ευθείας γραμμής και κυκλικών καμπύλων, η μετάβαση μεταξύ των οποίων γίνεται με τις καμπύλες ή τόξα συναρμογής.

Για οριζοντιογραφικές καμπύλες με ακτίνα $R \leq 400m$, η διαπλάτυνση φθάνει μέχρι τα 20mm και επιτυγχάνεται σταδιακά εντός της καμπύλης συναρμογής. Σε δίκτυα στα οποία η χάραξη αποτελείται από οριζοντιογραφικές καμπύλες με ακτίνες μικρότερες μιας ορισμένης τιμής, αναγκαία κρίνεται η βαθμιαία αύξηση του εύρους κατά 5 έως 20mm. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διαπλάτυνση εύρους. Η ελάχιστη τιμή της ακτίνας για την οποία απαιτείται η διαπλάτυνση εύρους εξαρτάται από τον τύπο του τροχαίου υλικού που κυκλοφορεί στο δίκτυο και πιο συγκεκριμένα από τον αριθμό των φορείων και το μεταξόνιο τους. Με τις νέες τεχνολογίες των τροχαίων υλικών η τιμή αυτή διαμορφώνεται στα 170m, λαμβάνοντας όμως υπόψη ότι στα περισσότερα δίκτυα κυκλοφορούν συρμοί παλιότερης τεχνολογίας η τιμή αυξάνεται στα 400m. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις απαιτούμενες σταδιακές διαπλατυνσεις σύμφωνα με τον κανονισμό του ΟΣΕ.

Ακτίνα τόξου καμπύλης (m)	Διαπλάτυνση (mm)	Εύρος γραμμής (mm)
$R \geq 400$	0	1435
$400 > R > 350$	5	1440
$350 > R \geq 300$	10	1445
$300 > R \geq 250$	15	1450
$R < 250$	20	1455

Πίνακας 2.1: Κανονιστικές διαπλατυνσεις σύμφωνα με τον ΟΣΕ

Ωστόσο λόγω της ομοιογένειας των οχημάτων στους αστικούς σιδηρόδρομους αλλά και των αρκετά μικρότερων ταχυτήτων το όριο για την απαίτηση διαπλάτυνσης περιορίζεται στα 200 μέτρα και ακολουθεί ίδιο κλιμακωτό κανόνα διαπλάτυνσης. Οι τιμές της απαιτούμενης διαπλάτυνσης θα υπολογιστούν στη συνέχεια με χρήση της μεθόδου Vogel.

2.4 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενου δικτύου

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο θα εξεταστεί η εγγραφή των φορέων συγκεκριμένων τύπων οχημάτων σε τμήματα μεγάλης καμπυλότητας και με βάση αυτό στη συνέχεια θα μελετηθεί το περιτύπωμα τους και οι δρώσες δυνάμεις μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς. Για την διερεύνηση αυτή, θα πρέπει αρχικά να παρουσιαστούν τα γεωμετρικά στοιχεία του δικτύου μελέτης, στην συγκεκριμένη περίπτωση του δικτύου του Μετρό της Αθήνας.

Ως προς την οριζοντιογραφία, στα πλαίσια αυτής της εργασίας τα στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη στην μελέτη είναι οι ακτίνες καμπυλότητας σε τμήματα εντός και εκτός σταθμών. Έτσι, οι κανόνες χάραξης της σιδηροδρομικής γραμμής ορίζουν την ελάχιστη ακτίνα. Επιπλέον, μελετώνται στοιχεία του δικτύου που αφορούν τις κανονιστικές κλίσεις της γραμμής. Έτσι, η κατά μήκος κλίση κυμαίνεται από μηδενική μέχρι 4% ανωφέρεια ή κατωφέρεια σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις.

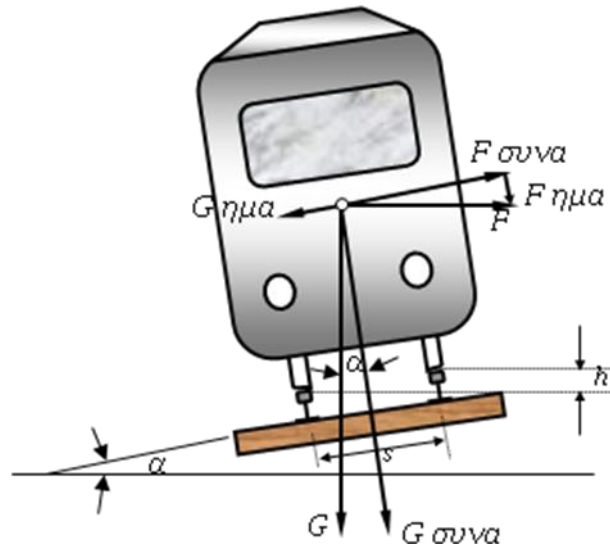
Τα όρια αυτά προκύπτουν με ώστε να εξασφαλίζουν την δυναμική άνεση των επιβατών, δηλαδή την ποσοτική και ποιοτική ενόχληση τους από τις επιταχύνσεις του αμαξώματος. Η ενόχληση αυτή, που σ' ένα πρώτο στάδιο εκδηλώνεται σαν ναυτία, εξαρτάται από την αριθμητική τιμή των επιταχύνσεων και διεύθυνση τους (κατακόρυφη, εγκάρσια, οριζόντια). Κατά την κίνηση του συρμού στη στροφή ασκείται στο τρένο και συνεπώς και στους επιβάτες του φυγόκεντρος δύναμη:

$$F = \frac{m \times V^2}{R} \quad (1)$$

Για να εξισορροπηθεί πλήρως αυτή η αναπτυσσόμενη φυγόκεντρη δύναμη η δίνεται στην εξωτερική σιδηροτροχιά μια διαφορά ύψους σε σχέση με την εσωτερική που καλείται θεωρητική υπερύψωση της γραμμής h_{θ} . Το μέγεθος της υπερύψωσης εξαρτάται από το εύρος της γραμμής και την γωνία της εγκάρσιας κλίσης. Υπολογίζεται με ισορροπία των δυνάμεων και των ροπών στην διατομή του συρμού. Με την παραδοχή πολύ μικρής γωνίας επίκλισης έχουμε:

- $\cos(\alpha) \approx 1$
- $\sin(\alpha) = h/s$.

Αν υποθέσουμε ότι η υπερύψωση h θα εξουδετέρωνε πλήρως την δημιουργούμενη φυγόκεντρο τότε από την ισορροπία του οχήματος έχουμε σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.3: Διατομή συρμού σε στροφή και ασκούμενες δυνάμεις

Από ισορροπία δυνάμεων και ροπών προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\Sigma F_x = 0 \Rightarrow G\eta\mu\alpha = F\sigma\nu\alpha \quad (2)$$

$$\Sigma F_y = 0 \Rightarrow G\sigma\nu\alpha + F\eta\mu\alpha = K_1 + K_2 \quad (3)$$

$$\Sigma M = 0 \Rightarrow K_1 \times \frac{s}{2} = K_2 \times \frac{s}{2} \Rightarrow K_1 = K_2 \quad (4)$$

Με K_1 και K_2 τις αντιδράσεις τις εσωτερικής και τις εξωτερικής σιδηροτροχιάς αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραδοχές τις πολύ μικρής γωνίας α οι σχέσεις γίνονται:

$$(2): G \times \frac{h}{s} = F \quad (5)$$

$$(3): G + F \times \frac{h}{s} = K_1 + K_2 \quad (6)$$

$$(4): K_1 = K_2$$

Αντικαθιστώντας στην σχέση (5) το μέγεθος F σύμφωνα με την σχέση (1) και το μέγεθος G προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$(5): G \times \frac{h}{s} = F \stackrel{(1)}{\Rightarrow} m \times g \times \frac{h}{s} = m \times \frac{V^2}{R}$$

Στη συνέχεια γίνεται επίλυση ως προς το h ώστε να προκύψει η θεωρητική υπερύψωση:

$$h_{\theta} = \frac{s \times V^2}{R \times g}$$

Για $g=9,81\text{m/sec}^2$, $s = 1500 \text{ mm}$ (κανονική γραμμή) και με κατάλληλη μετατροπή των μονάδων προκύπτει η βασική σχέση:

$$h_{\theta} = 11,8 \times \frac{V^2}{R}$$

(με h_{θ} σε mm, V σε km/h και R σε m).

Εάν η επιλογή της υπερύψωσης της γραμμής γίνει με βάση τη θεωρητική υπερύψωση που αντιστοιχεί στα πιο γρήγορα τρένα που κινούνται επί της γραμμής, τότε για τα αργά τρένα η υπερύψωση αυτή θα είναι υπερβολική. Οι όνυχες των εσωτερικών τροχών θα έρχονται σε επαφή με τις εσωτερικές παρειές των εσωτερικών σιδηροτροχιών με όλες τις δυσμενείς συνέπειες. Εάν η επιλογή της υπερύψωσης της γραμμής γίνει με βάση τη θεωρητική υπερύψωση που αντιστοιχεί στα πιο αργά τρένα, τότε για τα γρήγορα τρένα η υπερύψωση θα είναι ανεπαρκής. Οι όνυχες των εξωτερικών τροχών θα έρχονται σε επαφή με τις εσωτερικές παρειές των εξωτερικών σιδηροτροχιών.

Στην περίπτωση κίνησης συρμού με μεγαλύτερη ταχύτητα από εκείνη της ισορροπίας η συνιστώσα φυγόκεντρος δύναμη ($F_{\text{συνα}} = F$) είναι μεγαλύτερη από την συνιστώσα του βάρους ($G_{\text{ημα}}$). Επιλύοντας ως προς x προκύπτει:

$$\Sigma F_x = F - G_{\text{ημα}} = m \times \frac{V^2}{R} - m \times g \times \frac{h}{s} = m \times \left(\frac{V^2}{R} - g \times \frac{h}{s} \right)$$

Έτσι εισάγεται η έννοια της **περίσσειας εγκάρσιας επιτάχυνσης** ή μη εξισορροπούμενης φυγόκεντρος επιτάχυνσης η οποία ισούται με το μέγεθος που βρίσκεται στην παρένθεση.

$$p = \frac{V^2}{R} - g \times \frac{h}{s}$$

Το γινόμενο $m \times p = F - G_{\text{ημα}}$ είναι η φυγόκεντρος δύναμη που δεν εξισορροπείται από την υπερύψωση. Η δύναμη αυτή εξισορροπείται από μια δύναμη που ασκείται από την εξωτερική σιδηροτροχιά στο όνυχα του τροχού λόγω δράσης – αντίδρασης.

Επομένως στην περίπτωση ταχέως συρμού θα ισχύει η σχέση:

$$F = G\eta\mu\alpha + m \times p \Rightarrow \frac{m \times V^2}{R} = m \times g \times \frac{h}{s} + m \times p \Rightarrow$$

$$g \times \frac{h}{s} = \frac{V^2}{R} - p \Rightarrow h = \frac{V^2 \times s}{R \times g} - p \times \frac{s}{g}$$

Από αυτή τη σχέση και για $g=9,81\text{m/sec}^2$, $s=1500\text{mm}$ (κανονική γραμμή) και με κατάλληλη μετατροπή των μονάδων προκύπτει η βασική σχέση:

$$h(\text{mm}) = \frac{11.8 \times V^2 \left(\frac{\text{km}}{\text{h}}\right)}{R(\text{m})} - 152p\left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right).$$

Εισάγεται, λοιπόν, η έννοια της **κανονικής υπερύψωσης (h)** που υπολογίζεται με βάση την υπερύψωση που αντιστοιχεί σε μια μέση τιμή των ταχυτήτων που αναπτύσσονται στην γραμμή.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση βραδέως συρμού ορίζεται με τον ίδιο τρόπο τα **έλλειμμα εγκάρσιας επιτάχυνσης**:

$$c = -p = g \times \frac{h}{s} - \frac{V^2}{R}$$

Ο υπολογισμός της υπερύψωσης με βάση μια μέση τιμή ταχυτήτων έχει ως συνέπεια για μεν τα γρήγορα τρένα να υπάρχει μια ανεπάρκεια υπερύψωσης, ενώ για τα αργά τρένα ένα πλεόνασμα. Η διαφορά μεταξύ της θεωρητικής υπερύψωσης για τη μέγιστη ταχύτητα και της κανονικής υπερύψωσης ονομάζεται ανεπάρκεια υπερύψωσης α . Δηλαδή: $\alpha = h_{\theta}(V_{max}) - h$. Η διαφορά μεταξύ της κανονικής υπερύψωσης και της θεωρητικής υπερύψωσης για την ελάχιστη ταχύτητα ονομάζεται πλεόνασμα υπερύψωσης π : $\pi = h - h_{\theta}(V_{min})$. Η ύπαρξη ανεπάρκειας ή πλεονάσματος υπερύψωσης μεταφράζεται σε ώθηση των επιβατών προς το εξωτερικό ή το εσωτερικό της στροφής αντίστοιχα.

Η οριακή τιμή της υπερύψωσης στην καμπύλη είναι $h_{max} = 160\text{mm}$, της ανεπάρκειας της υπερυψώσεως $\alpha_{max} = 105\text{mm}$ και του πλεονάσματος $\pi_{max} = 100\text{mm}$. Η ελάχιστη τιμή της υπερύψωσης δεν θα πρέπει να προκαλεί μη εξισορροπούμενη φυγόκεντρο επιτάχυνση μεγαλύτερη από $b = 0,7\text{m/sec}^2$ σύμφωνα με τον τύπο: $h = (11.8 \times V^2)/R - 152b$. Η σταθερά 152 προκύπτει από την ανάλυση δυνάμεων στην τομή του συρμού ως πηλίκο της απόστασης των σιδηροτροχιών προς την επιτάχυνση της βαρύτητας.

Έτσι η κανονική υπερύψωση που θα εφαρμόζεται τελικά υπολογίζεται από τον τύπο:

$$h = \frac{h_{max}}{h_{max} + a_{max}} \times \frac{11.8 \times V^2}{R} = \frac{160}{160 + 105} \times \frac{11.8 \times V^2}{R} \Rightarrow$$
$$h = \frac{7.12 \times V^2}{R}$$

Οπού:

V η μέγιστη εφαρμοζόμενη ταχύτητα σε km/h

R η ακτίνα της καμπύλης σε m

h η υπερύψωση σε km

Οι κανόνες χάραξης της σιδηροδρομικής γραμμής ορίζουν την ελάχιστη ακτίνα ως συνάρτηση της μέγιστης ταχύτητας κίνησης σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$R_{min} = \frac{11.8 \times V_{max}^2}{h_{max} + a_{max}} = \frac{11.8 \times V_{max}^2}{265} \Rightarrow$$

$$R_{min} = 0.0445V_{max}^2 [m]$$

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή για $V_{max}=80\text{km/h}$ που όπως θα αναφερθεί παρακάτω είναι η μέγιστη ταχύτητα κίνησης των συρμών, υπολογίζεται η ελάχιστη ακτίνα $R_{min}= 285\text{m}$. Για ακτίνες μικρότερες των 285m το όχημα θα πρέπει να κινείται στην καμπύλη με ταχύτητες μικρότερες της μέγιστης.

Η επίκλιση e αποτελεί το πηλίκο της κανονικής υπερύψωσης προς το εύρος της γραμμής. Επομένως:

$$e = \frac{h}{s} = \frac{h}{1500}$$

Συνεπώς, η μέγιστη επίκλιση υπολογίζεται για τον συνδυασμό μέγιστης ταχύτητα μελέτης και ελάχιστης ακτίνας καμπυλότητας. Έτσι, για $V=80\text{km/h}$, $R=285\text{m}$ υπολογίζεται $h=160\text{mm}$. Οπότε υπολογίζεται η μέγιστη επίκλιση $e=11\%$.

2.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά εξεταζόμενου τροχαίου υλικού

Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη της εγγραφής και η διερεύνηση του περιτυπώματος κάθε τύπου συρμού στα οριζοντιογραφικά τμήματα μεγάλης καμπυλότητας απαιτείται, επιπλέον, η ακριβής γνώση της γεωμετρίας του εκάστοτε οχήματος. Για το λόγο αυτό θα περιγραφούν αναλυτικά τα τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τροχαίου υλικού που κινείται στο δίκτυο του Μετρό της Αθήνας.

Το δίκτυο αποτελείται από τρεις γραμμές, με την πρώτη να διαφοροποιείται από τις άλλες λόγω παλαιότητας κατασκευής της γραμμής αλλά και της τεχνολογίας των οχημάτων. Γενικότερα το τροχαίο υλικό που κινείται στο αστικό δίκτυο παρουσιάζει μικρότερες διαφοροποιήσεις από το υπεραστικό αφού η χρήση των οχημάτων είναι μόνο επιβατική. Επιπλέον, υπάρχει απαίτηση για αυστηρή ομοιομορφία των συρμών ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία εξαρτώνται από τον τύπο των σηράγγων του δικτύου αλλά και την διαμόρφωση των σταθμών.

Στην πρώτη γραμμή (**Γραμμή 1**) το δίκτυο έχει διαμορφωθεί κυρίως υπέργειο, ενώ υπογειοποιείται μόνο σε ορισμένα κεντρικά τμήματα. Τα οχήματα της γραμμής κινούνται αποκλειστικά σε αυτήν ενώ βρίσκονται σε λειτουργία τρεις τύποι που διακρίνονται με βάση την ημερομηνία παραλαβής τους. Έτσι διαχωρίζονται σε συρμούς 8^{ης}, 10^{ης} και 11^{ης} παραλαβής. Τα οχήματα διαφέρουν μόνο ως προς τον τρόπο σύζευξης τους, με την 8^η παραλαβή να συντίθεται με έναν τρίδυμο και έναν δίδυμο συρμό, την 11^η με δύο τριδύμους και την 10^η να αποτελεί συνδυασμό των δύο προαναφερθέντων με τον συνολικό αριθμό των βαγονιών να κυμαίνεται από πέντε (έναν δίδυμο και έναν τρίδυμο συρμό) ως έξι (2 τρίδυμους συρμούς) .

Η απόσταση μεταξύ δύο συζευγμένων βαγονιών είναι σταθερή και ίση με 0,64m ενώ οι συρμοί που συνδέονται χωρίς σύζευξη απέχουν 1,1m. Η διαφοροποίηση στις αποστάσεις των διαδοχικών οχημάτων εξυπηρετεί όπως θα αναφερθεί και παρακάτω την εγγραφή του οχήματος καμπύλες μικρής ακτίνας. Η παροχή ρεύματος γίνεται σε όλους τους τύπους συρμών με τρίτη τροχαία με τάση συνεχούς ρεύματος 750V ενώ για μερικά οχήματα της 8^{ης} γενιάς με τάση συνεχούς ρεύματος 600V.

Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων τύπων συρμών.

	Συρμοί 8^{ης} παραλαβής	Συρμοί 10^{ης} παραλαβής	Συρμοί 11^{ης} παραλαβής
Σύνθεση συρμών	5 οχήματα	5/6 οχήματα	6 οχήματα
Ύψος οχήματος	3,57m	3,62m	3,62m
Πλάτος οχήματος	2,78m	2,78m	2,78m
Μήκος οχήματος	17m	17m	17m
Συνολικό μήκος συρμού	88m	88m/105,66m	105,66m
Αριθμός φορείων	2	2	2
Απόσταση ομφαλών φορείων	11,5m	11,5m	11,5m
Απόσταση αξόνων φορείου	2,1m	2,1m	2,1m
Μέγιστη ταχύτητα	70km/h	70km/h	70km/h

Πίνακας 2.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συρμών Γραμμής 1

Οι υπόλοιπες γραμμές (**Γραμμή 2, Γραμμή 3**) κατασκευάστηκαν παράλληλα στο κεντρικό τους κομμάτι, ενώ στη συνέχεια έγιναν για την κάθε μία ξεχωριστές επεκτάσεις. Είναι υπόγειες σε όλο το μήκος τους με εξαίρεση το τμήμα της Γραμμής 3 που εξέρχεται από το αστική ζώνη της Αττικής και συνδέει με τον Διεθνή Αερολιμένα Αθηνών. Στο δίκτυο κινούνται επίσης τρεις τύποι συρμών και διακρίνονται σε συρμούς 1^{ης}, 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς. Τα οχήματα παρουσιάζουν μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις από εκείνα της γραμμής 1 ως προς τα γεωμετρικά αλλά και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Έτσι, οι συρμοί 1^{ης} γενιάς είναι πανομοιότυποι με τους εξάδυμους 10^{ης} παραλαβής της γραμμής 1. Συνεπώς, η απόσταση μεταξύ δύο συζευγμένων βαγονιών είναι σταθερή και ίση με 0,64m ενώ οι συρμοί που συνδέονται χωρίς σύζευξη απέχουν 1,1m, όπως ακριβώς και στους συρμούς που ανήκουν στη 10^η παραλαβή. Αντίθετα η 2^η και η 3^η γενιά αποτελείται από έξι οχήματα ενιαία συνδεδεμένα μεταξύ τους που επιτρέπουν την κίνηση των επιβατών από το ένα στο άλλο.

Η παροχή ρεύματος γίνεται με τρίτη τροχιά η οποία τα τροφοδοτεί με συνεχές ρεύμα 750V. Στο υπέργειο τμήμα της Γραμμής 3, το οποίο ταυτίζεται με το δίκτυο του Προαστιακού Σιδηροδρόμου, παρέχεται εναλλασσόμενο ρεύμα 25kV. Στο κομμάτι αυτό, κινούνται συρμοί της 2^{ης} γενιάς που διαθέτουν παντογράφο που τους επιτρέπει να λειτουργούν με συνεχή αλλά και με εναλλασσόμενη τάση ανάλογα με το κομμάτι του δικτύου στο οποίο κινούνται.

Αντίστοιχα, δίνεται ο παρακάτω πίνακας που παρουσιάζει αναλυτικά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των συρμών που κινούνται στις Γραμμές 2 και 3.

	Συρμοί 1^{ης} Γενιάς	Συρμοί 2^{ης} γενιάς	Συρμοί 3^{ης} γενιάς
Σύνθεση συρμών	6 οχήματα	6 οχήματα	6 οχήματα
Ύψος οχήματος	3,62m	3,69m	3,75mm
Πλάτος οχήματος	2,8m	2,8m	2,8m
Μήκος οχήματος	17m	17m	17m
Συνολικό μήκος συρμού	106m	106m	106m
Αριθμός φορείων	2	2	2
Απόσταση ομφαλών φορείων	11,5m	11.5m	11.5m
Απόσταση αξόνων φορείου	2,1m	2.1m	2.1m
Μέγιστη ταχύτητα	80km/h	80km/h	80km/h
Μέγιστη ταχύτητα AC	-	120km/h	-

Πίνακας 2.3: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συρμών Γραμμής 2 & 3

Όπως φαίνεται από τους πίνακες των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των τύπων συρμών που κυκλοφορούν στο δίκτυο, οι διαφορές εντοπίζονται κυρίως στην μέγιστη ταχύτητα κίνησης, η οποία για λόγους ενιαίας λειτουργίας του δικτύου θεωρείται $V_{max} = 80 \text{ km/h}$. Επιπλέον, διαφοροποιήσεις παρουσιάζονται στα ύψη των οχημάτων, στα οποία επίσης θα γίνει διερεύνηση για το υψηλότερο όχημα έτσι ώστε να καλύπτονται και οι υπόλοιποι τύποι συρμών έχοντας ελαφρώς μικρότερες διαστάσεις.

Κεφάλαιο 3^ο: Κύλιση

3.1 Γενικές αρχές κύλισης

Ο τροχός κυλίνει επί της Άνω στάθμης Κύλισης Σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ) με την περιμετρική επιφάνεια του ενώ στα καμπύλα τμήματα οδηγείται από την εσωτερική παρειά των σιδηροτροχιών μέσω του όνυχα. Συνεπώς, η γεωμετρία του τροχού και της κεφαλής της σιδηροτροχιάς πρέπει να είναι συμπληρωματικές στα σημεία επαφής. Έτσι, η επιφάνεια κύλισης του τροχού είναι ίδιας διατομής για τις μηχανές έλξης και τα ελκόμενα οχήματα και καθορίζεται από την γεωμετρία της σιδηροτροχιάς.

Επιφάνεια κύλισης τροχών

Η επιφάνεια κύλισης του τροχού επί της σιδηροτροχιάς ονομάζεται **επίσωτρο** και είναι κολουροκωνικής μορφής με μικρή κλίση της σιδηροτροχιάς προς τον άξονα της γραμμής της τάξης του 1:20 ως 1:40 προς την κατακόρυφο. Η γεωμετρία αυτή εξυπηρετεί την ευστάθεια και ομαλή κίνηση του συρμού αλλά και την προσαρμογή του άκαμπτου άξονα των τροχών στις οριζοντιογραφικές καμπύλες. Επιπλέον, το όχημα συγκρατείται γύρω από τον άξονα της γραμμής στην ευθυγραμμία εκτελώντας οφιοειδή κίνηση.

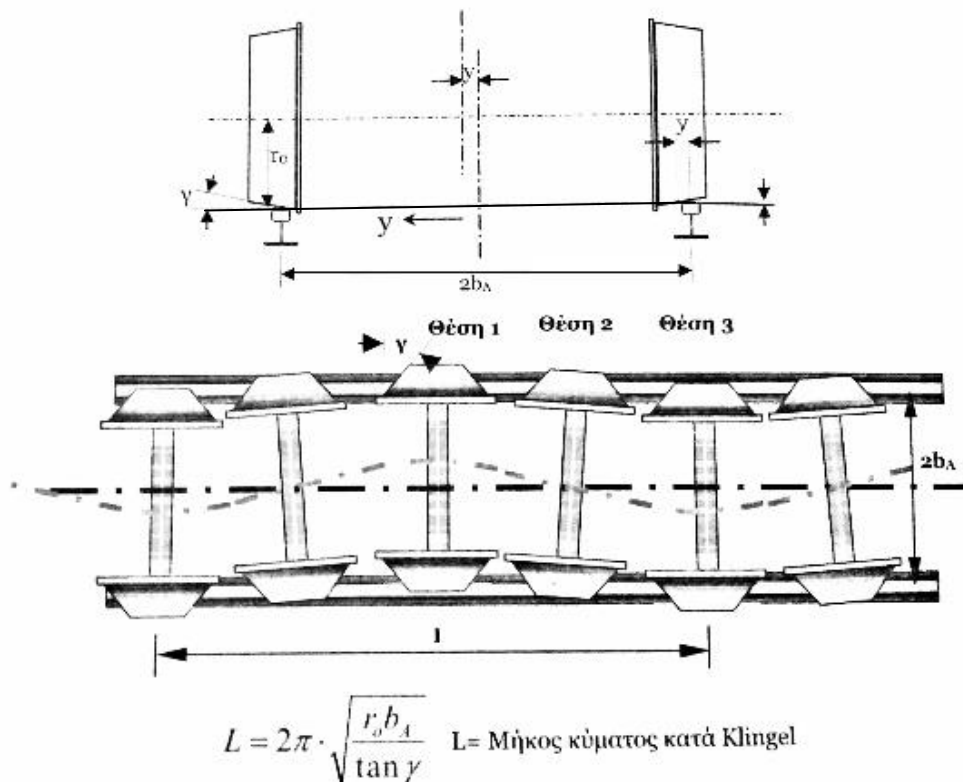
Η διαφορά μήκους της εσωτερικής και εξωτερικής σιδηροτροχιάς στις καμπύλες επιφάνειες και συνεπώς η διάνυση διαφορετικών αποστάσεων από τροχούς σταθερά συνδεδεμένους επιτυγχάνεται με την κίνηση τους με κοινή γωνιακή ταχύτητα. Ο τύπος κίνησης αυτός υποχρεώνει σε ολίσθηση των ένα η και τους δύο τροχούς. Ωστόσο, η κολουροκωνική επιφάνεια διαφοροποιεί κατάλληλα την ακτίνα στο σημείο επαφής κάθε τροχού έτσι ώστε κατά την κίνηση ο εξωτερικός τροχός να πραγματοποιεί κύλιση με μεγαλύτερη ακτίνα και συνεπώς να διανύει μεγαλύτερη απόσταση ενώ ο εσωτερικός να κυλίνει με μικρότερη και συνεπώς να καλύπτει μικρότερο μήκος. Κατά την κίνηση στην καμπύλη ο τροχοφόρος άξονας τείνει προς την ακτινική θέση μειώνοντας την γωνία πρόσπτωσης του όνυχα του τροχού που κυλίνει με την μικρή ακτίνα στην σιδηροτροχιά.

Η κολουροκωνική επιφάνεια συντελεί και στην ελαχιστοποίηση των τοπικών φθορών του τροχού. Σε περίπτωση που η περίμετρος του τροχού κατασκευαζόταν κυλινδρική, το σημείο επαφής θα παρέμενε σταθερό στην ευθυγραμμία με συνέπεια την τοπική φθορά και την δημιουργία αυλάκωσης. Αντίθετα κατά την οφιοειδή κίνηση η επαφή επεκτείνεται σε ευρύτερη περιοχή κατανέμοντας την φθορά λόγω τριβής σε μεγαλύτερη επιφάνεια με αποτέλεσμα την παράταση του χρόνου ζωής του τροχού.

3.2 Η κύλιση στην ευθυγραμμία

Η γεωμετρία της επιφάνειας κύλισης του τροχού αφήνει ένα μικρό περιθώριο μεταξύ του όνυχα και της εσωτερικής παρειάς της σιδηροτροχιάς. Οι πλευρικές δυνάμεις που ασκούνται περιστασιακά όμως στο όχημα το ωθούν πλάγια με αποτέλεσμα να έρχεται σε επαφή ο όνυχας του ενός τροχού με την σιδηροτροχιά και να διαφοροποιείται η ακτίνα κύλισης των τροχών. Συνεπώς το διάστημα που διανύουν οι δύο τροχοί διαφοροποιείται συνεχώς.

Πιο αναλυτικά, όταν ένας άξονας είναι ελαφρά μετατοπισμένος προς την μία κατεύθυνση της σιδηροτροχιάς τότε ο αντίστοιχος τροχός κυλίζει με μεγαλύτερη ακτίνα από τον απέναντι. Επειδή όμως και οι δύο τροχοί είναι σταθερά συζευγμένοι κινούνται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Συνεπώς, ο ένας τροχός διανύει μεγαλύτερη απόσταση από τον άλλο, με αποτέλεσμα ο πρώτος να προπορεύεται και ο άξονας να παίρνει μια πλάγια θέση ως προς τον άξονα της γραμμής. Στη συνέχεια ο άξονας κινείται προς το μέσο της γραμμής, και έτσι τα σημεία επαφής του τροχού με την σιδηροτροχιά να μετατοπίζονται προς την άλλη πλευρά. Έτσι η ακτίνα κύλισης του προπορευόμενου τροχού μειώνεται, ενώ του δεύτερου αυξάνεται.



Εικόνα 3.1: Οφιοειδής κίνηση των τροχών κατά Klingel

Τη στιγμή επαφής του μέσου του άξονα με τον άξονα της γραμμής οι δύο τροχοί κινούνται με ίσες ακτίνες, οπότε ο άξονας κινείται ευθύγραμμα, πλάγια ωστόσο ως προς την γραμμή εξαιτίας της πλάγιας κλίσης που είχε κατά την επαναφορά του στο κέντρο της γραμμής. Η ακτίνα κύλισης των τροχών συνεχίζει να μεταβάλλεται με τον ίδιο τρόπο με αποτέλεσμα ο δεύτερος τροχός να διανύει μεγαλύτερη απόσταση και να προπορεύεται. Στο σημείο αυτό η διαδικασία επαναλαμβάνεται ακριβώς προς την άλλη πλευρά.

Η διαδικασία αυτή υφίσταται σε τροχούς με κολουροκωνική επιφάνεια με την προϋπόθεση ότι η κυλίουν χωρίς να ολισθαίνουν. Η καμπύλη που διαγράφεται πλησιάζει την ημιτονοειδή συνάρτηση και για τον λόγο αυτό αναφέρεται η **ημιτονοειδής κίνηση του συρμού**. Στην πραγματικότητα, όμως, η κίνηση ενός σιδηροδρομικού άξονα και ιδίως ενός πλήρους οχήματος είναι πιο σύνθετη. Η παρουσία δυνάμεων βαρύτητας και ψευδολίσθησης στην επιφάνεια επαφής του τροχού με την σιδηροτροχιά και η μεταβλητή κωνικότητα των τροχών δεν επιτρέπουν την καθαρή κύλιση τους και προσδίδουν δυναμική συμπεριφορά στην κίνηση. Συνεπώς, ο πιο ακριβής θεωρείται ο χαρακτηρισμός “κυματοειδής” ή **“οφιοειδής κίνηση”**.

Η κίνηση αυτή στις μικρές ταχύτητες είναι ευσταθής και εξασφαλίζει τη φυσική καθοδήγηση του μεμονωμένου άξονα. Μετά, όμως από μια ταχύτητα η κίνηση γίνεται ασταθής δημιουργώντας ταλαντώσεις μεγάλου εύρους που δύσκολα περιορίζονται από την παρουσία σιδηροτροχιών. Για τον λόγο αυτό εισάγονται φορεία στα οχήματα.

3.3 Η κύλιση στην καμπύλη

Όπως έχει αναφερθεί, οι τροχοί των σιδηροδρομικών οχημάτων στην πλειονότητα των περιπτώσεων είναι σταθερά συνδεδεμένοι μεταξύ τους με έναν άξονα στα φορεία, αποτελώντας τον τροχοφόρο άξονα. Στα καμπύλα τμήματα της γραμμής όμως η διαφορά μήκους της εξωτερικής τροχιάς από την εσωτερική θα εξανάγκαζε τον εσωτερικό τροχό σε ολίσθηση αν δεν υπήρχε η δυνατότητα προσαρμογής της ακτίνας χάρις την κωνικότητα της διατομής του. Ο άξονας εισέρχεται στην καμπύλη με την ακτίνα κύλισης του εξωτερικού τροχού να είναι μεγαλύτερη αυτής του εσωτερικού αφού η κολουροκωνική επιφάνεια κύλισης των τροχών επιτρέπει την διαφοροποίηση της ακτίνας στην περιοχή επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς. Συνεπώς, ο εξωτερικός τροχός διανύει μεγαλύτερο μήκος από τον εσωτερικό, εξισώνοντας κατά το δυνατό την διαφορά μήκους των δύο γραμμών.

3.4 Η μέθοδος Vogel

Για μελετηθεί η εγγραφή του οχήματος στην καμπύλη απαιτείται η ακριβής απεικόνιση της θέσης των αξόνων του. Η δημιουργία ενός τέτοιου σχεδίου καθίσταται δύσκολη εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς των διαστάσεων ενός οχήματος ή ενός τροχοφόρου άξονα και των αποστάσεων μεταξύ του όνυχα και της σιδηροτροχιάς. Το πρόβλημα αυτό επιλύει η μέθοδος απεικόνισης της θέσης του άξονα που ανέπτυξε ο μηχανικός Rudolf Vogel.

Αρχικά, γίνεται η θεώρηση της οριζόντιας μετακίνησης του ενός σημείου καθοδήγησης του τροχού μέχρι να ταυτιστεί με το αντίστοιχο του άλλου. Συνεπώς, μηδενίζεται η απόσταση του ίχνους. Επιπλέον, το διάστημα που απομένει πλέον μεταξύ των σιδηροτροχιών ισούται με το διάκενο μεταξύ του εύρους της γραμμής και του ίχνους. Έτσι, δημιουργείται το **κανάλι του ίχνους** για όλο το μήκος της γραμμής τα όρια του οποίου αποτελούνται από τις εσωτερικές παρειές των δύο σιδηροτροχιών. Ο τροχοφόρος άξονας απεικονίζεται ως σημείο, το οποίο κινείται μέσα στο κανάλι ίχνους. Παρόλη την απλότητά της η απεικόνιση αρκεί για την διερεύνηση της καθοδήγησης του τροχοφόρου άξονα. Η συγκεκριμένη θεώρηση περιέχει κάποιες απλοποιήσεις. Αρχικά, τόσο ο τροχοφόρος άξονας όσο και η γραμμή θεωρούνται άκαμπτα σώματα. Στην πραγματικότητα, υπό την επίδραση εγκάρσιων δυνάμεων εμφανίζεται μια σχετική παραμόρφωση. Επίσης, γίνεται η παραδοχή των σταθερών άκρων του καναλιού ίχνους στην εσωτερική παρειά της σιδηροτροχιάς ενώ στην πράξη με την εγκάρσια δυναμική του οχήματος το σημείο μετακινείται στην κοιλότητα του όνυχα. Συνεπώς το πλάτος του καναλιού ίχνους είναι μεγαλύτερο στην πραγματικότητα από το διάκενο. Η αύξηση αυτή του πλάτους όμως αγνοείται. Ωστόσο, το εύρος γραμμής και το ίχνος μετρώνται σε διαφορετικό ύψος. Για τον λόγο αυτό, το πλάτος του καναλιού ίχνους προσαυξάνεται κατά 1mm. Τελικά το **διάκενο** υπολογίζεται:

$$\delta = 1435 - 1426 + 1 = 10\text{mm}$$

Εύρος γραμμής = 1435 mm

Απόσταση ίχνους = 1426 mm

Το πλάτος του καναλιού εξαρτάται, όπως φαίνεται από το εύρος της γραμμής και την απόσταση ίχνους. Αυξάνεται, όμως όταν οι όνυχες λεπταίνουν από φθορά λόγω μακροχρόνιας χρήσης.

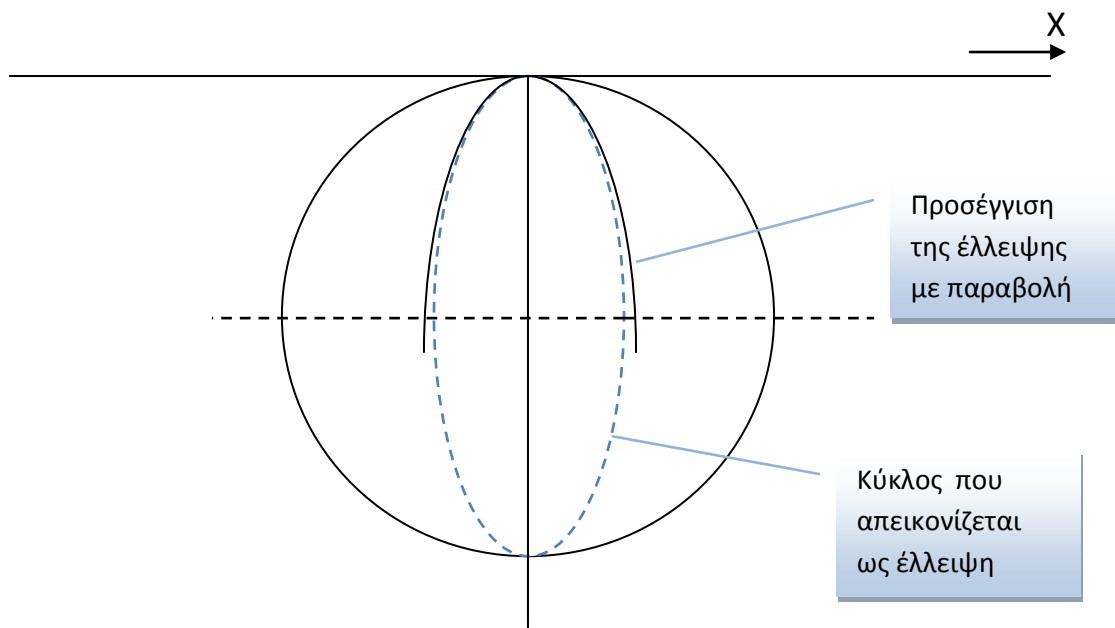
Η σχεδίαση σε κάτοψη ολόκληρων οχημάτων επί της κυκλικής καμπύλης σε ενιαία κλίμακα δεν καθίσταται δυνατή εξαιτίας της σχεδιαστικής συνύπαρξης του μήκους του οχήματος, της τάξης κάποιων μέτρων, και του διακένου, της τάξης

ορισμένων χλυστών. Για το λόγο αυτό η μέθοδος Vogel απεικονίζει σε στρεβλή κλίμακα τα παρακάτω μεγέθη:

- Μεταξόνιο (απόσταση μεταξύ των δύο αξόνων του ίδιου φορείου)
- Διάκενο δ
- Καμπυλότητα
- Αποστάσεις μεταξύ ομφαλών των φορέων

Οι εγκάρσιες διαστάσεις όπως το διάκενο και η ακτίνα καμπυλότητας σχεδιάζονται σε κλίμακα 1:1 ή 1:2, ενώ τα μήκη μεταξύ των αξόνων σε κλίμακες από 1:20 ως 1:100. Οι άξονες στο σχέδιο Vogel (Vogelplan) φαίνονται σαν σημεία ενώ η ευθεία σύνδεσης των δύο σημείων αντιστοιχεί στο κατά μήκος άξονα του οχήματος ή του φορείου.

Στην απεικόνιση αυτή οι κυκλικές καμπύλες συρρικνώνονται κατά την διεύθυνση x και παραμορφώνονται σε ελλείψεις. Για να διευκολυνθεί η σχεδίαση η έλλειψη προσεγγίζεται στην αρχή της από την παραβολή της μορφής $y = x^2 / 2R$. Η προσέγγιση αυτή είναι ικανοποιητική καθώς το σφάλμα που προκύπτει είναι της τάξης του 0,1% ως προς y .

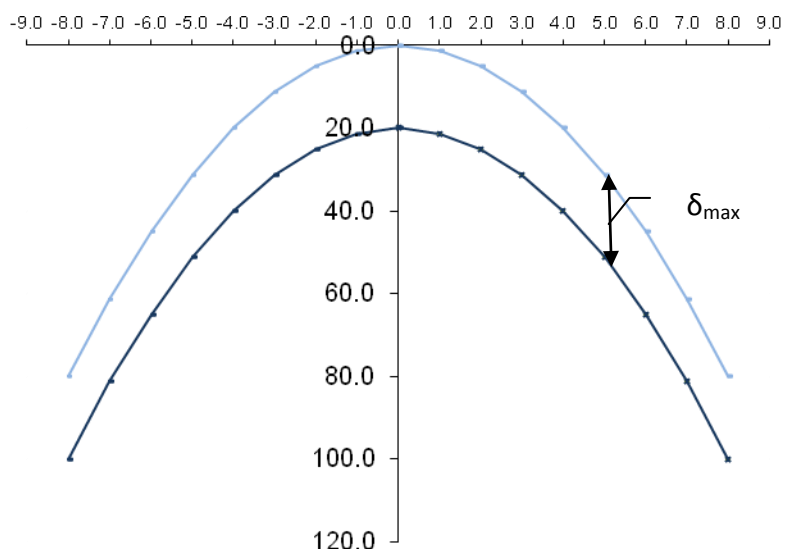


Σχήμα 3.1: Προσομοίωση κύκλου με παραβολή

Ακολουθεί ένα παράδειγμα σχεδιασμού του διαγράμματος Vogel για μία τυπική καμπύλη με ακτίνα $R=400\text{m}$ και μέγιστο πλάτος του καναλιού ίχνους μαζί με την διαπλάτυνση $\delta_{\max}=20\text{mm}$.

x [m]	x [m]	x^2 [m ²]	$y= x^2/2R[\text{mm}]$	$y +20$ [mm]
0	0	0	0.00	20.00
1	-1	1	1.25	21.25
2	-2	4	5.00	25.00
3	-3	9	11.25	31.25
4	-4	16	20.00	40.00
5	-5	25	31.25	51.25
6	-6	36	45.00	65.00
7	-7	49	61.25	81.25
8	-8	64	80.00	100.00

Πίνακας 3.1: Υπολογισμός εύρους καναλιού Vogel στην στρεβλή κλίμακα



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση οριζοντιογραφικής κυκλικής καμπύλης με την μέθοδο Vogel

3.5 Οι θέσεις των αξόνων και των οχημάτων στις καμπύλες

Με την κωνικότητα του επίσωτρου αποφεύγεται η ολίσθηση σε μεγάλο βαθμό, ωστόσο η κύλιση με την πλήρη απουσία ολίσθησης δεν είναι εφικτή. Έτσι, ενώ στην ιδανική περίπτωση η θέση του τροχοφόρου άξονα στην καμπύλη είναι η ακτινική επί της γραμμής διακρίνονται τρεις δυνατές θέσεις του στην πραγματικότητα.

Στην προαναφερθείσα ακτινική θέση ο τροχοφόρος άξονας ταυτίζεται με την ακτίνα της καμπύλης της γραμμής. Η κύλιση γίνεται στο κυκλικό τόξο χωρίς ο τροχός να προσπίπτει με τον όνυχα του στην εξωτερική ή στην εσωτερική παρειά της σιδηροτροχιάς. Αν και αποτελεί την ιδανική περίπτωση κύλισης ο άξονας σπάνια παίρνει αυτή τη θέση.

Οι θέσεις στις οποίες συναντάται πιο συχνά ο τροχός είναι η υποακτινική και η υπερακτινική. Στην πρώτη περίπτωση, την υποακτινική θέση, ο εξωτερικός τροχός παραμένει παραμένει πίσω σε σχέση με τον εσωτερικό ως αποτέλεσμα της μη επαρκούς περιστροφής του άξονα στην κατεύθυνση του κυκλικού τόξου. Ο άξονας περιστροφής των τροχών σχηματίζει μια γωνία με την ακτίνα του κυκλικού τόξου. Η ίδια γωνία σχηματίζεται μεταξύ του τροχού και της εφαπτόμενης στην εσωτερική παρειά της σιδηροτροχιάς.

Στην υπερακτινική θέση, αντίστοιχα, ο άξονας έχει περάσει την ακτινική, δηλαδή έχει υποστεί μεγαλύτερη περιστροφή. Όταν ο όνυχας του εσωτερικού τροχού προσπίπτει στην παρειά της εσωτερικής σιδηροτροχιάς σχηματίζει επίσης γωνία πρόσπτωσης που ισούται με την γωνία που ορίζουν ο τροχοφόρος άξονας και η ακτίνα της καμπύλης.

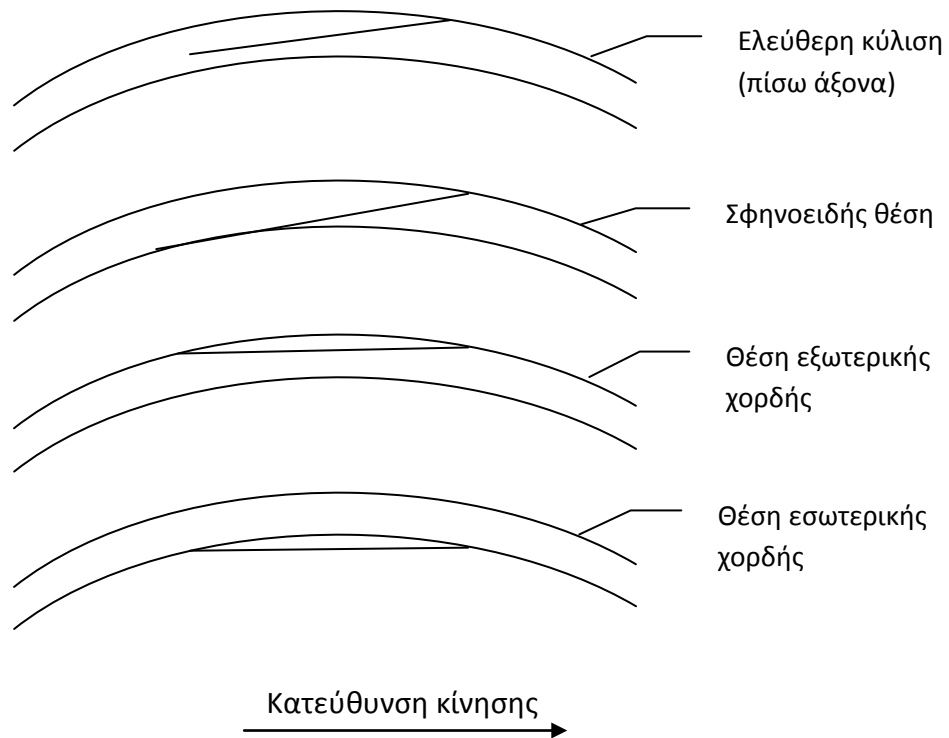
Η διερεύνηση της θέσης ενός οχήματος απαιτεί την παραδοχή της άκαμπτης σύνδεσης των τροχοφόρων αξόνων και του φορείου, ώστε να εξασφαλίζεται η απουσία σχετικών κινήσεων και περιστροφών ως προς τον άξονα του οχήματος. Τα φορεία που πληρούν αυτών των παραδοχών ονομάζονται άκαμπτα.

Ο μπροστινός άξονας ενός άκαμπτου φορείου που κινείται σε ένα κυκλικό τόξο προσπίπτει στην εξωτερική σιδηροτροχιά και βρίσκεται πάντα σε υποακτινική θέση. Η θέση των αξόνων απεικονίζεται με την μέθοδο Vogel και προκύπτει ότι ο μπροστινός άξονας προσπίπτει πάντα στην εξωτερική σιδηροτροχιά.

Αντίθετα, ο πίσω άξονας παρουσιάζει περισσότερους τρόπους κύλισης. Στην πρώτη περίπτωση ο άξονας κινείται ελεύθερα μεταξύ των δύο σιδηροτροχιών. Η θέση αυτή επιτυγχάνεται σε μεγάλες ακτίνες καμπυλότητας, όταν το διάκενο είναι αυξημένο ή το μεταξύνια αρκετά μικρό. Φυσιολογική θεωρείται και η θέση κατά την οποία ο πίσω άξονας ολισθαίνει επί της εσωτερικής σιδηροτροχιάς, με τον κατά μήκος άξονα του οχήματος να σχηματίζει χορδή μεταξύ των δύο

σιδηροτροχιών. Η συγκεκριμένη θέση ονομάζεται σφηνοειδής και παρόλο που είναι συνηθισμένη και αποδεκτή το όχημα αντιμετωπίζει μεγαλύτερες αντιστάσεις καμπύλης και για αυτό προκαλούνται γρηγορότερα φθορές στους τροχούς.

Οι υπόλοιπες θέσεις κατά τις οποίες και οι δύο άξονες ολισθαίνουν ταυτόχρονα παρά την εξωτερική ή την εσωτερική σιδηροτροχιά χαρακτηρίζονται μη φυσιολογικές και εμφανίζονται υπό την δράση ισχυρών πλευρικών εξωτερικά ή εσωτερικά δυνάμεων αντίστοιχα.



Σχήμα 3.3: Τυπικές θέσεις οχήματος με δύο άξονες σε κυκλική καμπύλη

Με την μέθοδο Vogel μπορεί να γίνει γραφική αναπαράσταση της θέσης ενός οχήματος ή ενός φορείου με άκαμπτους άξονες. Έτσι για την γραφική εκτίμηση, στο κανάλι του διακένου τοποθετούνται οι δύο άξονες σε σφηνοειδή θέση και χαράσσεται η γραμμή σύνδεσης τους. Αν η αυτή τέμνει την εσωτερική σιδηροτροχιά, τότε θεωρείται ότι το φορείο έχει αυτή την θέση (σφηνοειδή). Σε αντίθετη περίπτωση ο πίσω άξονας εκτιμάται σε ελεύθερη κύλιση.

Ωστόσο, μπορεί να γίνει και αριθμητική εκτίμηση της θέσης η οποία βασίζεται επίσης στην μέθοδο Vogel και την προσέγγιση της κυκλικής καμπύλης από την εξίσωση $y = x^2 / 2R$. Πιο αναλυτικά, συγκρίνεται στον άξονα y το διαθέσιμο κενό για την κίνηση, δηλαδή το διάκενο, με το μήκος κατά y που αντιστοιχεί στο μεταξόνιο. Έτσι, προκύπτουν οι έξης περιπτώσεις:

- $\frac{(2a)^2}{2R} < \delta \Rightarrow$ Ελεύθερη κύλιση
- $\frac{(2a)^2}{2R} > \delta \Rightarrow$ Σφηνοειδής θέση
- $\frac{(2a)^2}{2R} = \delta \Rightarrow$ Οριακή κατάσταση σφηνοειδούς θέσης και ελεύθερης κύλισης

Με: $2a$ το μεταξόνιο

R την ακτίνα καμπυλότητας

δ το διάκενο

Προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας και η τιμή του διακένου και όσο μικρότερο το μεταξόνιο, τόσο το όχημα ή το φορείο τείνει προς την θέση ελεύθερης κύλισης.

Οι παραπάνω συνθήκες θα δοκιμαστούν για τις εξεταζόμενες ακτίνες καμπυλότητας και το αντίστοιχο διάκενο όπως το ορίζουν οι κανονισμοί. Έτσι για $R=250m$ και $\delta=10mm$ προκύπτει:

$$\frac{(2a)^2}{2R} = \frac{2.1^2}{2 \times 250} = 8.82 \times 10^{-3}m = 8.82mm < \delta = 10mm$$

Για $R=600m$ και $\delta=10mm$:

$$\frac{(2a)^2}{2R} = \frac{2.1^2}{2 \times 600} = 3.675 \times 10^{-3}m = 3.675m < \delta = 10mm$$

Από την εξέταση των ακραίων τιμών ακτίνας που μελετώνται προκύπτει και στις δύο περιπτώσεις ελεύθερη κύλιση οπότε εξάγεται το συμπέρασμα ότι σε όλο το εύρος μελέτης η εγγραφή γίνεται με ελεύθερη κύλιση στην καμπύλη. Ωστόσο αναφορά θα γίνει και στην ακτίνα καμπυλότητας 200 μέτρων για την παράθεση σχηματικά της σφηνοειδούς θέσης και συνεπώς της ανάγκης διαμόρφωσης διαπλάτυνσης. Ακολουθούν και οι απαραίτητοι υπολογισμοί:

$$\frac{(2a)^2}{2R} = \frac{2.1^2}{2 \times 200} = 11.025 \times 10^{-3}m = 11.025mm > \delta = 10mm$$

Η διερεύνηση της θέσης του οχήματος στην καμπύλη θα γίνει γραφικά όπως περιγράφηκε μετά την τοποθέτηση των αξόνων των φορέων σε ελεύθερη κύλιση όπως προέκυψε από τους υπολογισμούς για τις ακτίνες καμπυλότητας από 600 έως 250μέτρα ενώ σε σφηνοειδή για την ακτίνα 200 μέτρων.

3.6 Πειραματικός υπολογισμός θέσης των φορείων

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν οι πιθανές θέσεις του οχήματος στην καμπύλη και η αναλυτική μέθοδος έρευνας τους. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας διεξήχθησαν μετρήσεις σε πραγματικές καμπύλες για να επιβεβαιωθεί η θέση που προκύπτει από τους κανονισμούς στην πράξη.

Σύμφωνα με τον τύπο υπολογισμού του αναμενόμενου διάκενου το όχημα κινείται σε ελεύθερη κύλιση για το σύνολο των κατασκευαστικά αποδεκτών ακτίνων οριζοντιογραφικής καμπυλότητας ($R > 250\text{m}$). Με επίλυση του τύπου ως προς την ακτίνα προκύπτει το όριο της ελεύθερης κύλισης που αντιστοιχεί σε ακτίνα 220,5 μέτρων, η οποία όμως δεν κατασκευάζεται κατά κανόνα. Εξέρεση αποτελεί η οριζοντιογραφία του δικτύου στην στάση «Μοναστηράκι», όπου λόγω ύπαρξης αρχαιολογικού χώρου διαμορφώθηκε καμπύλη ακτίνας 180 μέτρων με διαμόρφωση όμως κατάλληλης διαπλάτυνσης για να αποφευχθεί η σφηνοειδής θέση και συνεπώς οι μεγάλες φθορές στον όνυχα των τροχών.

Για την διερεύνηση της θέσης των φορείων επιλέχθηκε η μέγιστη δυνατή καμπυλότητα αφού καθώς μειώνεται η ακτίνα, αυξάνεται το πηλίκο $(2a)^2/2R$ πλησιάζοντας την τιμή του διάκενου. Η θέση αυτή αντιστοιχεί στο τμήμα ανάμεσα στις στάσεις «Νέα Ιωνία» και «Πευκάκια» με ακτίνα οριζοντιογραφικής καμπυλότητας 250 μέτρων. Αντίστοιχης γεωμετρίας θέσεις συναντώνται και σε άλλα σημεία του δικτύου σε υπόγεια τμήματα, όπου ο περιορισμένος χώρος της διατομής της σήραγγας δυσχαιρένει την πρόσβαση και διεξαγωγή μετρήσεων.

Για την διεξαγωγή των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε μικροκάμερα η οποία τοποθετήθηκε κατάλληλα, με σκοπό να αποτυπώνει την απόσταση μεταξύ σιδηροτροχιάς και όνυχα, η οποία αντιστοιχεί στην διαφορά της τιμής του διάκενου με το κλάσμα $(2a)^2/2R$. Η εγκατάσταση της κάμερας έγινε με την χρήση κατάλληλης κατασκευής ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή θέση και προσανατολισμός της. Πιο αναλυτικά, επί της σιδηροτροχιάς σταθεροποιήθηκαν με σφιγκτήρες δύο κομμάτια ξύλου εκατέρωθεν του κορμού της. Στο εσωτερικό τοποθετήθηκε εκείνο που φέρει την κάμερα, με πάχος ίσο με 2,5 εκατοστά, δηλαδή την διαφορά πάχους μεταξύ κορμού και κεφαλής της σιδηροτροχιάς. Αντίστοιχα στο εξωτερικό επιλέχθηκε αποκλειστικά για λόγους σταθεροποίησης της κατασκευής κομμάτι πάχους 6 εκατοστών, ίσο με την απόσταση της παρειάς του κορμού από αυτήν του πέλματος. Στο κομμάτι που αποτελεί την βάση της κάμερας τοποθετήθηκαν με στηρίγματα που φέρουν ελάσματα η κάμερα και ένας φακός, τα οποία στερεώθηκαν με βίδες για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα τους στους κραδασμούς κατά τη διέλευση του συρμού. Η κάμερα συνδέθηκε με φορητό υπολογιστή στον οποίο καταγραφήκαν πέντε διελεύσεις συρμών στην εσωτερική και πέντε στην εξωτερική σιδηροτροχιά που αντιστοιχούν σε 100 μετρήσεις για την κάθε περίπτωση.



Εικόνα 3.2: Τοποθετημένη μικροκάμερα επί της σιδηροτροχιάς

Σε κάθε προφίλ τροχού - σιδηροτροχιάς μετρήθηκε με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια η απόσταση του όνυχα από την κεφαλή. Τα δεδομένα συγκεντρώθηκαν στον παρακάτω πίνακα για να εξακριβωθεί η θέση του φορείου. Λόγω αδυναμίας εύρεσης όλων των τιμών αφού οι συνθήκες φωτισμού δυσχαιρέναν σε κάποια στιγμιότυπα την μέτρηση, προτιμήθηκε ορισμένες τιμές να παραμείνουν αγνωστές. Με τον τρόπο αυτό το ελλατώθηκε από την μία το δείγμα των μετρήσεων, διατηρήθηκε, όμως η αξιοπιστία των τιμών.

Εξωτερική σιδηροτροχιά					Εσωτερική σιδηροτροχιά					
Συρμός	Όχημα	Φορείο	Απόσταση α' άξονα (mm)	Απόσταση β' άξονα (mm)	Συρμός	Όχημα	Φορείο	Απόσταση α' άξονα (mm)	Απόσταση β' άξονα (mm)	
1	1	1	0.25	5	1	1	1	8		
		2	0.5	4			2	7	0.25	
	2	1		6		2	1			
		2	0	5			2	7	0.5	
	3	1	0			3	1	9	0	
		2	0.25				2	7		
	4	1		6		4	1	8	0.5	
		2	0	9			2	9	0	
	5	1	0	8		5	1	10	0	
		2	0	9			2	9	0	

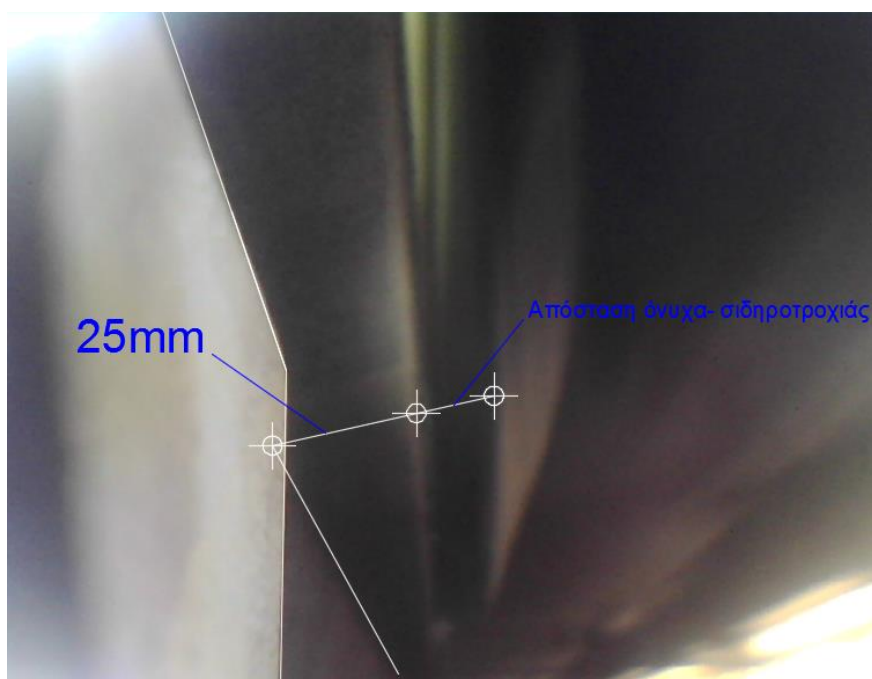
2	1	1	0	8	2	1	1	6	0.5	
		2	0.55	6			2	5		
	2	1		7		2	1	6		
		2	0	6			2	5	0.25	
	3	1	0.25			3	1		0	
		2	0.25	9			2	7	0.25	
	4	1	0.25	8		4	1	9	0	
		2	0				2	8		
	5	1	0			5	1	9	0	
		2	0	10			2	9	0	
3	1	1	0	7	3	1	1	6	0.25	
		2	0.5	6			2	7	0.5	
	2	1	0.25	7		2	1	6		
		2		7			2	7	0.75	
	3	1	0	8		3	1		0.5	
		2	0.25	7			2	9	0	
	4	1		9		4	1	7	0.25	
		2		9			2	8	0	
	5	1	0	8		5	1	10		
		2	0.25	10			2	9	0	
4	1	1	0.5	7	4	1	1	7	0.5	
		2	0.25	5			2	6	1.5	
	2	1	0	8		2	1			
		2		7			2	6	0.75	
	3	1	0	7		3	1	7	0.5	
		2	0.25	9			2	8		
	4	1	0			4	1	10	0.25	
		2	0	10			2	11	0.25	
	5	1	0	11		5	1	9	0	
		2	0.25	9			2	10	0	
5	1	1	0		5	1	1	7	0	
		2	0.25	8			2	6	1	
	2	1	0.5	7		2	1	8		
		2	0.25				2	8		
	3	1	0	7		3	1	7	0.75	
		2	0.5				2	8	0.75	
	4	1	0	8		4	1	8	0.25	
		2	0.25	9			2	9	0	
	5	1		10		5	1	10		
		2	0.25	10			2	9	0	

Πίνακας 3.2.: Πίνακας αποστάσεων όνουχα – παρειάς σιδηροτροχίας

Στις μετρήσεις που αφορούν την εξωτερική σιδηροτροχιά παρατηρούνται για κάθε όχημα στο πρώτο άξονα κάθε φορείου μικρές αποστάσεις, και μεγαλύτερες στον δεύτερο. Αντισυμμετρικά είναι τα αποτελέσματα για την εσωτερική σιδηροτροχιά. Αποδεικνύεται ότι η σιδηροτροχιά που οδηγεί τον συρμό είναι η εξωτερική σε συνδιασμό με τον πρώτο άξονα του κάθε φορείου.

Οι μετρήσεις που ενδιαφέρουν είναι εκείνες που αφορούν τον μπροστινό τροχό κάθε φορείου σε σχέση με την εξωτερική σιδηροτροχιά και τον πίσω σε σχέση με την εσωτερική. Οι πρώτες δείχνουν τον όνυχα να ακουμπά στην σιδηροτροχιά, όπως είναι λογικό αφού η συγκεκριμένη γεωμετρία αναλαμβάνει την προσαρμογή του οχήματος στο καμπύλο τμήμα. Από την αλλαγή, οι τιμές που αφορούν τον πίσω τροχό είναι πολύ μικρές επιβεβαιώνοντας την οριακή κατάσταση μεταξύ ελεύθερης κύλισης και σφηνοειδούς ολίσθησης που επικρατούν για την ακτίνα 250m. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι για τον ίδιο συρμό τα τελευταία οχήματα κινούνται σε ελεύθερη κύλιση ενώ τα προπορευόμενα προσεγγίζουν περισσότερο την σφηνοειδή. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, είναι η διαφορετική ταχύτητα με την οποία κινείται το μέτωπο του συρμού όταν διέρχεται από την συγκεκριμένη διατομή σε σχέση με το τελευταίο κομμάτι του, δεδομένου ότι ο συρμός στην θέση αυτή πραγματοποιεί επιταχυνόμενη κίνηση.

Οι τιμές αναμένονταν ίσες περίπου με την διαφορά του διάκενού με το κλάσμα $(2a)^2/2R$, στην περίπτωση οδηγού σιδηροτροχιάς και ίσες με το διάκενο στην αλλαγή, όμως τα αποτελέσματα των μετρήσεων δείχνουν μεγαλύτερες τιμές. Το γεγονός αυτό δικαιολογείται αμά ληφθεί υπόψη τόσο η φθορά του όνυχα του τροχού όσο και σε μικρότερο βαθμό της σιδηροτροχιάς.



Εικόνα 3.3: Στιγμιότυπο καταγραφής κάμερας με το προφίλ τροχού - σιδηροτροχιάς

Οι συγκεκριμένες καταγραφές πέρα από την επιβεβαίωση της ορθής θέσης των φορείων (ελεύθερη κύλιση ή σφηνοειδής ολίσθηση) για την ελαχιστοποίηση της φθοράς του όνυχα και την αποφυγή αυλακώσεων στην σιδηροτροχιά, χρησιμεύουν για την ορθή τοποθέτηση των σταθμών σε σχέση με τις καμπύλες της οριζοντιογραφίας.

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι τιμές της υπερύψωσης με βάση την ταχύτητα μελέτης των 80km/h καθώς και η κοινή ελάχιστη ταχύτητα με την οποία ο συρμός θα πρέπει να εισέλθει στην καμπύλη ώστε να μην πάρει βρεθεί σε θέση εσωτερικής χορδής. Οι τιμές της υπερύψωσης υπολογίστηκαν με τον τύπο της κανονικής υπερύψωσης ενώ οι τιμές ταχύτητας θεωρούνται βάση των στοιχείων της μελέτης του Μετρώ.

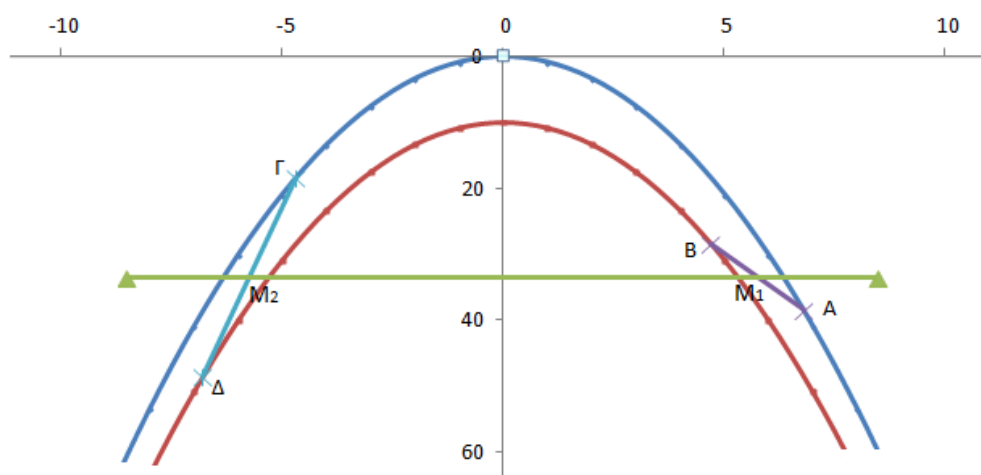
R(m)	h(mm)	Vmin (Km)	Απόσταση (m)
200	160	50	98
250	160	50	98
300	150	50	98
350	130	50	98
400	115	50	98

Πίνακας 3.3: Ελάχιστη ταχύτητα εισόδου στην καμπύλη και ελάχιστη απόσταση καμπύλης από σταθμό

3.7 Αρχές σχεδίασης διαγραμμάτων Vogel

Η σχεδίαση των διαγραμμάτων που ακολουθούν έγινε με βάση τις αρχές της μεθόδου Vogel που περιγράφηκαν. Οι γεωμετρικές διαφορές των εξεταζόμενων τύπων συρμών στην πράξη αποδεικνύονται αμελητέες για την εγγραφή των οχημάτων, οπότε η χάραξη των διαγραμμάτων θα γίνει με το συρμό εκείνο, του οποίου η γεωμετρία θεωρείται δυσμενέστερη για την εγγραφή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση επιλέχθηκαν οι συρμοί 11^{ης} γενιάς, οι οποίοι διαθέτουν το μεγαλύτερο μήκος βαγονιού. Η μελέτη της εγγραφής γίνεται σε σταδιακά μειούμενες ακτίνες ξεκινώντας από τα 600m. Από την ακτίνα οριζοντιογραφικής καμπύλης των 400m το βήμα εξέτασης των ακτινών μειώνεται στα 50m από 100m εξετάζοντας μέχρι και την καμπύλη ακτίνας 250m που αποτελεί το αμέσως μικρότερη τιμή από το κανονιστικό όριο των 285m με βάση το βήμα που έχει οριστεί. Θα εξεταστεί και εκείνη των 200m η οποία όπως θα δειχθεί στη συνέχεια αποτελεί το όριο καμπυλότητας άνω του οποίου απαιτείται διαπλάτυση για την εγγραφή των συγκεκριμένων οχημάτων με σκοπό μόνο την αποτύπωση της εγγραφής φορείων σε σφηνοειδή θέση στην καμπύλη.

Αρχικά απεικονίζεται στην στρεβλή κλίμακα το εύρος του καναλιού κατά Vogel. Στη συνέχεια στον οριζόντιο άξονα τοποθετείται ο συρμός στην μέση του διαγράμματος και στις αντίστοιχες θέσεις πάνω στο διάγραμμα τοποθετούνται οι άξονες των φορείων σε ελεύθερη θέση. Με την σύνδεση των μέσων σημείων των αξόνων του κάθε φορείου, δηλαδή των ομφαλών προκύπτει ο άξονας του συρμού. Ο άξονας του συρμού σχεδιάζεται πάντα σε οριζόντια θέση αφού τα μέσα των αξόνων βρίσκονται στην ίδια οριζόντια όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια.



Σχήμα 3.4: Vogelplan διαξονικού φορείου

Επειδή το μέτρο του οχήματος τοποθετείται στο σημείο της αρχής των αξόνων κατά x , οι ομφαλοί των δύο φορείων θα ισαπέχουν από τον άξονα των y και άρα $x_{M1} = x_{M2}$. Επιπλέον θα ισαπέχουν από τον άξονα των y και τα σημεία A και Δ, όπως και τα Γ και Β. ($x_A = x_\Delta$, $x_B = x_\Gamma$). Στην συγκεκριμένη περίπτωση οχημάτων οι τετμημένες αντιστοιχούν στα παρακάτω μεγέθη. Με την απόσταση των ομφαλών των φορείων να είναι 11.5 μέτρα, τα σημεία σύνδεσης θα βρίσκονται στο διάγραμμα επί των ευθειών $x=-5.75m$ και $x=5.75m$. Αντίστοιχα οι άξονες θα βρίσκονται σε θέσεις με τετμημένη 6.8m ο μπροστινός και 4.7m ο πίσω για το μπροστά φορείο και -4.7m ο μπροστινός και -6.8m ο πίσω για το πίσω φορείο.

Όσον αφορά τις τεταγμένες, τα σημεία επί της εξωτερικής σιδηροτροχιάς περιγράφονται από την εξίσωση $y = x^2/2R$, ενώ αυτά επί της εσωτερικής από την εξίσωση $y = x^2/2R + \delta$. Έτσι ισχύει:

$$y_A = \frac{x_A^2}{2 \times R}, y_B = \frac{x_B^2}{2 \times R} + \delta$$

$$y_\Gamma = \frac{x_\Gamma^2}{2 \times R}, y_\Delta = \frac{x_\Delta^2}{2 \times R} + \delta$$

Οι ομφαλοί βρίσκονται στο μέσον τις κεκλιμένης απόστασης των αξόνων και άρα σύμφωνα με το θεώρημα του Θαλή θα βρίσκονται και στο μέσον της προβολής στον άξονα γ. Άρα θα ισχύει:

$$y_{M1} = \frac{y_A + y_B}{2}, y_{M2} = \frac{y_\Gamma + y_\Delta}{2}$$

Αντικαθιστώντας τα y_A, y_B, y_Γ και y_Δ με τα ίσα τους προκύπτει:

$$y_{M1} = \frac{\frac{x_A^2}{2 \times R} + \frac{x_B^2}{2 \times R} + \delta}{2}$$

$$y_{M2} = \frac{\frac{x_\Gamma^2}{2 \times R} + \delta + \frac{x_\Delta^2}{2 \times R}}{2}$$

Λαμβάνοντας υπόψη και τις ισότητες $x_A = x_\Delta, x_B = x_\Gamma$ συμπεραίνεται ότι:

$$y_{M1} = \frac{\frac{x_A^2}{2 \times R} + \frac{x_B^2}{2 \times R} + \delta}{2} = \frac{\frac{x_\Gamma^2}{2 \times R} + \delta + \frac{x_\Delta^2}{2 \times R}}{2} = y_{M2}$$

$$y_{M1} = y_{M2}$$

Αποδεικνύεται δηλαδή ότι στο διάγραμμα Vogel ο συρμός απεικονίζεται πάντα σε οριζόντια θέση ανεξάρτητα του μήκος των χαρακτηριστικών του και της ακτίνας καμπυλότητας με την προϋπόθεση όμως ότι τα φορεία του έχουν ίσο μεταξόνιο και ισαπέχουν από το κέντρο το οχήματος.

3.8 Διαγράμματα Vogel

Για την χάραξη των διαγραμμάτων Vogel συγκεντρώθηκαν τα απαραίτητα στοιχεία τα οποία δίνονται στη συνέχεια ενώ οι υπολογισμοί έγιναν με την χρήση του προγράμματος Microsoft Excel ώστε να σχεδιαστούν ακριβώς τα διαγράμματα σύμφωνα με τις παραδοχές της μεθόδου. Οι πίνακες με τους ακριβείς υπολογισμούς δεν παρατίθενται για την κάθε περίπτωση, είναι αντίστοιχοι όμως με τον πίνακα 3.1 για την σχεδίαση του καναλιού που παρουσιάστηκε κατά την περιγραφή της μεθόδου. Επιπλέον η σχεδίαση των φορείων και του οχήματος προκύπτει με τους υπολογισμούς που δόθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

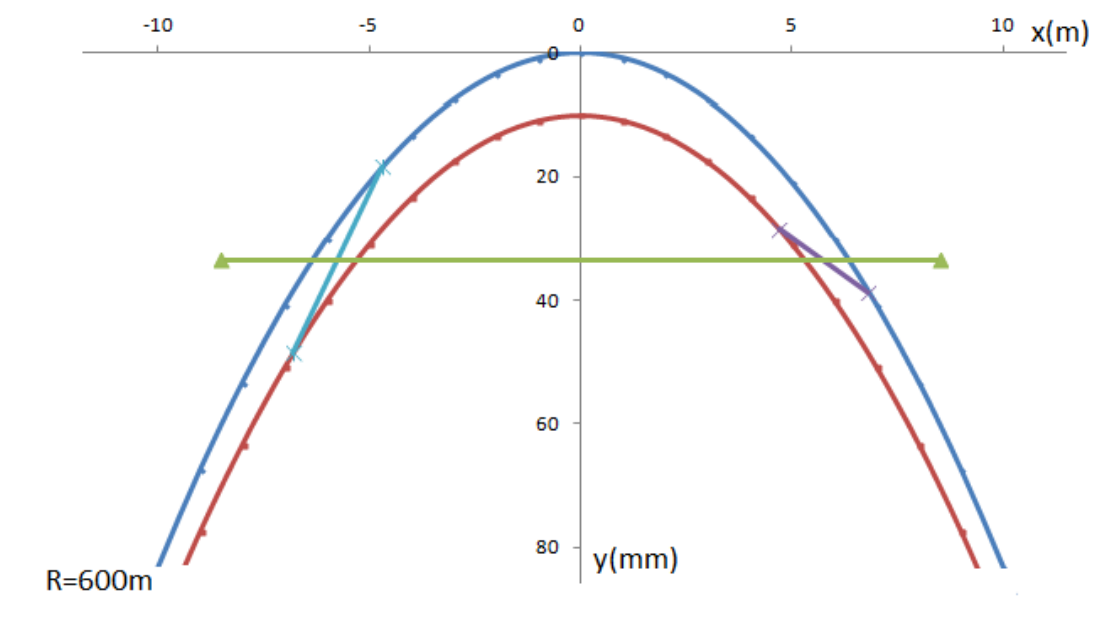
Θα παρουσιαστούν τα διαγράμματα με αναφορά από τις μεγαλύτερες ακτίνες προς τις μικρότερες στις οποίες η εγγραφή καθίσταται δυσκολότερη. Όπως προαναφέρθηκε εξετάζονται και οι ακτίνες των 200m και 150m οι οποίες δεν συνιστώνται κανονιστικά αλλά συναντώνται στο υπάρχον δίκτυο όπως στην περίπτωση του σταθμού Μοναστηράκι, όπου λόγω ύπαρξη αρχαιολογικού χώρου στην περιοχή του σταθμού κατασκευάστηκε οριζοντιογραφική καμπύλη ακτίνας 180m. Επιπλέον η ακτίνα 200m αποτελεί το όριο για την δημιουργία διαπλάτυνσης.

Δίνεται παρακάτω ο πίνακας με τα χαρακτηριστικά που υπεισέρχονται στην χάραξη του διαγράμματος Vogel.

R= [m]	250- 600
Απόσταση ίχνους = [mm]	1426
Εύρος γραμμής = [mm]	1435
Μεταξόνιο = [m]	2,1
Απόσταση ομφαλών = [m]	11,5
Επιθυμητή διαπλάτυνση = [mm]	0
Εύρος + διαπλάτυνση = [mm]	10

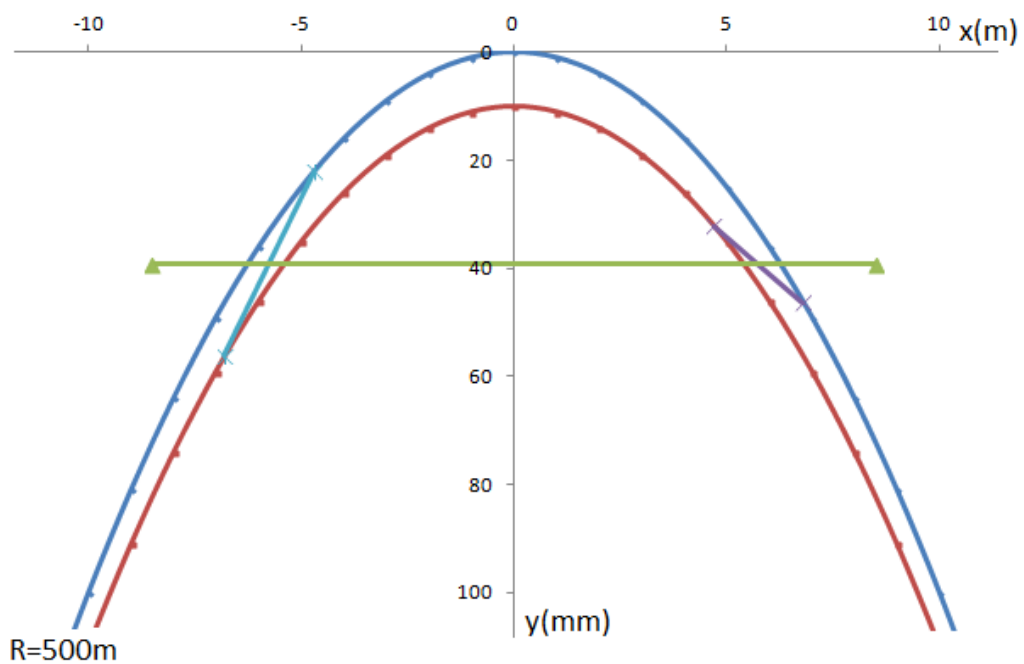
Πίνακας 3.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συρμού και γραμμής για ακτίνες καμπυλότητας 250 ως 600 μέτρων

Ακτίνα καμπυλότητας 600 μέτρων



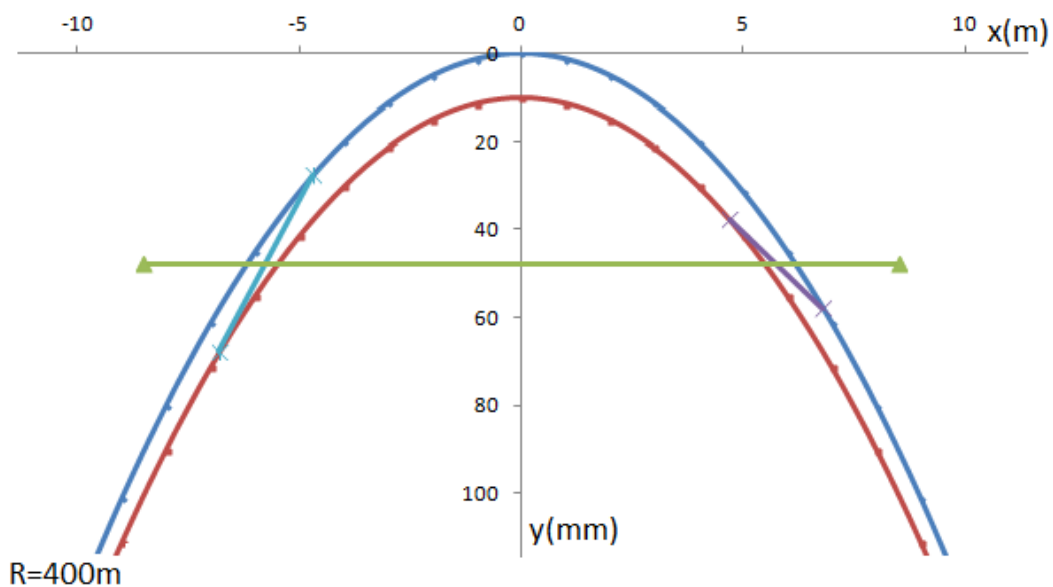
Σχήμα 3.5: Vogelplan οχημάτων Μετρό για R=600m

Ακτίνα καμπυλότητας 500 μέτρων



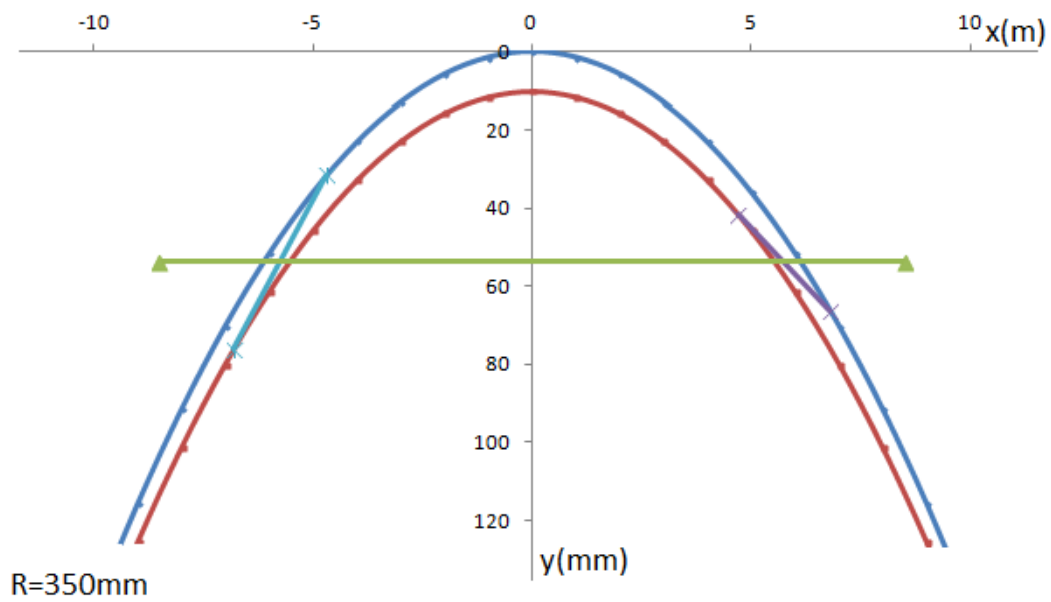
Σχήμα 3.6: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=500m$

Ακτίνα καμπυλότητας 400 μέτρων



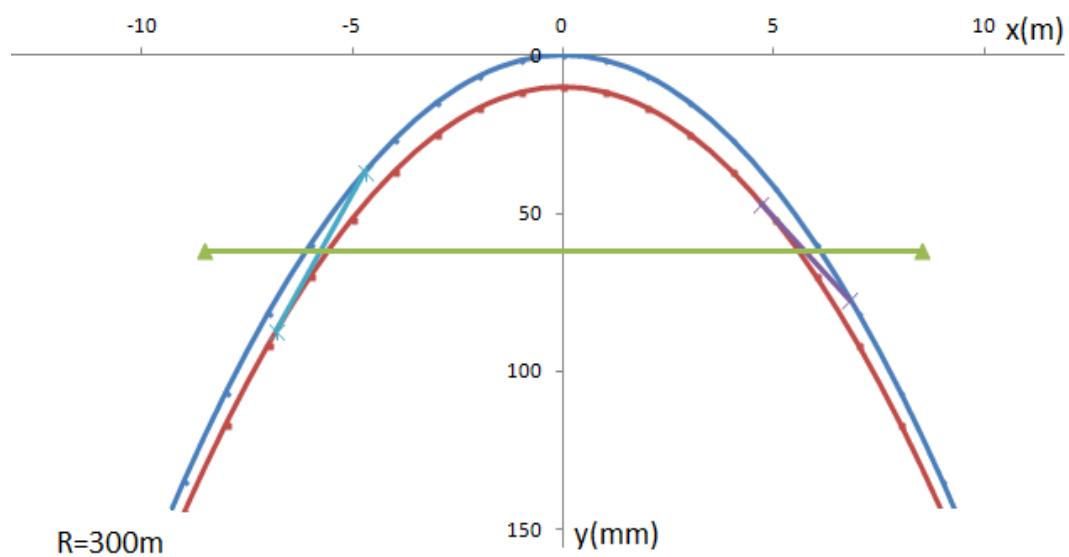
Σχήμα 3.7: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=400m$

Ακτίνα καμπυλότητας 350 μέτρων



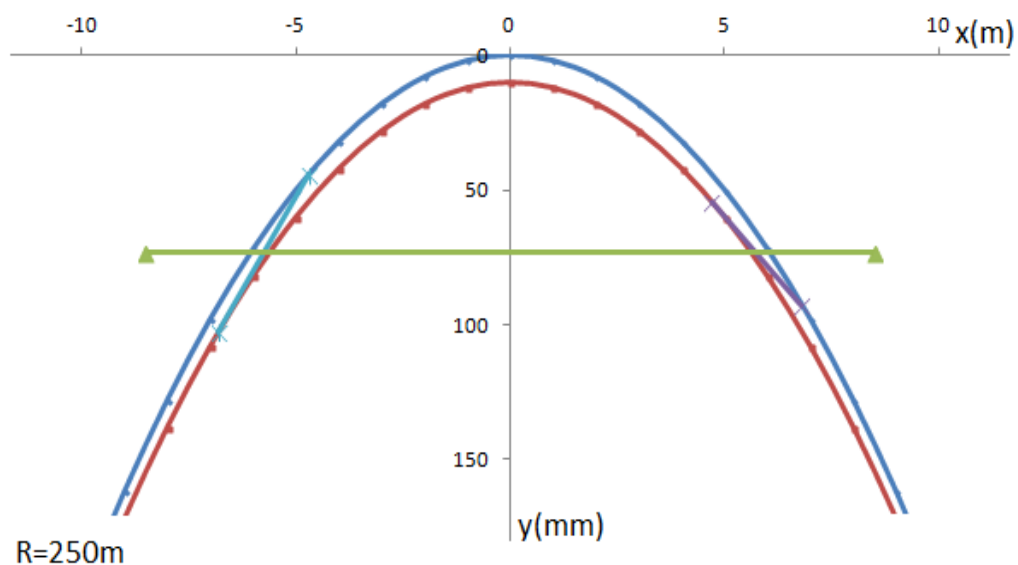
Σχήμα 3.8: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=350m$

Ακτίνα καμπυλότητας 300 μέτρων



Σχήμα 3.9: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=300m$

Ακτίνα καμπυλότητας 250 μέτρων



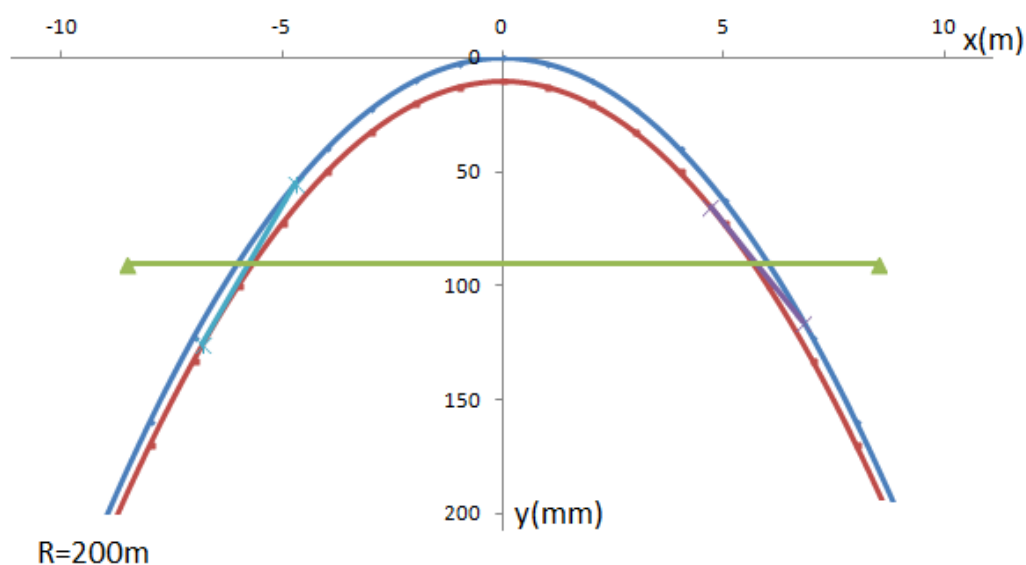
Σχήμα 3.10: Vogelplan οχημάτων Μετρό για R=250m

Ακολουθεί ο πίνακας με τα χαρακτηριστικά που απαιτούνται στην χάραξη του διαγράμματος Vogelγια ακτίνα 200m.

R= [m]	200
Απόσταση ίχνους = [mm]	1426
Εύρος γραμμής = [mm]	1435
Μεταξόνιο = [m]	2,1
Απόσταση ομφαλών = [m]	11,5
Επιθυμητή διαπλάτυση = [mm]	5
Εύρος + διαπλάτυση = [mm]	15

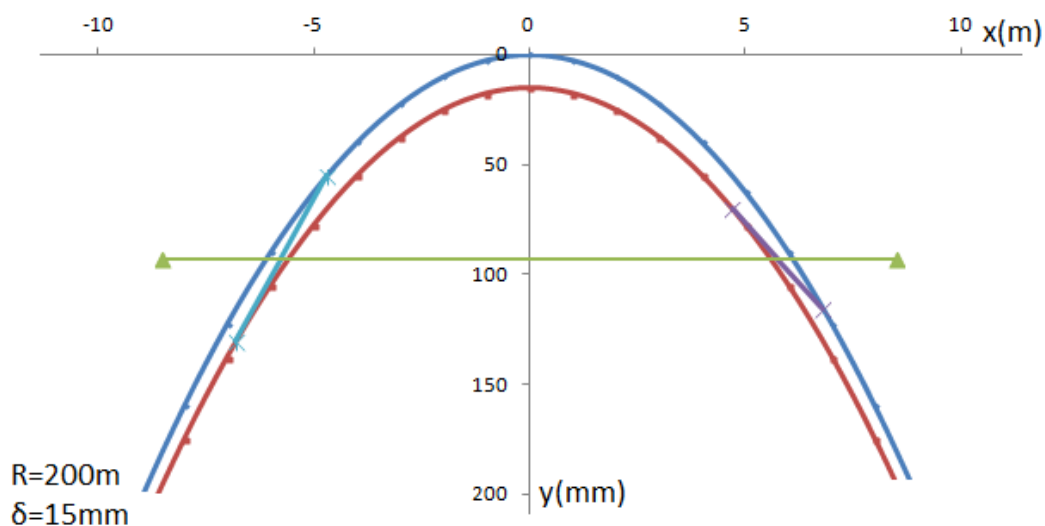
Πίνακας 3.5: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συρμού και γραμμής για ακτίνα καμπυλότητας 200 μέτρων

Ακτίνα καμπυλότητας 200 μέτρων



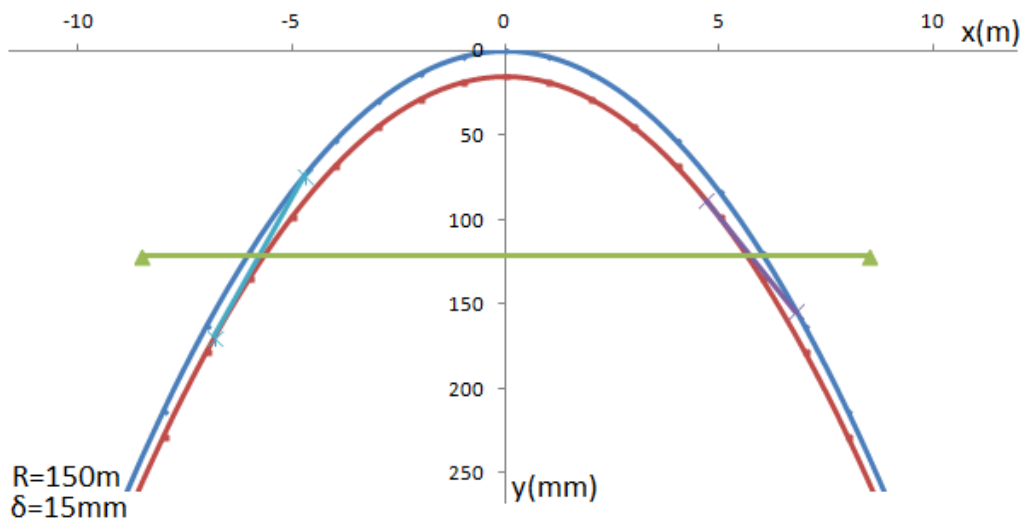
Σχήμα 3.11: Vogelplan οχημάτων Μετρό για R=200m σε σφηνοειδή θέση

Επειδή από τους υπολογισμούς όπως φαίνεται και από ο διάγραμμα προκύπτει σφηνοειδής θέση των φορέων η οποία δημιουργεί προβλήματα στην εγγραφή αλλά και μεγαλύτερες φθορές τόσο στην σιδηροτροχιά όσο και τους τροχούς γίνεται κατάλληλη διαπλάτυνση ώστε να επιτευχθεί ελεύθερη κύλιση.



Σχήμα 3.12: Vogelplan οχημάτων Μετρό για R=200m με διαπλάτυνση 5mm

Ακτίνα καμπυλότητας 150 μέτρων



Σχήμα 3.13: Vogelplan οχημάτων Μετρό για $R=150m$ με διαπλάτωση $5mm$

Είναι προφανές ότι για ακτίνα καμπυλότητας 150 μέτρων θα απαιτείται τουλάχιστον 5mm διαπλάτωση. Με την αλγεβρική επίλυση της διαπλάτωσης προκύπτει ότι η τιμή αυτή επαρκεί οπότε δεν χαράσσεται Vogel για μεγαλύτερη τιμή διαπλάτωσης.

Αν και τα διαγράμματα μοιάζουν πανομοιότυπα παρατηρείται αλλαγή της κλίμακας του άξονα y ώστε να διατηρείται η εποπτικότητα τους. Πιο συγκεκριμένα όσο μειώνεται η ακτίνα καμπυλότητας, τόσο μεγαλύτερη η απόκλιση του οχήματος από το κανάλι. Τα μεγέθη της εσωτερικής και εξωτερικής απόκλισης θα αναλυθούν στην συνέχεια για την μελέτη του περιτυπώματος.

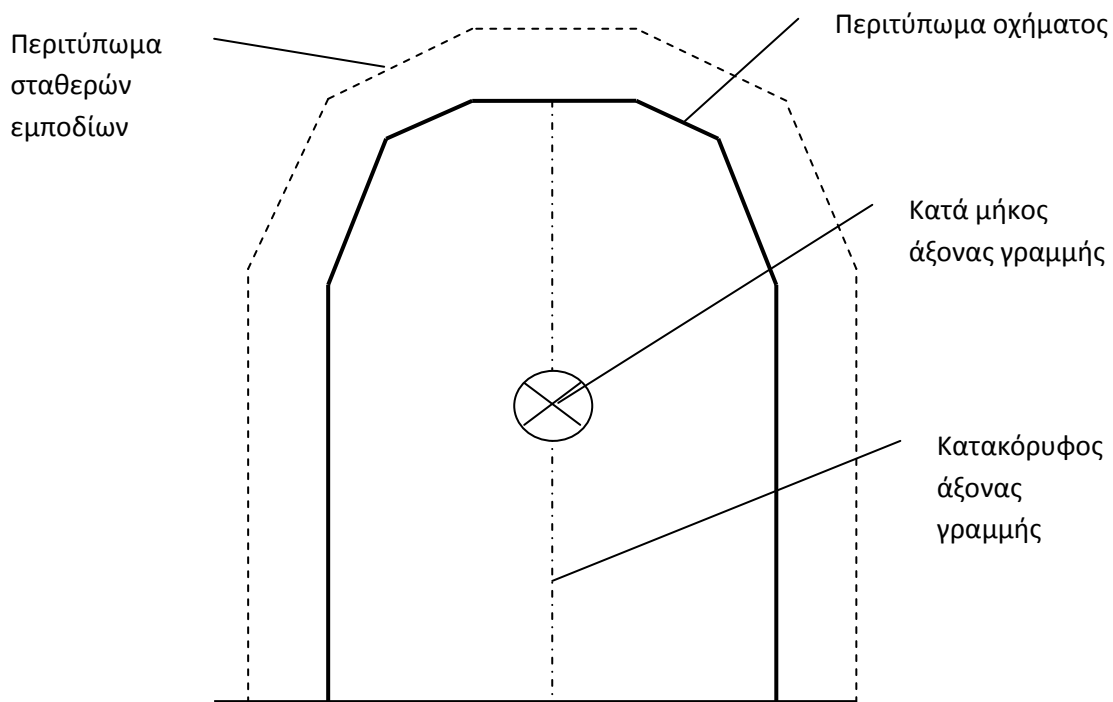
Το πρώτο διάγραμμά για ακτίνα 200 μέτρων αφορά σφηνοειδή θέση των φορείων όπως φαίνεται και από το γεγονός ότι οι άξονες των φορείων τέμνουν την εσωτερική σιδηροτροχιά. Η θέση αυτή προκαλεί φθορές και αποφεύγεται. Το πρόβλημα επιλύεται με εφαρμογή διαπλάτωσης 5 χιλιοστών, η οποία αποτελεί και την ελάχιστη δυνατή διαπλάτωση, τα φορεία εγγράφονται στην στροφή με ελεύθερη κύλιση όπως φαίνεται και από το τελευταίο διάγραμμα.

Κεφάλαιο 4^ο: Περιτύπωμα

4.1 Η έννοια του περιτυπώματος

Η σιδηροδρομική γραμμή διαμορφώνεται στη διατομή της από τον χώρο που καταλαμβάνουν τα οχήματα που κινούνται σε αυτήν αλλά και από τις εγκαταστάσεις που απαιτούνται για την λειτουργία της. Το όχημα περικλείεται από μια οριακή γραμμή η οποία ορίζει την διατομή του συρμού που είναι κάθετη στον άξονα της γραμμής αλλά και τον χώρο που καταλαμβάνει το όχημα. Γύρω από την οριακή αυτή γραμμή ορίζεται η ελεύθερη ζώνη, μέσα στην οποία δεν επιτρέπεται να τοποθετούνται κανενός είδους εγκαταστάσεις όπως για παράδειγμα σήματα χωρίς ειδική έγκριση.

Η οριακή γραμμή των οχημάτων ονομάζεται **περιτύπωμα του οχήματος** ενώ αυτή της ελεύθερης ζώνης καλείται **περιτύπωμα σταθερών εμποδίων**. Με την έννοια περιτύπωμα ορίζεται ο καθορισμός ενός χώρου κατά πλάτος και ύψος, του οποίου του περίγραμμα περιέχει το σύνολο των ακραίων θέσεων που είναι δυνατόν να καταλάβει ένα όχημα λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς του (κεκλιμένη θέση στην καμπύλη, ταλαντώσεις).



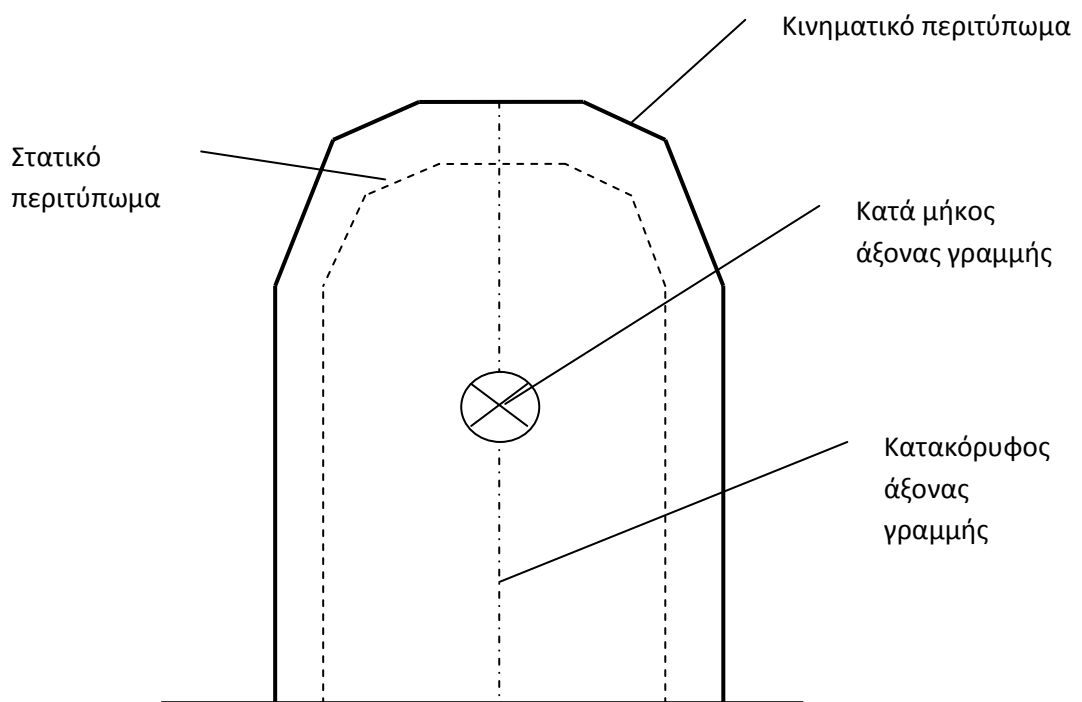
Σχήμα 4.1: Διατομή γραμμής με το περιτύπωμα οχήματος και το περιτύπωμα σταθερών εμποδίων

Για να οριστούν οι ελάχιστες διαστάσεις στον χώρο το όχημα μελετάται ως προς τις οριακές του διαστάσεις όταν βρίσκεται σε στάση, σε ευθυγραμμία, σε

οριζόντιο επίπεδο και με τον κατακόρυφο του άξονα να τέμνει κάθετα τον κατά μήκος άξονα της γραμμής. Το περίγραμμα του οχήματος που προκύπτει τηρώντας τις παραπάνω παραδοχές καλείται **στατικό περιτύπωμα**.

Ωστόσο, το όχημα εξαναγκάζεται σε εγκάρσιες και κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά την κίνηση του και την θέση του σε υψομετρική ή οριζοντιογραφική καμπύλη λόγω των επικλίσεων της γραμμής. Επιπλέον αποκτά κλίση ως προς την κατακόρυφο (στροφή περί τον πόλο) που οφείλεται τόσο στην ύπαρξη ανεπάρκειας ή πλεονάσματος υπερύψωσης όσο και στην πιθανή φθορά των αναρτήσεων. Η περιβάλλουσα νοητή γραμμή των περιγραμμάτων των θέσεων που έχει την δυνατότητα να πάρει ένα όχημα ονομάζεται **κινηματικό περιτύπωμα**. Το περιτύπωμα σταθερών εμποδίων περιβάλλει το δυναμικό σε μία σταθερή απόσταση που καθορίζεται από το είδος του οχήματος και τους εκάστοτε κανονισμούς.

Οι διαστάσεις του στατικού περιτυπώματος απορρέουν από τα γεωμετρικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τόσο του οχήματος, όσο και της γραμμής. Η γνώση του χώρου του κινηματικού περιτυπώματος παίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της διατομής της σήραγγας και ειδικότερα στα καμπύλα τμήματα (κυκλικές καμπύλες, καμπύλες συναρμογής), καθόσον στα συστήματα ΜΕΤΡΟ η διατομή της σήραγγας αποτελεί σημαντικό παράγοντα κόστους κατασκευής.



Σχήμα 4.2: Διατομή γραμμής με το στατικό και το κινηματικό περιτύπωμα

Το κινηματικό περιτύπωμα είναι κοινό για όλα τα οχήματα στο ανώτερο τμήμα του, δηλαδή σε απόσταση μεγαλύτερη των 400mm από την Άνω στάθμη Κεφαλής

Σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ) ενώ διαφοροποιείται μόνο στο χαμηλότερο τμήμα του ανάλογα με τον τύπο του οχήματος (κατώτερα 400mm).

Το περιτύπωμα μπορεί να υπολογισθεί σε κάθε διατομή κατά μήκος του οχήματος. Οι θέσεις, όμως, που χαρακτηρίζουν τις μέγιστες τιμές τόσο προς το εσωτερικό όσο και προς το εξωτερικό μιας καμπύλης είναι η μέση (Ei) και το μέτωπο (Ea) του οχήματος αντίστοιχα.

Η γραμμή αναφοράς (το ακριβές περιτύπωμα της διατομής) περιλαμβάνει τις ημιστατικές μετατοπίσεις που δημιουργούνται από τις παρακάτω συνθήκες:

- Την συμπεριφορά της ανάρτησης υπό την επίδραση του πλεονάσματος ή της ανεπάρκειας υπερύψωσης
- Τους περιορισμούς αποκλίσεων στην μέση (Ei) και στα άκρα του οχήματος (Ea) στην ευθυγραμμία και στην καμπύλη της γραμμής
- Την πιθανή ασυμμετρία του οχήματος

4.2 Υπολογισμός του κινηματικού περιτυπώματος

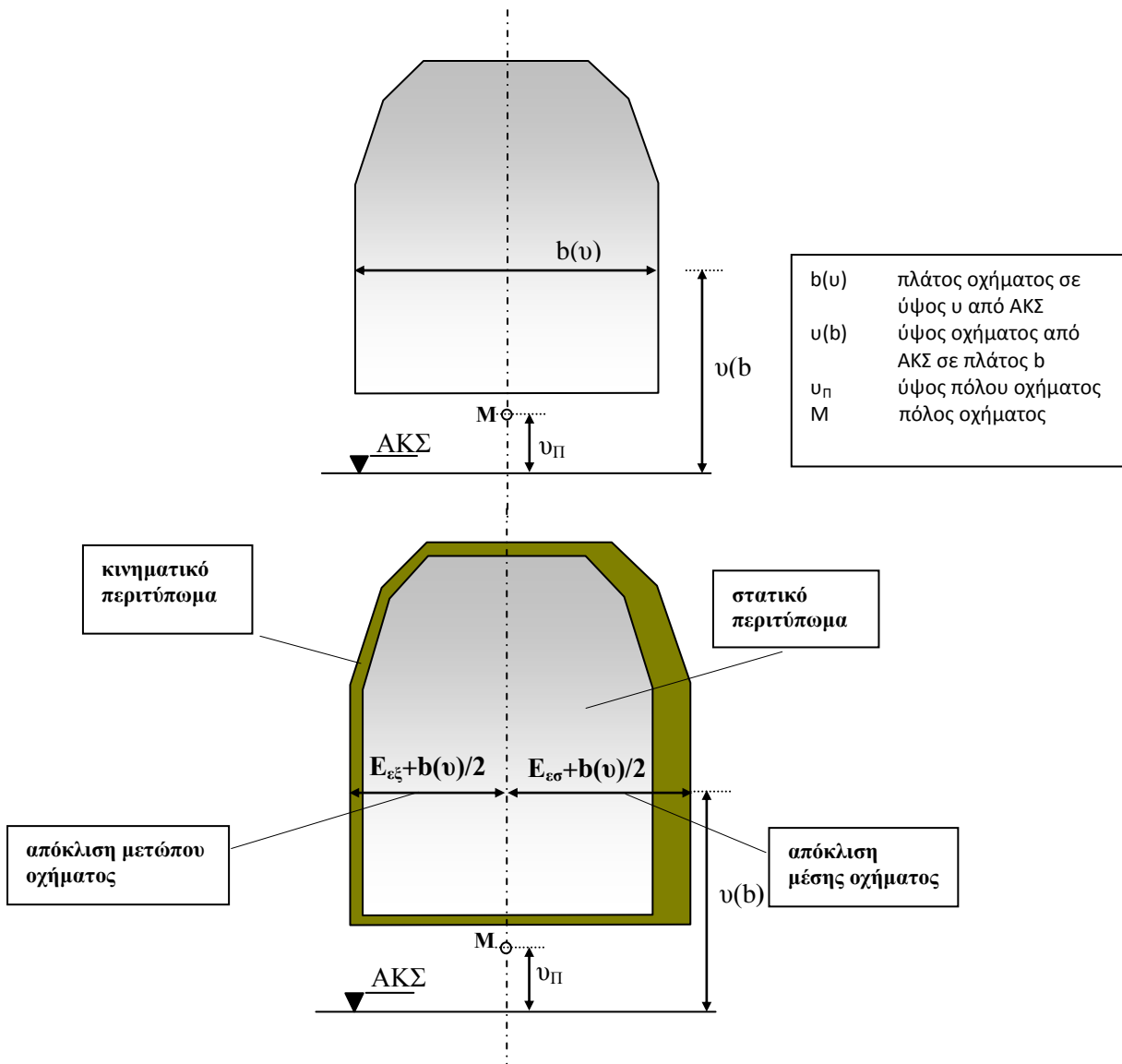
Για τον υπολογισμό του κινηματικού περιτυπώματος των οχημάτων του Μετρό, γίνονται οι εξής παραδοχές:

- τα οχήματα έχουν 2 φορεία με 2 άξονες το κάθε φορείο
- η παροχή ρεύματος γίνεται με 3η τροχιά.

Η αποτύπωση του περιτυπώματος περιλαμβάνει περισσότερα από ένα μεγέθη που υπεισέρχονται στον υπολογισμό. Έτσι, λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω:

- η γεωμετρική απόκλιση από τον άξονα της γραμμής
- η δυναμική απόκλιση από τον άξονα της γραμμής

Η μέθοδος υπολογισμού έκαστης απόκλισης παρουσιάζεται στην συνέχεια σύμφωνα με τους τύπους υπολογισμού του περιτυπώματος ενώ ακολουθεί η σύγκριση των αναλυτικών αποτελεσμάτων των αποκλίσεων με αυτές που προκύπτουν από τα διαγράμματα Vogel που έχουν ήδη χαραχθεί.



Σχήμα 4.3: Σχηματική σύγκριση στατικού και κινηματικού περιτυπώματος οχήματος

Γεωμετρική απόκλιση

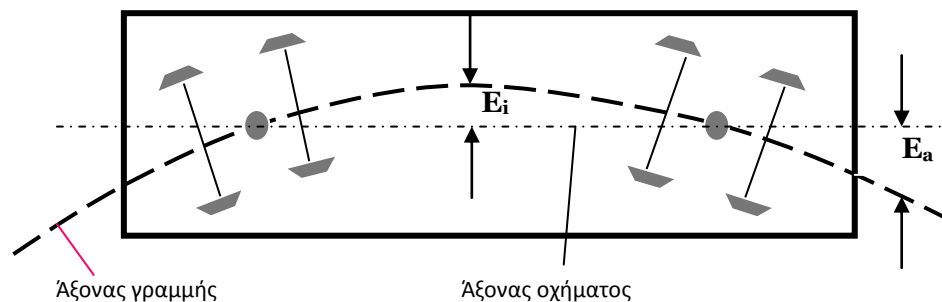
Για τον υπολογισμό της γεωμετρικής απόκλισης λαμβάνονται υπόψη τα εξής μεγέθη που αφορούν το όχημα:

- L_{ox} μήκος οχήματος από μέτωπο σε μέτωπο
- $u(b)$ ύψος οχήματος από ΑΚΣ (σε συνάρτηση με το πλάτος)
- $b(u)$ πλάτος οχήματος (σε συνάρτηση με το ύψος)
- α απόσταση μεταξύ των ομφαλών των φορέων
- ρ απόσταση αξόνων στο φορείο
- n απόσταση της υπόψη διατομής του οχήματος από τον πλησιέστερο ομφαλό φορείου

Και τα παρακάτω που αφορούν τα οριζοντιογραφικά (άμεσα και έμμεσα) χαρακτηριστικά της καμπύλης:

- d_{min} ελάχιστη απόσταση ίχνους
- e_{max} μέγιστο εύρος γραμμής
- R ακτίνα οριζοντιογραφικής καμπύλης
- β γωνία από υψομετρικό σφάλμα σιδηροτροχιών
- h υπερύψωση.

Οι γεωμετρικές αποκλίσεις E_i και E_a αφορούν την θέση που λαμβάνει ο άξονας οχήματος ως προς τον άξονα της γραμμής προς την εσωτερική και εξωτερική πλευρά μια οριζοντιογραφικής καμπύλης αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα, η εσωτερική απόκλιση E_i αφορά το κεντρικό τμήμα του οχήματος ενώ η εξωτερική E_a τον πρόβολο του οχήματος στο μπροστινό ή πίσω τμήμα του. Οι μέγιστη τιμή της εσωτερικής απόκλισης $max E_i$ παρουσιάζεται στη μέση του διαστήματος μεταξύ των οφθαλμών του οχήματος ενώ η μέγιστη εξωτερική E_a συναντάται στο μέτωπο του οχήματος.



Σχήμα 4.4: Σχηματική απεικόνιση οχήματος σε καμπύλη με τις γεωμετρικές αποκλίσεις E_i , E_a

Η γεωμετρική απόκλιση ορίζεται για τη θέση μεταξύ των φορείων (εσωτερική απόκλιση) με τον παρακάτω τύπο:

$$E_{i(n)} = \frac{an - n^2 + \frac{p^2}{4}}{2R}$$

Αντίστοιχα, για το μέτωπο του οχήματος (εξωτερική απόκλιση) η γεωμετρική απόκλιση δίνεται από τον τύπο:

$$E_a(n) = \frac{an + n^2 - \frac{p^2}{4}}{2R}$$

Δυναμική απόκλιση

Για τον υπολογισμό της δυναμικής απόκλισης λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω μεγέθη:

- q εγκάρσια ανοχή μεταξύ αξόνων και φορείου
- w πλευρική ταλάντωση αμαξώματος από άξονα γραμμής λόγω πρωτεύουσας και δευτερεύουσας ανάρτησης
- u_{Π} ύψος πόλου οχήματος από ΑΚΣ
- η γωνία στροφής αμαξώματος περί τον πόλο
- T κατακόρυφη ταλάντωση

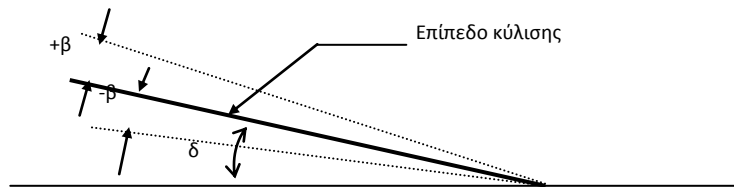
Η δυναμική απόκλιση εκφράζεται για την εσωτερική απόκλιση, δηλαδή την θέση μεταξύ των αξόνων με τον παρακάτω τύπο:

$$\left(\frac{1-d}{2} + q + w\right) + f(\eta)$$

Κατά αντιστοιχία, για την εξωτερική απόκλιση, στο μέτωπο του οχήματος χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

$$\left(\frac{1-d}{2} + q + w\right) * \frac{2n+a}{2} + f(\eta)$$

Προκύπτει ότι για άπειρη ακτίνα καμπυλότητας ($R = \infty$) οι τύποι της γεωμετρικής απόκλισης μηδενίζονται τόσο για την μέση, όσο και για το μέτωπο του οχήματος. Αυτό σημαίνει ότι στην ευθυγραμμία υφίστανται μόνο δυναμικές αποκλίσεις. Αντίθετα, στην καμπύλη που κατασκευάζεται υπερύψωση δημιουργείται επιπλέον μια γωνία δ μεταξύ του οριζόντιου άξονα και εκείνου που διέρχεται από τις δύο σιδηροτροχιές. Κατά συνέπεια, οι υπολογισμοί αναλύονται σε δύο μέρη. Αρχικά υπολογίζεται η οριζόντια απόκλιση των σημείων του στατικού περιτυπώματος και στην συνέχεια λαμβάνεται υπόψη και η οριζόντια και καθ' ύψος απόκλιση που προκύπτει από την περιστροφή του οχήματος ως προς τον κατά μήκος άξονα του. Η περιστροφή οφείλεται στην γωνία β στρεβλότητας της γραμμής, σε αυτήν που δημιουργείται από την υπερύψωση, γωνία δ , και την γωνία στροφής περί τον πόλο του οχήματος η . Ως πόλος του οχήματος ορίζεται το σημείο εκείνο το οποίο κατά την περιστροφή υφίσταται μόνο στροφή αλλά καμία μετακίνηση (κέντρο στροφής). Τελικά οι δυναμικές αποκλίσεις μεταβάλλουν τα σημεία οριζοντιογραφικά και υψομετρικά.



Σχήμα 4.5: Γωνίες στρεβλότητας β και υπερύψωσης δ του επιπέδου κύλισης στην καμπύλη

Συνολική απόκλιση

Οι συνολικές αποκλίσεις στα σημεία του οχήματος αποτελούν ουσιαστικά την επαλληλία της γεωμετρικής και δυναμικής σε κάθε θέση του οχήματος. Έτσι η συνολική απόκλιση της μέσης (εσωτερική) περιγράφεται τελικά από τον τύπο:

$$E_{\varepsilon\sigma(n)} = \frac{an - n^2 + \frac{p^2}{4}}{2R} + \left(\frac{l-d}{2} + q + w\right)$$

Από τα παραπάνω, προκύπτει ο υπολογισμός των συντεταγμένων των σημείων T' του κινηματικού περιτυπώματος στην μέση του οχήματος (δυσμενέστερη θέση: μέγιστη στροφή περί τον πόλο M δεξιά επιπλέον γωνία $\theta = \delta + \beta$) ως εξής:

$$T'_X = \overline{MT'} \cdot \cos \varphi + M_X$$

$$T'_Y = \overline{MT'} \cdot \sin \varphi + M_Y$$

$$Με: MT' = MT$$

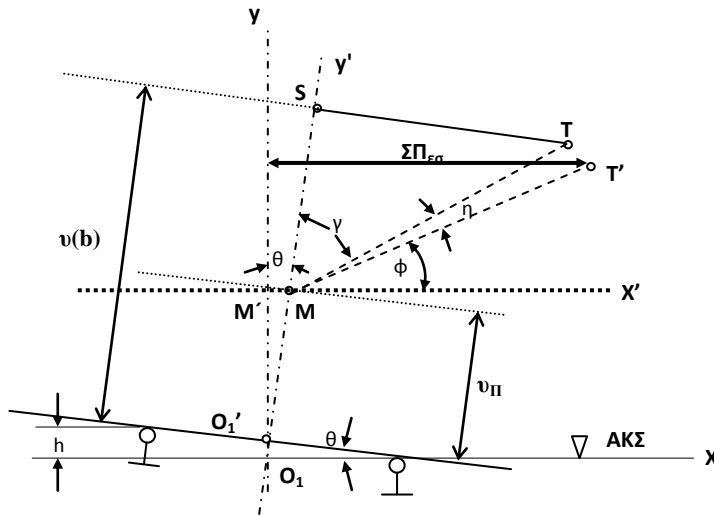
$$ST = b(u)/2 + E_{\varepsilon\sigma(n)}$$

$$MT = \sqrt{ST^2 + SM^2}$$

$$\varphi = f(\theta, \gamma, \eta)$$

$$SM = u(b) - u_{\pi}$$

Ο υπολογισμός έγινε για την δυσμενέστερη θέση σε δεξιά οριζοντιογραφική στροφή. Προφανώς προκύπτει συμμετρικό σχήμα με το παρακάτω ως προς τον κατακόρυφο άξονα για την δυσμενέστερη θέση σε αριστερή στροφή.



M_x	$= M'M = \eta\mu\theta \cdot u_{\Pi}$
$O_1'M'$	$= \sigma\eta\theta \cdot u_{\Pi}$
M_y	$= O_1'M' + h/2$

Σχήμα 4.6: Συνολική μετατόπιση εσωτερικού σημείου T για κίνηση συρμού σε δεξιά καμπύλη και δεξιά στροφή περί τον πόλο

Αντίστοιχα ο παρακάτω τύπος περιγράφει την συνολική απόκλιση του μετώπου του οχήματος.

$$E_{\varepsilon\xi}(n) = \frac{an + n^2 - \frac{p^2}{4}}{2R} + \left(\frac{1-d}{2} + q + w\right) \cdot \frac{2n+a}{2}$$

Για τα σημεία Φ' του εξωτερικού περιτυπώματος σε δεξιά καμπύλη (δυσμενέστερη θέση: μέγιστη στροφή περί τον πόλο M αριστερά επιπλέον γωνία $\xi = \beta - \beta$) οι παρακάτω τύποι περιγράφουν τις συντεταγμένες τους.

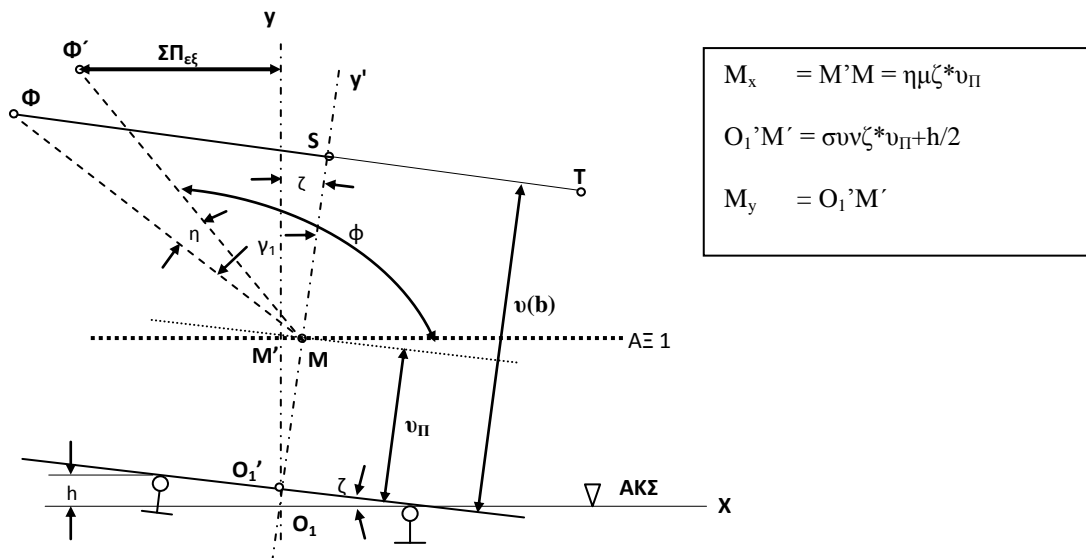
$$\Phi'_x = \overline{M\Phi'} \cdot \cos \varphi + M_x$$

$$\Phi'_y = \overline{M\Phi'} \cdot \sin \varphi + M_y$$

$$M\varepsilon: M\Phi' = M\Phi \quad ST = b(u)/2 + E_{\varepsilon\xi(n)}$$

$$M\Phi = \sqrt{S\Phi^2 + SM^2} \quad \phi = f(\theta, \gamma, \eta)$$

$$SM = u(b) - u_{\Pi}$$



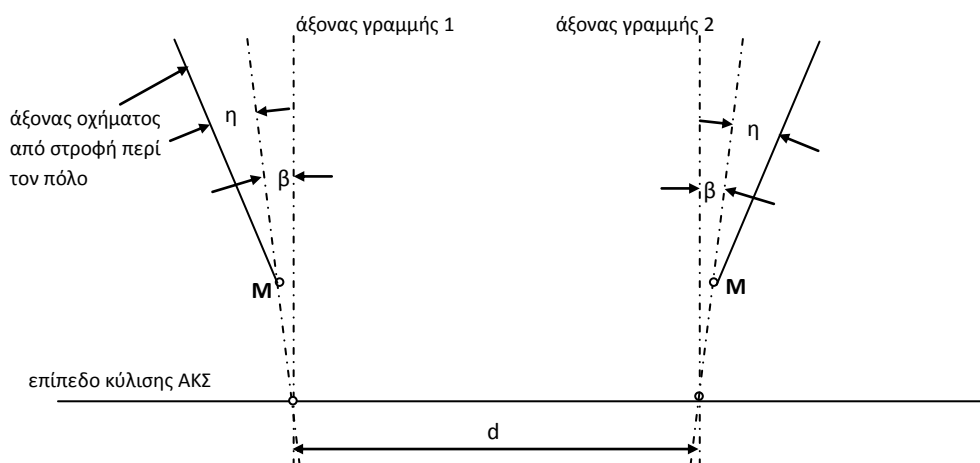
Σχήμα 4.7: Συνολική μετατόπιση εξωτερικού σημείου Φ για κίνηση συρμού σε δεξιά καμπύλη και αριστερή στροφή περί τον πόλο

Θέση των οχημάτων στην κίνηση τους στην σήραγγα

Λαμβάνοντας υπόψη μία διπλή γραμμή αστικού σιδηροδρόμου (METRO) με απόσταση μεταξύ των γραμμών d , προκύπτουν οι παρακάτω δυσμενέστερες θέσεις των μέγιστων περιτυπωμάτων.

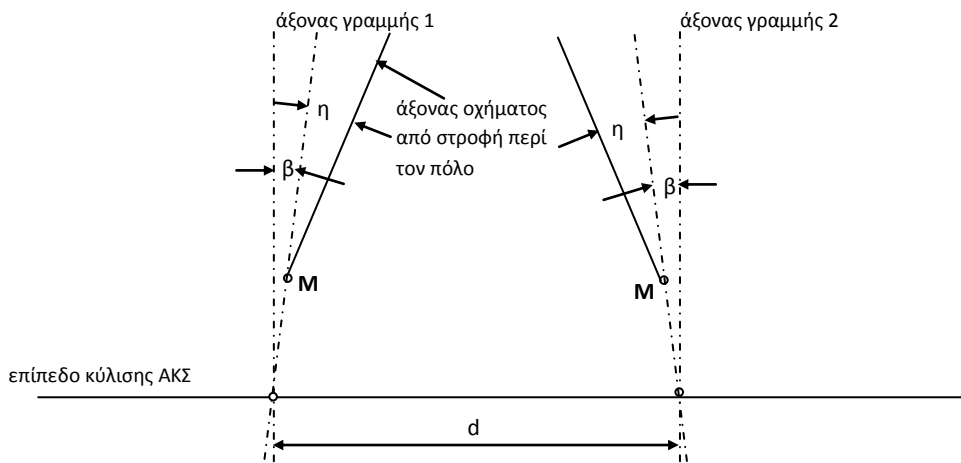
Στην ευθυγραμμία:

α) Για την απόσταση του εσωράχειου της σήραγγας, η δυσμενέστερη θέση των περιτυπωμάτων των δύο συρμών σε συνάντηση μεταξύ τους φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 4.8: Δυσμενέστερη θέση περιτυπωμάτων που καθορίζει την απόσταση στο εσωράχειο της σήραγγας

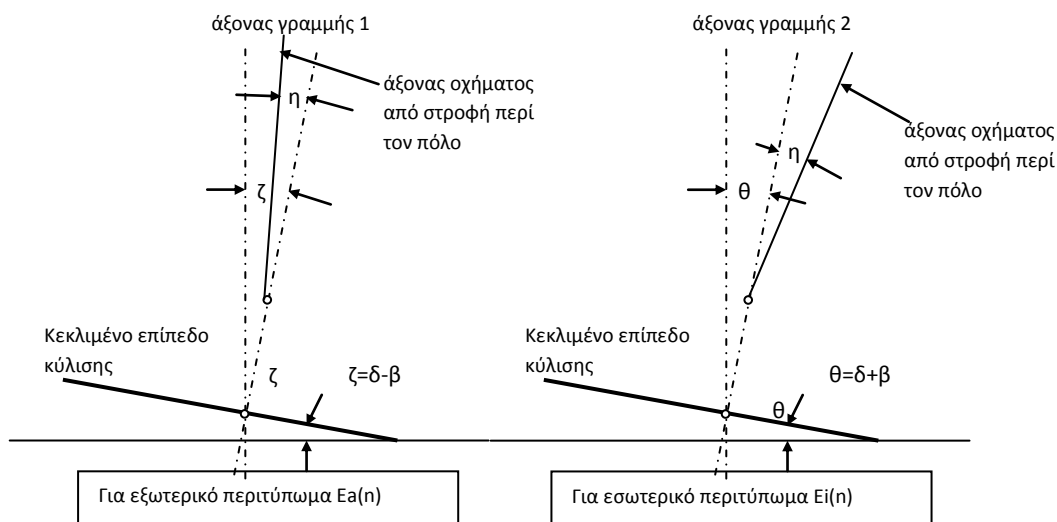
β) Για την απόσταση μεταξύ των αξόνων των γραμμών d , η δυσμενέστερη θέση των περιτυπωμάτων των δύο συρμών σε συνάντηση μεταξύ τους περιγράφεται:



Σχήμα 4.9: Δυσμενέστερη θέση περιτυπωμάτων που καθορίζει την απόσταση μεταξύ των γραμμών στην ευθυγραμμία

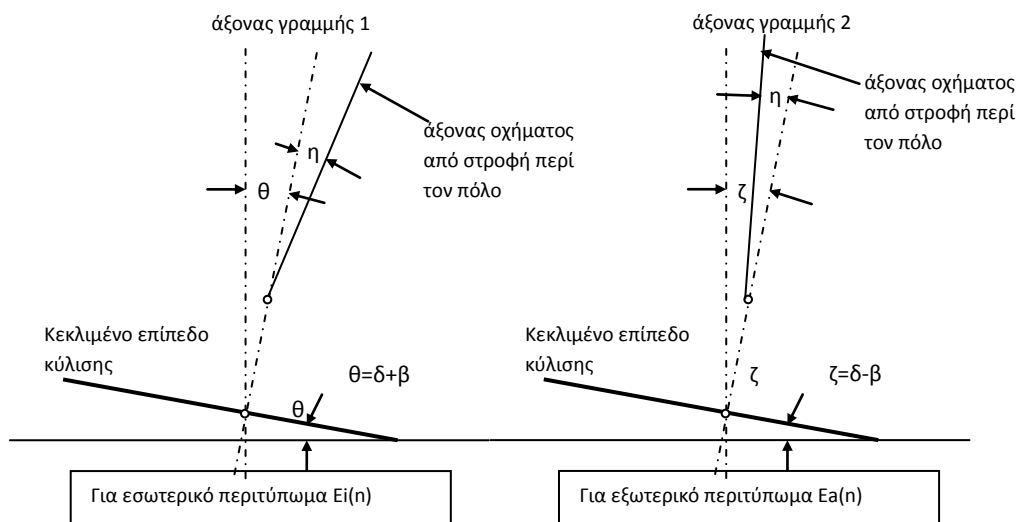
Στην καμπύλη:

α) Για την απόσταση του εσωράχειου της σήραγγας, η δυσμενέστερη θέση των περιτυπωμάτων των δύο συρμών σε συνάντηση μεταξύ τους φαίνεται στο επόμενο σχήμα (συρμός στη γραμμή 2 ακινητοποιημένος με μέγιστη $\delta+\beta+\eta$, ενώ συρμός στη γραμμή 1 με πλήρη ταχύτητα)



Σχήμα 4.10: Δυσμενέστερη θέση περιτυπωμάτων που καθορίζει την απόσταση στο εσωράχειο της σήραγγας στην καμπύλη

β) Για την απόσταση μεταξύ των αξόνων των γραμμών d , η δυσμενέστερη θέση των περιτυπωμάτων των δύο συρμών σε συνάντηση μεταξύ τους παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα, (συρμός στη γραμμή 1 ακινητοποιημένος με μέγιστη $\delta+\eta$, ενώ συρμός στη γραμμή 2 με πλήρη ταχύτητα).



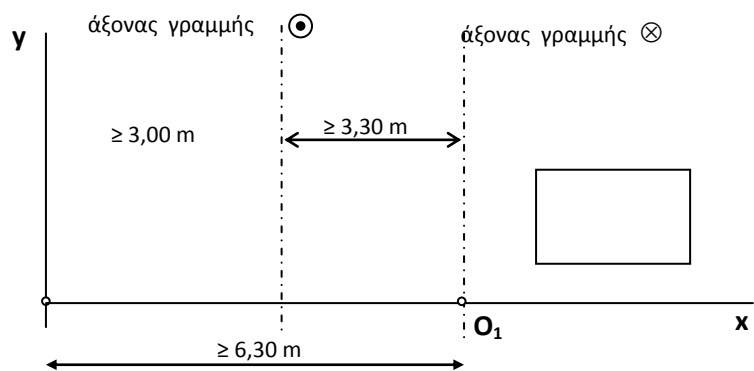
Σχήμα 4.11: Δυσμενέστερη θέση περιτυπωμάτων που καθορίζει την απόσταση μεταξύ των γραμμών στην καμπύλη

4.3 Υπολογισμός του κινηματικού περιτυπώματος με την χρήση του προγράμματος

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής γίνεται διερεύνηση της ελάχιστης δυνατής ακτίνας σήραγγας και της ελάχιστης απόστασης μεταξύ των αξόνων με βάση τους περιορισμούς του περιτυπώματος αλλά και των κανονιστικών διατάξεων διαλειτουργικότητας.

Κάθε σημείο του περιτυπώματος έχει συντεταγμένες σε ένα καρτεσιανό επίπεδο x, y οι οποίες υπολογίζονται με πολικές συντεταγμένες.

Επιλέγοντας ένα τέτοιο επίπεδο, τοποθετείται ο κατακόρυφος άξονας της ακραίας γραμμής σε μια εύλογη απόσταση από την αρχή O των αξόνων x, y (π.χ. $> 6,30$ m), ορίζοντας την τετμημένη του σημείου O_1 (ως τεταγμένη λαμβάνεται συμβατική τιμή) και στη συνέχεια με τις σχέσεις συνολικής απόκλισης, εσωτερικής και εσωτερικής, υπολογίζονται οι συντεταγμένες x και y οποιουδήποτε σημείου του περιτυπώματος.



Σχήμα 4.12: Θέση αξόνων γραμμών σε επίπεδο συντεταγμένων x, y

Ο σχεδιασμός του περιτυπώματος γίνεται αυτόματα στη σχεδιαστική εφαρμογή AutoCAD μετά την σύνδεση της με το πρόγραμμα υπολογισμού συντεταγμένων περιτυπώματος. Πιο αναλυτικά με την χρήση γλώσσας προγραμματισμού FORTRAN το συγκεκριμένο πρόγραμμα δέχεται ως είσοδο την υπερύψωση και την ακτίνα οριζοντιογραφικής καμπυλότητας του κάθε άξονα καθώς και την απόσταση μεταξύ των αξόνων και εξάγει αναλυτικά τις συντεταγμένες των σημείων που ορίζουν το περιτύπωμα σύμφωνα με τους τύπους συνολικής εξωτερικής και εσωτερικής απόκλισης καθώς και την δυσμενέστερη διατομή συνάντησης σχεδιασμένη στο AutoCAD.

Δεδομένα εισόδου

Απαραίτητη προεργασία είναι η επιλογή ακτινών καμπυλότητας. Όπως και στην μέθοδο Vogel επιλεχτήκαν οι ακτίνες από 200 ως 400 μέτρα με βήμα 50 μέτρων, για τις οποίες προκύπτει η μέγιστη κατασκευαστική υπερύψωση $h=160mm$ σύμφωνα με τον τύπο:

$$h = 11.8 \frac{V_{max}^2}{R} - 152p, \quad \text{με } p_{max} = 0.72m/s^2$$

Αντικαθιστώντας με τις αντίστοιχες τιμές προκύπτει για τις 200m και 250 $h > 160mm$ το οποίο σημαίνει ότι επιπλέον της μέγιστης υπερύψωσης που πρέπει να κατασκευαστεί υπάρχει και περιορισμός στην ταχύτητα κίνησης του συρμού. Επιλύοντας τον παραπάνω τύπο ως προς την V_{max} υπολογίζεται η μέγιστη ταχύτητα για τις πολύ μικρές ακτίνες. Στις ακτίνες μεταξύ 250 και 400 μέτρων η υπερύψωση συνεχίζει να κατασκευάζεται μέγιστη ώστε να μειωθεί η εγκάρσια επιτάχυνση p . Επιπλέον μελετάται και η ακτίνα 500m στην οποία η εγκάρσια επιτάχυνση έχει μηδενιστεί και απαιτείται υπερύψωση μικρότερη της μέγιστης. Αναλυτικά τα μεγέθη για κάθε ακτίνα που διερευνάται παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ακτίνα R(m)	Υπερύψωση h(mm)	Εγκάρσια επιτάχυνση ρ (m/s ²)	Μέγιστη ταχύτητα Vmax(km/h)
200	160	0.72	67
250	160	0.72	75
300	160	0.60	80
350	160	0.37	80
400	160	0.19	80
500	155	0	80

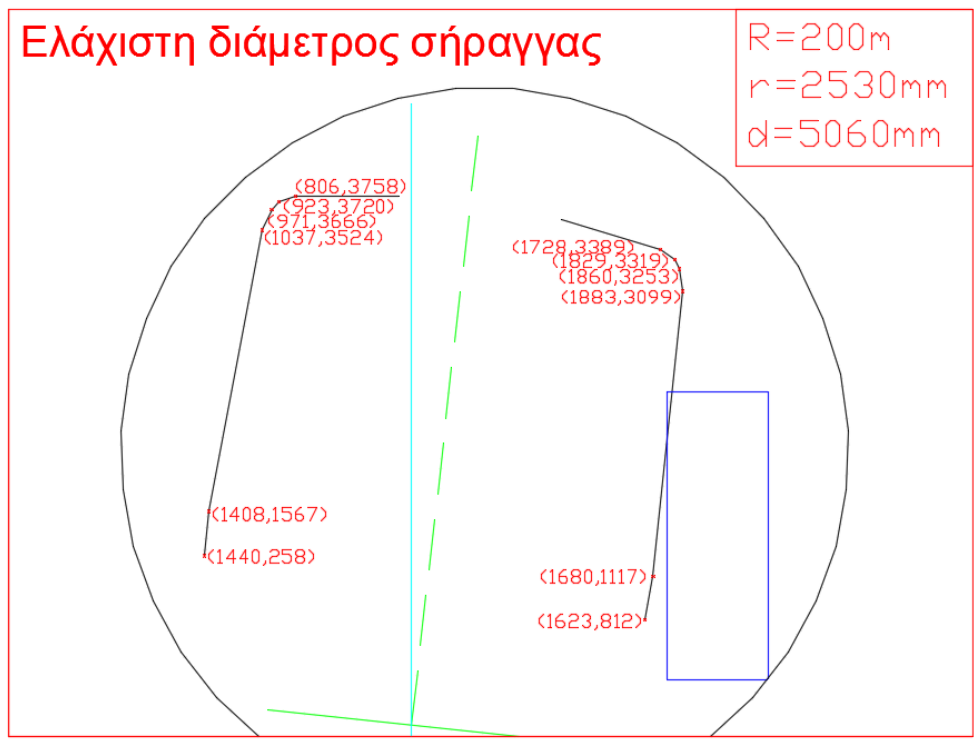
Πίνακας 4.1: Δεδομένα εισόδου προγράμματος υπολογισμού περιτύπωματος

4.4 Υπολογισμός του κινηματικού περιτύπωματος για σήραγγα ενός άξονα

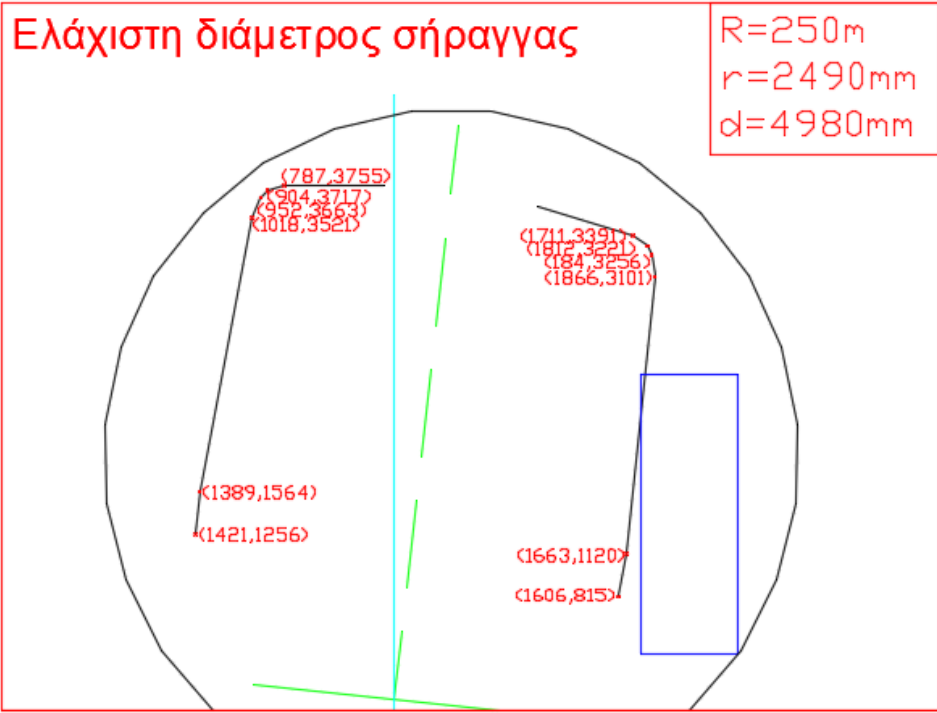
Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται αναλυτικά σε πίνακες στο Παράρτημα. Δίνονται οι πίνακες και τα αντίστοιχα σχέδια για κάθε ακτίνα καμπυλότητας που μελετήθηκε ξεχωριστά ώστε να προκύψει η ελάχιστη ακτίνα στο εσωράχιο της σήραγγας με βάση το κινηματικό περιτύπωμα ενός συρμού. Οι πίνακες περιλαμβάνουν τις συντεταγμένες όλων των σημείων που καθορίζουν την χάραξη του δυναμικού περιτύπωματος τόσο στο μέσο του οχήματος (Ei) όσο και στο μέτωπο του (Ea).

Οι υπολογισμοί γίνονται μόνο για δεξιές οριζοντιογραφικές στροφές για δεξιά και αριστερή στροφή περί τον πόλο του οχήματος, ενώ παραλείπονται οι αριστερές στροφές αφού το περιτύπωμα που προκύπτει είναι συμμετρικό ως προς τον κατακόρυφο άξονα. Από την σύγκριση των αποτελεσμάτων και των σχεδίων προκύπτει ότι η δυσμενέστερη περίπτωση είναι εκείνη των ομόρροπων στροφών οριζοντιογραφίας και περί τον πόλο.

Ιδιαίτερης σημασίας κρίνεται η ακτίνα που υπολογίζεται για την οριζοντιογραφική ακτίνα των 300m, καθώς αυτή αποτελεί την μέγιστη επιτρεπόμενη κανονιστική καμπυλότητα, ωστόσο μελετώνται και μικρότερες ακτίνες ώστε να προκύψουν διαστάσεις σήραγγας επαρκείς ανεξάρτητα της οριζοντιογραφίας. Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται μόνο το σχέδιο για ακτίνα 200m, καθώς αποτελεί εκείνο με την απαίτηση μέγιστων διαστάσεων. Η ακτίνα της σήραγγας υπολογίζεται ίση με 2530mm, ενώ περιορίζεται στα 2490mm για τις κανονιστικές ακτίνες καμπυλότητας (R= 250m).



Σχήμα 4.13: Διατομή κινηματικού περιτυπώματος στη δυσμενέστερη θέση για οριζοντιογραφική ακτίνα R=200m



Σχήμα 4.14: Διατομή κινηματικού περιτυπώματος στη δυσμενέστερη θέση για οριζοντιογραφική ακτίνα R=250m

4.5 Υπολογισμός του κινηματικού περιτυπώματος για σήραγγα δύο αξόνων

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών δίνονται αναλυτικά σε πίνακες στο Παράρτημα. Παρουσιάζονται σε πίνακες για κάθε ακτίνα καμπυλότητας που μελετήθηκε ξεχωριστά τα αποτελέσματα αρχικά για την περίπτωση που δίνει την δυσμενέστερη περίπτωση για την απόσταση των αξόνων (Δεξιά καμπύλη με δεξιά στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 1 και αριστερή στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 2) και στην συνέχεια εκείνοι από όπου προκύπτουν οι ελάχιστες διαστάσεις στο εσωράχιο της σήραγγας (Δεξιά καμπύλη με δεξιά στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 1 και αριστερή στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 2). Οι πίνακες περιλαμβάνουν τις συντεταγμένες όλων των σημείων που καθορίζουν την χάραξη του δυναμικού περιτυπώματος τόσο στο μέσο του οχήματος (Ei) όσο και στο μέτωπο του (Ea).

Αν και υπολογίστηκαν μέσω του προγράμματος και οι υπόλοιπες πιθανές θέσεις του αμαξώματος, δηλαδή οι ομόρροπες στροφές περί τον πόλο, αυτές δεν αναφέρονται στο Παράρτημα καθώς αποτελούνται από τον συνδυασμό των επιμέρους περιτυπωμάτων των περιπτώσεων που παρουσιάζονται και είναι καθοριστικές. Επιπλέον, δεν έγιναν δοκιμές για τις περιπτώσεις αριστερών στροφών, αφού τα σχέδια που αναμένεται να προκύψουν θα είναι συμμετρικά ως προς τον κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από την μέση της απόστασης των αξόνων με τα σχέδια που αφορούν τις δεξιές στροφές.

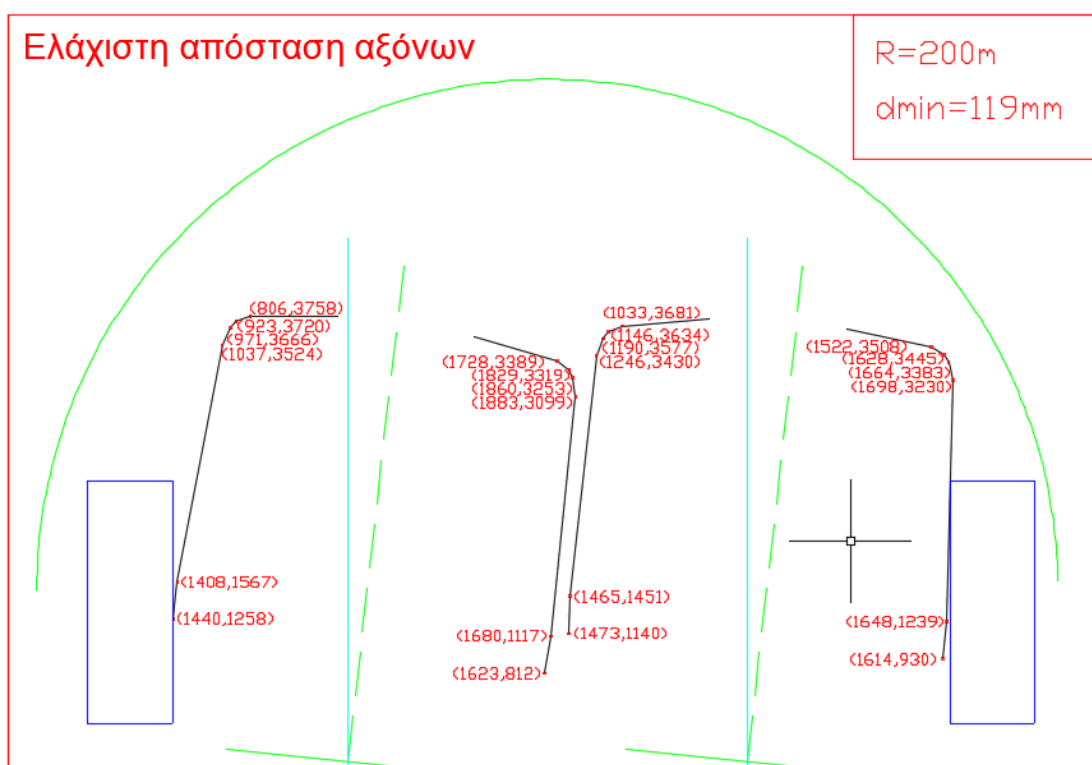
Στη συνέχεια, παρατίθενται τα σχέδια για όλες τις ακτίνες καμπυλότητας που μελετήθηκαν για κάθε μία από τις δύο καθοριστικές περιπτώσεις αξόνων. Η ελάχιστη δυνατή ακτίνα σήραγγας θα προκύψει ως η μέγιστη τιμή των ελάχιστων ακτινών που προκύπτουν από τους αντίστοιχους υπολογισμούς. Αντίστοιχα, διερευνάται η πιθανή μείωση της απόστασης των αξόνων των γραμμών η οποία έχει ληφθεί υπόψη ίση με 3.3 μέτρα, όπως δίνεται στους κανονισμούς.

Στο κεφάλαιο αυτό, όπως και στο προηγούμενο, παρατίθενται τα σχέδια της δυσμενέστερης διατομής για την ακτίνα της σήραγγας και εκείνη για την απόσταση των αξόνων. Το σύνολο των σχεδίων βρίσκεται όπως προαναφέρθηκε στο Παράρτημα.

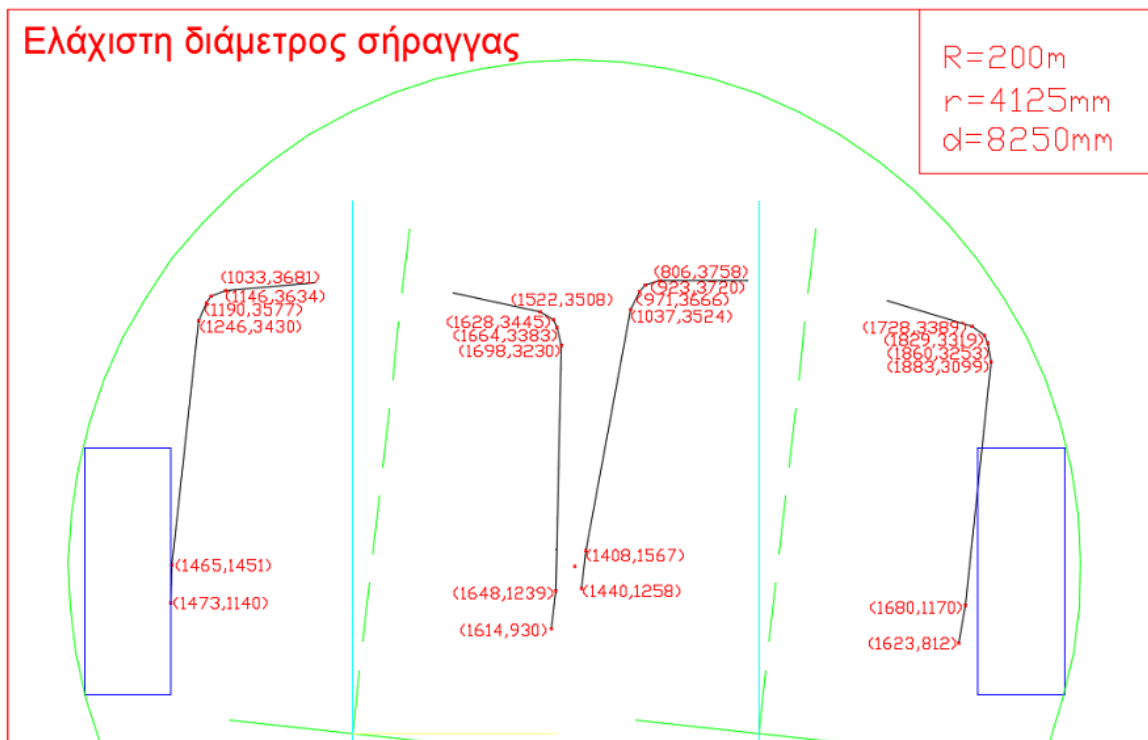
Αναφορικά με την απόσταση των αξόνων, ο κανονισμός ορίζει ελάχιστη απόσταση μεταξύ των συρμών σε κίνηση ίση με 700mm ώστε να υπάρχει επαρκής διάδρομος για επισκευές στην γραμμή ενώ αυτή είναι σε λειτουργία. Όπως, όμως φαίνεται από τα σχέδια η απόσταση που προκύπτει είναι αρκετά μικρότερη. Ωστόσο, είναι αποδεκτή αφού η προσομοίωση έχει γίνει για την περίπτωση σταματημένου του ενός συρμού από βλάβη στο δυσμενέστερο σημείο ενώ το άλλο

εισέρχεται στην καμπύλη με την μέγιστη ταχύτητα. Στην πραγματικότητα θα υπάρξει διακοπή κυκλοφορίας, ή ελάττωση της ταχύτητας κίνησης του διερχόμενου συρμού. Με βάση αυτή την παραδοχή αρκεί μια ελάχιστη απόσταση της τάξης των 100mm ώστε να εξασφαλίζεται η ανεμπόδιστη κυκλοφορία των συρμών.

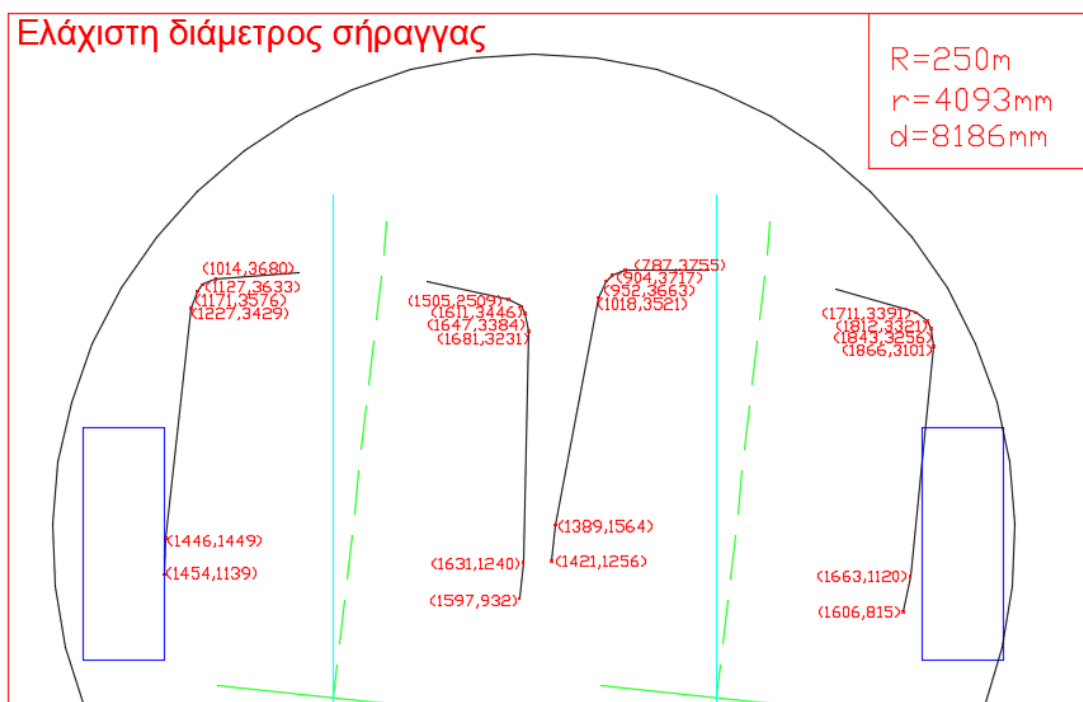
Όπως φαίνεται από τα παρακάτω σχέδια η τοποθέτηση των αξόνων σε απόσταση ίση με 3300mm επαρκεί σε κάθε περίπτωση ακόμα και για καμπυλότητες μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες. Επιπλέον, η ελάχιστη διάμετρος στο εσωράχαιο της σήραγγας που προκύπτει σύμφωνα με το κινηματικό περιτύπωμα ανεξάρτητα της οριζοντιογραφικής ακτίνας υπολογίζεται στα 8250mm ενώ λαμβάνοντας υπόψη την ελάχιστη ακτίνα οριζοντιογραφικής καμπυλότητας δηλαδή αυτή των 250 μέτρων ισούται με 4093mm όπως φαίνεται στα επόμενα σχήματα.



Σχήμα 4.15: Διατομή κινηματικών περιτυπωμάτων στη δυσμενέστερη θέση για την απόσταση των αξόνων για οριζοντιογραφική ακτίνα $R=200m$



Σχήμα 4.16: Διατομή κινηματικών περιτυπωμάτων στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για οριζοντιογραφική ακτίνα $R=200m$

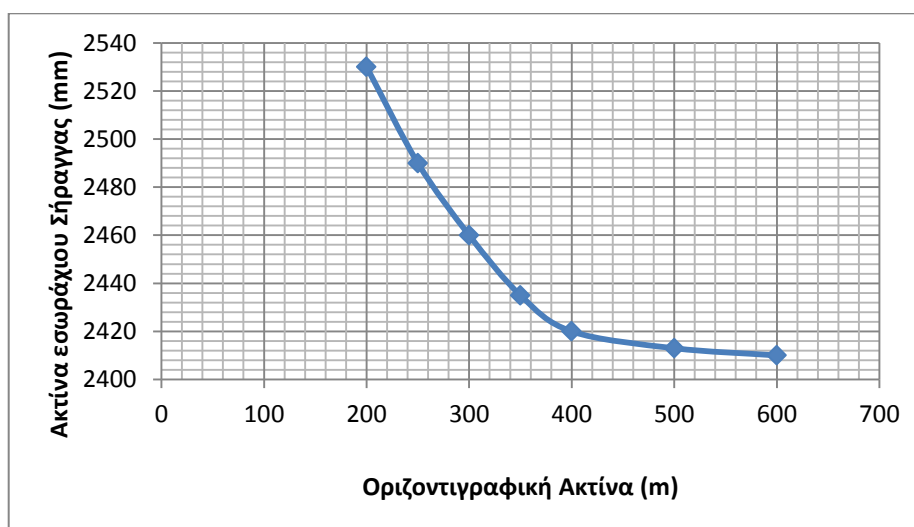


Σχήμα 4.17: Διατομή κινηματικών περιτυπωμάτων στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για οριζοντιογραφική ακτίνα $R=250m$

Στο παρακάτω πίνακα φαίνονται οι ελάχιστες ακτίνες που υπολογίζονται με βάση το δυναμικό περιτύπωμα. Όπως φαίνεται από τις τιμές οι ελάχιστη ακτίνα του εσωράχειου αυξάνεται όσο μικραίνει η ακτίνα με αυξανόμενο ρυθμό. Μπορεί να θεωρηθεί ότι για ακτίνες μεγαλύτερες των 400 μέτρων η διατομή της σήραγγας παραμένει σταθερή τόσο για την διπλή όσο και για μονή σήραγγα. Τα αναλυτικά αποτελέσματα των περιτυπωμάτων από όπου προέκυψαν οι πίνακες παρατίθενται στο Παράρτημα. Η γραφική συσχέτιση των ακτινών δίνεται στα παρακάτω διαγράμματα.

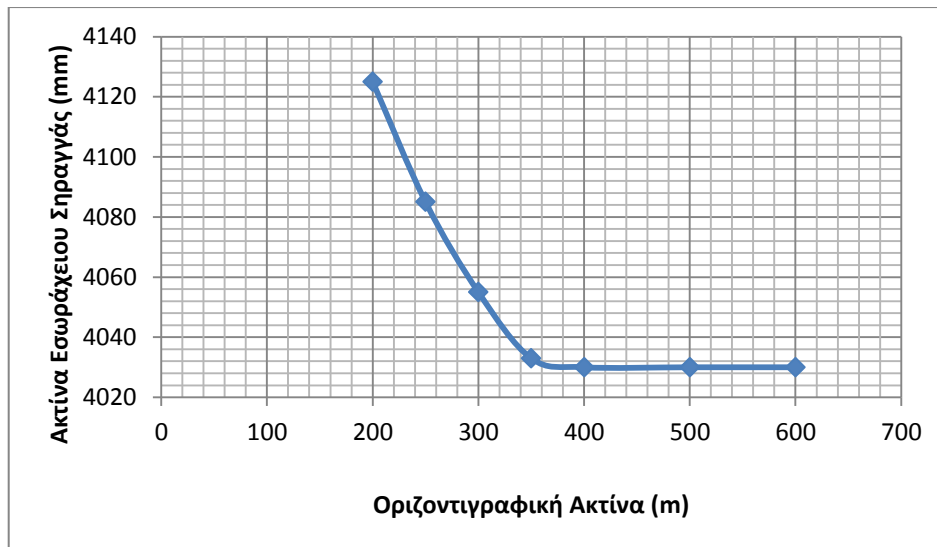
Οριζοντιογραφική Ακτίνα (m)	Ακτίνα Μονής Σήραγγας (mm)	Ακτίνα Διπλής Σήραγγας (mm)
200	2530	4125
250	2490	4085
300	2460	4055
350	2440	4030
400	2420	4030
500	2413	4030

Πίνακας 4.2: Ακτίνες ελάχιστης διατομής σήραγγας για διαφορετικές ακτίνες καμπυλότητας



Σχήμα 4.18: Συσχέτιση οριζοντιογραφικής ακτίνας με ελάχιστη ακτίνα διατομής μονής σήραγγας

Η σταθεροποίηση των τιμών της ακτίνας του εσωράχειου για την μονή σήραγγα φαίνεται από την ακτίνα 400m όπου η διαφοροποίηση της τιμής γίνεται αμελητέα. Από την άλλη για την διπλή η σταθεροποίηση ξεκινάει μέσα στα πλαίσια των μικρών ακτίνων, το οποίο δικαιολογείται από το γεγονός ότι η ακτίνα ορίζεται από τις δύο ανθρωποθυρίδες και έμμεσα από το περιτύπωμα του συρμού.



Σχήμα 4.19: Συσχέτιση οριζοντιογραφικής ακτίνας με ελάχιστη ακτίνα διατομής διπλής σήραγγας

4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων μεθόδου Vogel και γεωμετρικών αποκλίσεων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο με τους τύπους του περιτυπώματος είναι δυνατός ο υπολογισμός των αποκλίσεων στο μέτωπο και στο μέσο του συρμού τόσο γεωμετρικά όσο και δυναμικά. Οι γεωμετρικές αποκλίσεις αφορούν ουσιαστικά την απόσταση του άξονα του συρμού από τον άξονα της γράμμης σε κάθε θέση, ή οποία εξαρτάται καθαρά από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δικτύου και του συρμού. Συνεπώς, είναι δυνατή η σύγκριση των αποκλίσεων που προκύπτουν γραφικά μέσω της μεθόδου Vogel με τα αλγεβρικά αποτελέσματα των τύπων των γεωμετρικών αποκλίσεων για κάθε εξεταζόμενη ακτίνα.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται τα γραφικά και τα αναλυτικά αποτελέσματα που αφορούν την απόκλιση του άξονα καθώς και το σφάλμα θεωρώντας ορθή τιμή την αναλυτική.

R	Απόκλιση στο κέντρο (Ei) (mm)		
	Αναλυτικά	Γραφικά	Σφάλμα (%)
200	85.4125	83.5	2.239
250	68.33	67	1.946
300	56.941667	56	1.654
350	48.807143	48.2	1.244
400	42.70625	42.9	-0.454
500	34.165	34.2	-0.102

Πίνακας 4.3: Γεωμετρικές αποκλίσεις στο μέσο του οχήματος (Ei)

Απόκλιση στο άκρο (Ea) (mm)			
R	Αναλυτικά	Γραφικά	Σφάλμα (%)
200	95.2125	93.75	1.536
250	76.17	77.1	-1.221
300	63.475	64.2	-1.142
350	54.407143	55	-1.090
400	47.60625	47.8	-0.407
500	38.085	38	0.223

Πίνακας 4.4: Γεωμετρικές απόκλισεις στο μέτωπο (Ea)

Συμπερένεται ότι τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ταυτίζονται καθώς οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στις τιμές οφείλονται στην έλλειψη ακρίβειας των γραφικών μετρήσεων. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός ότι το σφάλμα των αποτελεσμάτων μειώνονται για τις μεγαλύτερες τιμές ακτίνας όπου τα διαγράμματα σχεδιάζονται σε μεγαλύτερη κλίμακα που επιτρέπει ακριβέστερες γραφικές μετρήσεις.

Συνεπώς, το δυναμικό περιτύπωμα είναι δυνατό να προκύψει και ως απαλληλία των αποκλίσεων που προκύπτουν από τα διαγράμματα Vogel και εκείνων από τους τύπους της δυναμικής απόκλισης. Ωστόσο, συστήνεται η χρήση των τύπων της γεωμετρικής απόκλιση για μεγαλύτερη ακρίβεια υπολογισμών ειδικότερα για τις θέσεις αυξημένης οριζοντιγραφικής καμπυλότητας.

Κεφάλαιο 5^ο: Δυνάμεις μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς

5.1 Γενικές αρχές μεθόδου ελαχίστου Heumann

Η γραμμή αποτελείται γεωμετρικά από ευθυγραμμίες και καμπύλες (παραβολικές και κυκλικές). Οι τροχοί κατά την κίνηση του παρουσιάζουν κύλιση και ταυτόχρονα ολίσθηση. Η αιτία αυτού του φαινομένου έγκειται στην κωνική μορφή της διατομής των τροχών, στην καμπυλότητα της επιφάνειας κύλισης της σιδηροτροχιάς και στην συνεχή πλαστικοελαστική παραμόρφωση τροχού και σιδηροτροχιάς στο σημείο επαφής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην οφιοειδή κίνηση του τροχού επί της σιδηροτροχιάς στην ευθυγραμμία και την καθοδήγηση του με τον τρόπο που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο στα καμπύλα τμήματα.

Επειδή κατά την κίνηση των οχημάτων στην καμπύλη, υφίσταται συνεχής πρόσπτωση του εξωτερικού ηγούμενου τροχού στην σιδηροτροχιά η ανάλυση των δυνάμεων για κίνηση οχήματος σε καμπύλη καλύπτει και την κίνηση σε ευθύγραμμα τμήματα. Συνεπώς, η εκτίμηση των δυνάμεων μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς θα γίνει με την μέθοδο του ελαχίστου του Heumann για την κίνηση σε καμπύλη καθώς αυτή αποτελεί την γενική περίπτωση.

Η μέθοδος βασίζεται σε κάποιες παραδοχές για την διευκόλυνση της κατανόησης της οι οποίες σταδιακά καταρρίπτονται με σκοπό την λεπτομερέστερη θεώρηση.

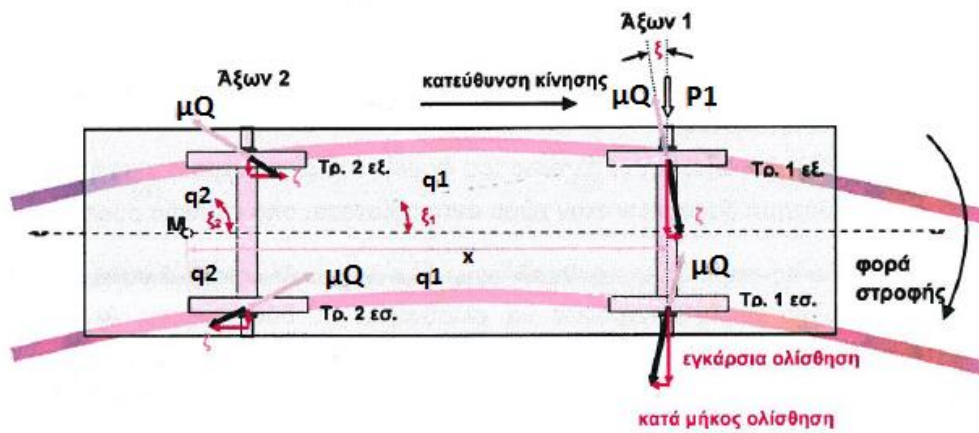
Έτσι αρχικά θεωρούνται τα εξής:

- επίσωτρα κυλινδρικής διατομής
- τροχολι χωρίς όνυχες
- οριζοντιογραφική κυκλική κάμπυλη
- ίδιο φορτίο Q σε όλους τους τροχούς
- ίδιος συντελεστής τριβής μ
- παράλληλοι άκαμπτοι άξονες στο πλαίσιο του φορείου

Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω παραδοχές είναι προφανές ότι το όχημα δεν έχει την δυνατότητα κίνησης σε καμπύλη χωρίς ολίσθηση. Οι δύο κινήσεις εξετάζονται ξεχωριστά. Θεωρείται, δηλαδή, ότι το όχημα κυλίζει μία ελάχιστη απόσταση, σταματάει και στη συνέχεια στρέφεται έντος του τόξου. Έτσι προκύπτει ένα σημείο M επί του άξονα του $x-x$ το οποίο αποτελεί το κέντρο στροφής, ή αλλιώς κέντρο στροφής άφου ως προς αυτό αναλύονται όλες οι δυνάμεις τριβής στους τροχούς.

Θεωρώντας έναν άξονα και το αντίστοιχο κέντρο τριβής M προκύπτει για στροφή περί το M ολίσθηση ζ στις θέσεις επαφής των τροχών με τις σιδηροτροχιές, η οποία είναι κάθετη στους αντίστοιχους βραχίονες q . Οι δυνάμεις τριβής μQ εμφανίζονται ως αντιστάσεις ολίσθησης στην ζ και έχουν αντίθετη κατεύθυνση. Η συνισταμένη όλων των μQ ονομάζεται S και τόσο το μέγεθος όσο και η θέση της καθορίζεται από την απόσταση του κέντρου τριβής M από τον πρώτο άξονα του φορείου.

Η κατά μήκος ολίσθηση έχει την ίδια τιμή και για τους δύο τροχούς αλλά αντίθετη κατεύθυνση. Ο εξωτερικός τροχός δεν διανύει επαρκή απόσταση σε σχέση με τον εσωτερικό και πρέπει να καλύψει την διαφορά με ολίσθηση. Έτσι στην εξωτερική σιδηροτροχιά έχει κατεύθυνση προς την φορά κίνησης του οχήματος ενώ στην εσωτερική αντίθετη.

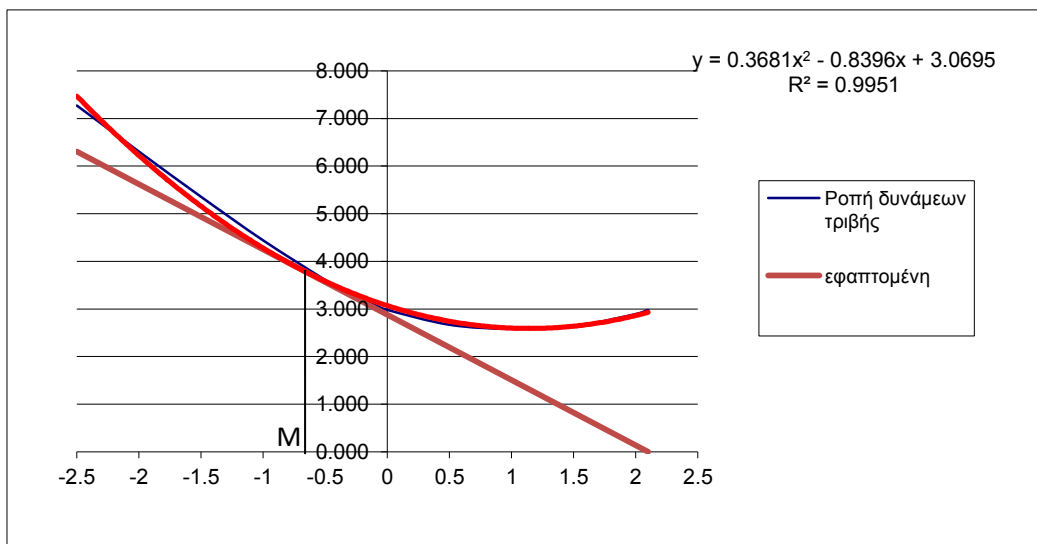


Σχήμα 5.1: Ολισθήσεις και δυνάμεις μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς κατά την κίνηση στροφής του οχήματος στην καμπύλη

5.2 Υπολογισμός θέσης τριβής και δυνάμεων καθοδήγησης

Ο καθορισμός των θέσεων ισορροπίας σε ένα όχημα γίνεται με βάση την παραδοχή ότι το κέντρο τριβής βρίσκεται πριν το δεύτερο άξονα του φορείου. Με την γεωμετρική επίλυση του παραπάνω σχήματος αποδεικνύεται ότι η πλευρική δύναμη P1 λαμβάνει διαφορετικές τιμές για διαφορετικές τιμές του x. Σύμφωνα με την συνθήκη του Heumann **το όχημα παίρνει τέτοια θέση στην καμπύλη ώστε να ελαχιστοποιείται η P1**. Συνεπώς η θέση του κέντρου τριβής και η απόσταση του από τον πρώτο τροχοφόρο άξονα είναι συγκεκριμένη.

Από την γεωμετρική επίλυση προκύπτει επιπλέον ότι το άθροισμα των ροπών των δυνάμεων τριβής στους τροχούς είναι διαφορετικό για κάθε θέση του κέντρου τριβής M. Συνεπώς ορίζεται η εφαπτομένη στην γραμμή ροπών των δυνάμεων τριβής που διέρχεται από τον μπροστινό τροχοφόρο άξονα. Το σημείο που η ευθεία εφάπτεται με την γραμμή ροπών αποτελεί το κέντρο τριβής.



Σχήμα 5.2: Μέθοδος ελαχίστου Heumann για όχημα με δύο φορεία

Όπως φαίνεται από τον πίνακα η γραμμή της ροπής δυνάμεων τριβής προσεγγίζεται με ποσοστό συσχέτισης 99,51% από την εξίσωση $y = 0.361x^2 - 0.8396x + 3.0695$. Η εφαπτομένη περιγράφεται από την εξίσωση $y = -1.3705x + 2.8705$ και το σημείο τριβής βρίσκεται σε απόσταση $x = -0.7211m$ από τον δεύτερο άξονα ή 2.8211m από το μπροστινό.

Οι κατευθυντήριες δυνάμεις δίνονται από τους τύπους:

$$P_1 = 2 \times \mu \times Q \times AB/2.1 = 47.6 \text{ kN}$$

$$P_2 = -2 \times \mu \times Q \times \Gamma\Delta/2.1 = 0 \text{ kN}$$

Με AB & ΓΔ τις αποστάσεις γ των σημείων της επαπτομένης στις θέσεις των τροχών.

Στους τροχούς των οποίων ο όνυχας προσπίπτει στη σιδηροτροχία, δρα η δύναμη κατεύθυνσης P και στην αντίθετη κατεύθυνση η δύναμη τριβής $\mu Q \cos \xi$. Έτσι, οι συνολικές δυνάμεις καθοδήγησης υπολογίζονται με βάση των τύπο:

$$Y = P - \mu \times Q \times \cos \xi$$

Τελικά, προκύπτουν οι παρακάτω δυνάμεις για κάθε τροχό:

$$Y_{11} = P_1 - \mu Q \cos \xi_1 = 28.5 \text{ kN}$$

$$Y_{12} = -\mu Q \cos \xi_1 = -19 \text{ k}$$

$$Y_{21} = \mu Q \cos \xi_2 = -9.4 \text{ kN}$$

$$Y_{22} = -P_2 + \mu Q \cos \xi_1 = -9.4 \text{ kN}$$

Οι δυνάμεις που προκύπτουν είναι ανεξάρτητες της ακτίνας οριζοντιογραφικής καμπυλότητας με την προϋπόθεση ότι η θέση των αξόνων στην καμπύλη είναι ελεύθερη κύλιση.

Κεφάλαιο 6^ο: Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της διερεύνησης, όπως αυτά προκύπτουν από διαγράμματα και υπολογισμούς που διενεργήθηκαν είναι τα εξής:

1. Για ακτίνες στο όριο της σφηνοειδούς και της ελεύθερης κύλισης για τα φορεία, σε σημεία επιτάχυνσης τα προπορευόμενα οχήματα κινούνται σε σφηνοειδή θέση ενώ τα τελευταία σε ελεύθερη κύλιση.
2. Αντεξάρτητα της ακτίνας η απόσταση που απαιτείται από τον σταθμό ώστε κινηθεί το όχημα σε κανονική θέση αποφεύγοντας τις υπερβολικές φθορές αντιστοιχεί σε 100 περίπου μέτρα.
3. Η ελάχιστη απαιτούμενη διάμετρος σήραγγας που προκύπτει από το περιτύπωμα μειώνεται με την αύξηση της ακτίνας με μειούμενο ρυθμό μέχρι την ακτίνα των 350 μετρων για μονή σήραγγα και μέχρι 400 για διπλή σήραγγα.
4. Τα οχήματα που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο αστικών σιδηροδρόμων διαθέτουν μικρότερο μεταξόνιο από τα υπεραστικά για να είναι δυνατή η εγγραφή του σε μικρότερες οριζοντιογραφικές ακτίνες.
5. Για θέση των φορείων σε ελεύθερη κύλιση οι κατευθυντήριες δυνάμεις και εκείνες καθοδήγησης που προκύπτουν είναι ανεξάρτητες της ακτίνας οριζοντιογραφικής καμπυλότητας με την προϋπόθεση ότι η θέση των αξόνων στην καμπύλη είναι ελεύθερη κύλιση.

Κεφάλαιο 7^ο: Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε διερεύνηση της εγγραφής οχημάτων σε θέσεις μεγάλης οριζοντιογραφικής καμπυλότητας για τα οχήματα αστικών σιδηροδρόμων. Επιπλέον, μελετήθηκε το περιτύπωμα και οι δυνάμεις καθοδήγησης για τα ίδια οχήματα.

Σε επόμενες εργασίες προτίνεται:

- Η διερεύνηση των μέγιστων κατευθυντήριων δυνάμεων και δυνάμεων καθοδήγησης με την μέθοδο ελαχίστου Heuman, συμπεριλαμβανόμενης της δυναμικής των οχημάτων ανάλογα με την ταχύτητα.
- Η μέτρηση στην πράξη (insite) της γωνίας πρόσπτωσης του όνυχα στη σιδηροτροχιά και η συσχέτιση της με το συντελεστή τριβής.
- Η διερεύνηση της πραγματοποιούμενης υπερύψωσης σε περιοχές επιτάχυνσης- επιβράδυνσης.

Βιβλιογραφία

- 1) Λυμπέρης Κ. (2009). Σιδηροδρομική θεωρία και εφαρμογές.
- 2) Αμπακούμκιν Κ. και Λυμπέρης Κ. (2001). Ειδικά θέματα Σιδηροδρομικής.
- 3) Eisenbahnwesen - Παραδόσεις πολυτεχνείου TUGraz (2006)
- 4) Πυργίδης Χ. (2006). Συστήματα Σιδηροδρομικών Μεταφορών.

Ιστοσελίδες

- 1) www.stasy.gr
- 2) www.ametro.gr
- 3) portal.survey.ntua.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**(Πίνακες συντεταγμένων σημείων και σχέδια
περιτυπωμάτων)**

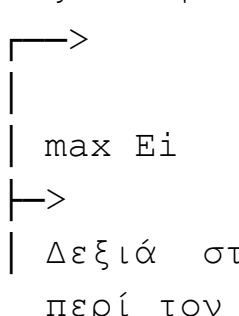
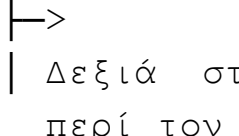
ΣΗΡΑΓΓΑ 1 ΑΞΟΝΑ

Ακτίνα καμπυλότητας R=200m

1. Δεξιά καμπύλη με δεξιά στροφή περί τον πόλο

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

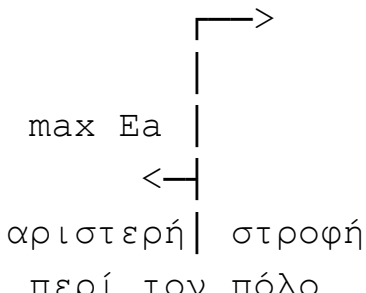
ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 200

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
max Ei			Η τιμή max Ei		
			αναφέρεται		
Δεξιά στροφή περί τον πόλο			στη μέση του οχήματος		
ΤΙΜΗ max Ei ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ Ea ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ θέση
1623.2	930	812.7	1440.2	930	1258.9
1680.7	1240	1117.6	1408.4	1240	1567.6
1883.5	3230	3099.0	1037.4	3230	3524.5
1860.6	3380	3253.9	971.2	3380	3666.5
1829.6	3440	3319.1	923.0	3440	3720.1
1728.7	3495	3389.4	806.2	3495	3758.7
1041.3	3600	3595.6	88.5	3600	3760.2

2. Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο

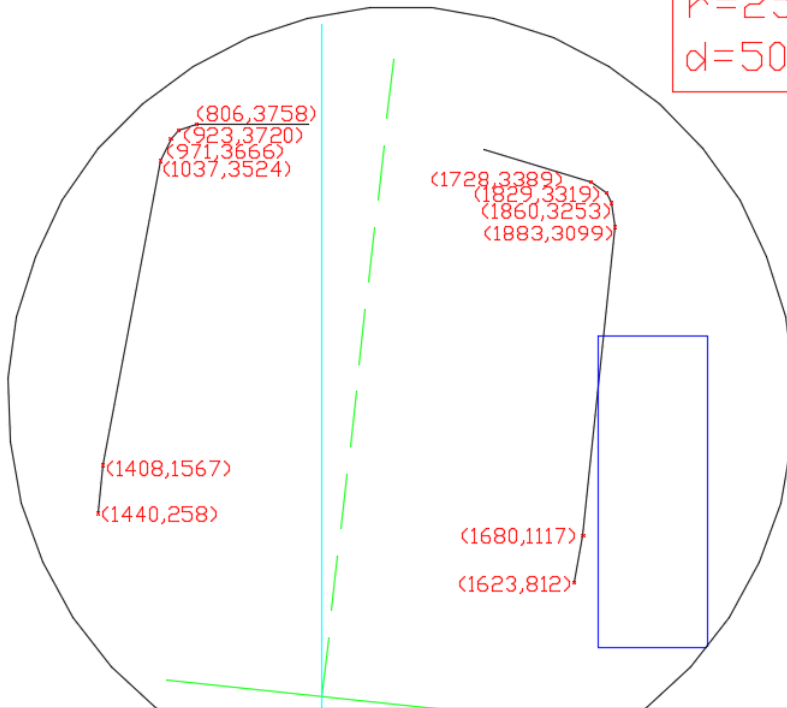
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 200

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxE _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1614.7	930	930.9	1473.8	930	1140.9
1648.7	1240	1239.4	1465.8	1240	1451.1
1698.9	3230	3230.5	1246.0	3230	3430.7
1664.2	3380	3383.2	1191.0	3380	3577.3
1628.3	3440	3445.8	1147.0	3440	3634.5
1522.3	3495	3508.1	1033.5	3495	3681.9
821.1	3600	3661.1	318.0	3600	3738.5

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

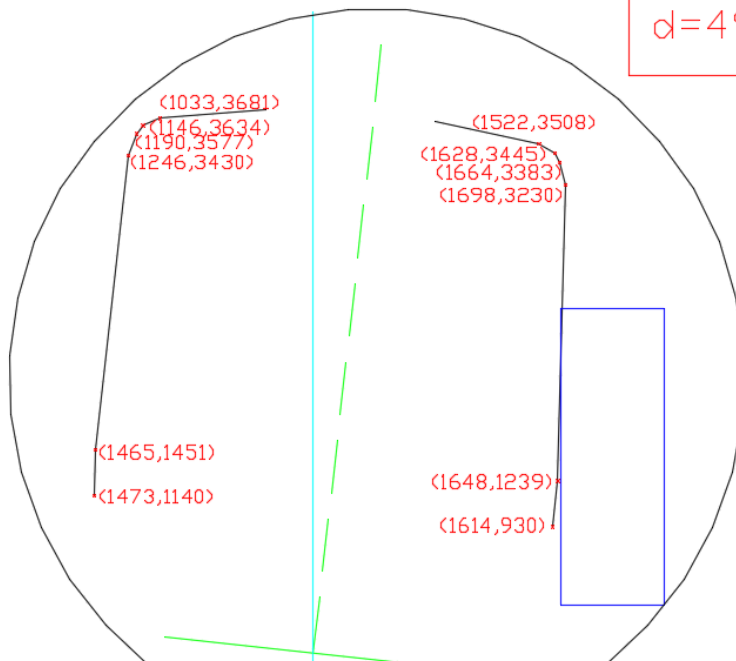
$R=200m$
 $r=2530mm$
 $d=5060mm$



Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με δεξιά στροφή περί τον πόλο

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

$R=200m$
 $r=2480mm$
 $d=4960mm$



Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με αριστερή στροφή περί τον πόλο

Ακτίνα καμπυλότητας R=250m

1. Δεξιά καμπύλη με δεξιά στροφή περί τον πόλο

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

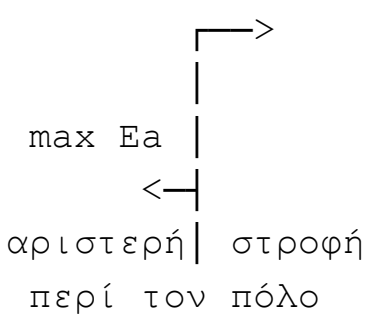
ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 250

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ei αναφέρεται στη μέση του οχήματος		
ΤΙΜΗ max Ei ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ Ea ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1606.3	930	815.1	1421.4	930	1256.2
1663.8	1240	1120.0	1389.5	1240	1564.8
1866.6	3230	3101.5	1018.6	3230	3521.8
1843.7	3380	3256.4	952.4	3380	3663.7
1812.7	3440	3321.5	904.2	3440	3717.3
1711.8	3495	3391.8	787.4	3495	3755.9
1024.4	3600	3598.1	69.7	3600	3757.5

2.Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο

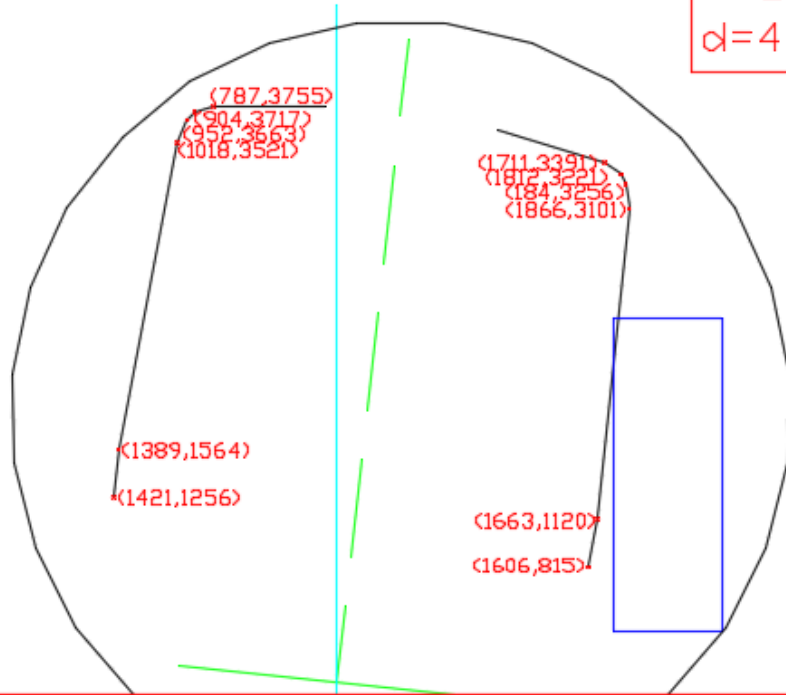
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 250

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxEa ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1597.7	930	932.1	1454.8	930	1139.6
1631.7	1240	1240.5	1446.8	1240	1449.8
1681.8	3230	3231.7	1227.0	3230	3429.4
1647.1	3380	3384.4	1172.0	3380	3576.0
1611.3	3440	3447.0	1128.0	3440	3633.2
1505.3	3495	3509.3	1014.5	3495	3680.6
804.0	3600	3662.2	299.0	3600	3737.2

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

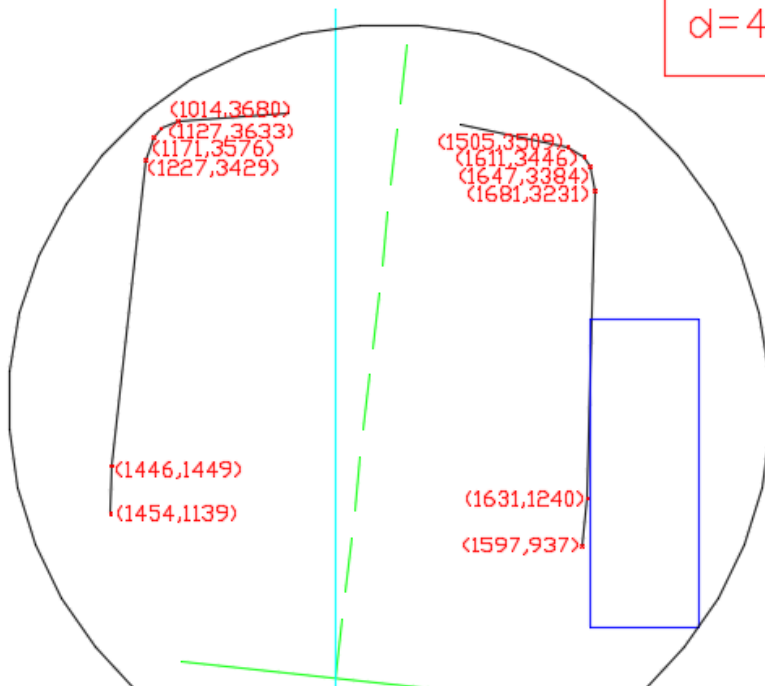
$R=250\text{m}$
 $r=2490\text{mm}$
 $d=4980\text{mm}$



Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με δεξιά στροφή περί τον πόλο

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

$R=250\text{m}$
 $r=2467\text{mm}$
 $d=4934\text{mm}$





Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με αριστερή στροφή περί τον πόλο

Ακτίνα καμπυλότητας R=300m

1. Δεξιά καμπύλη με δεξιά στροφή περί τον πόλο

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

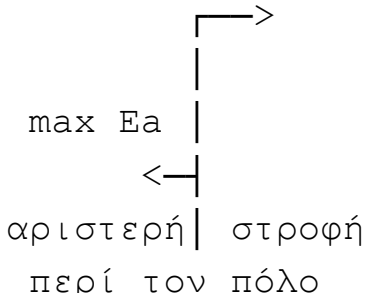
ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 300

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
max E _i			Η τιμή max E _i		
			αναφέρεται		
Δεξιά στροφή			στη μέση του οχήματος		
περί τον πόλο					
ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1595.0	930	816.8	1408.8	930	1254.4
1652.5	1240	1121.7	1377.0	1240	1563.0
1855.3	3230	3103.1	1006.0	3230	3520.0
1832.4	3380	3258.0	939.8	3380	3661.9
1801.5	3440	3323.2	891.6	3440	3715.5
1700.5	3495	3393.5	774.8	3495	3754.1
1013.1	3600	3599.7	57.1	3600	3755.6

2. Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο

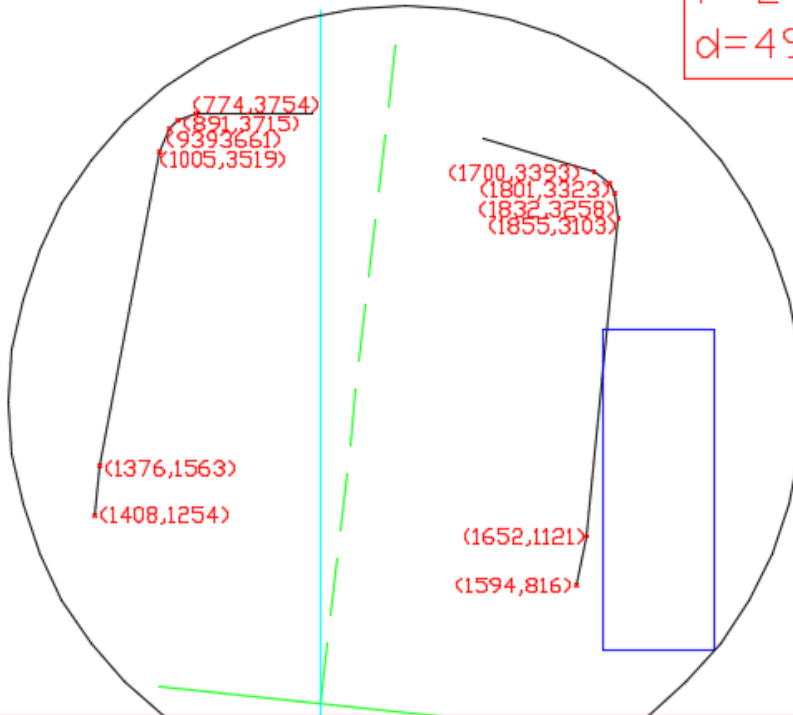
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 300

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxEa ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1586.3	930	932.9	1442.2	930	1138.7
1620.3	1240	1241.3	1434.1	1240	1448.9
1670.5	3230	3232.5	1214.4	3230	3428.6
1635.8	3380	3385.2	1159.3	3380	3575.2
1599.9	3440	3447.7	1115.3	3440	3632.3
1493.9	3495	3510.1	1001.8	3495	3679.7
792.7	3600	3663.0	286.4	3600	3736.3

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

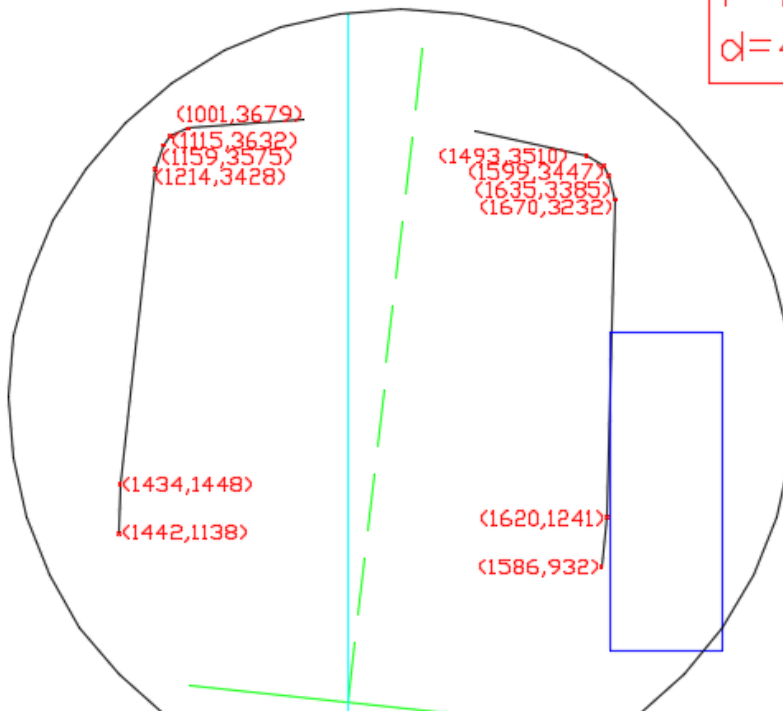
$R=300\text{m}$
 $r=2460\text{mm}$
 $d=4920\text{mm}$



Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με δεξιά στροφή περί τον πόλο

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

$R=300\text{m}$
 $r=2465\text{mm}$
 $d=4930\text{mm}$



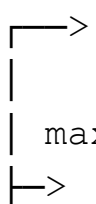

Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με αριστερή στροφή περί τον πόλο

Ακτίνα καμπυλότητας R=350m

1. Δεξιά καμπύλη με δεξιά στροφή περί τον πόλο

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

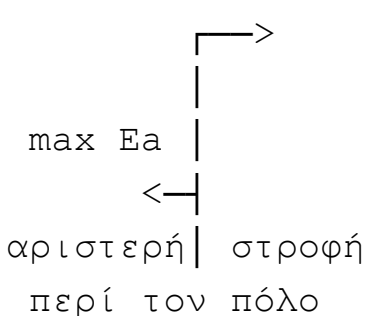
ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 350

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
max E _i			Η τιμή max E _i		
			αναφέρεται		
Δεξιά στροφή περί τον πόλο			στη μέση του οχήματος		
ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1586.9	930	817.9	1399.8	930	1253.1
1644.5	1240	1122.8	1368.0	1240	1561.7
1847.3	3230	3104.3	997.0	3230	3518.7
1824.3	3380	3259.2	930.9	3380	3660.6
1793.4	3440	3324.4	882.6	3440	3714.2
1692.5	3495	3394.6	765.9	3495	3752.8
1005.0	3600	3600.9	48.1	3600	3754.3

2.Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο

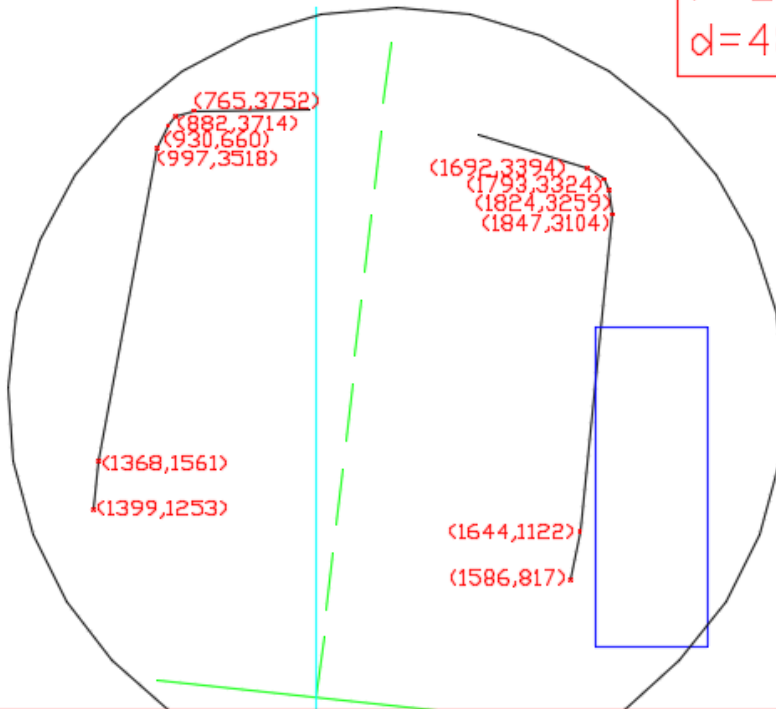
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 350

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxE _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1578.2	930	933.4	1433.1	930	1138.1
1612.2	1240	1241.8	1425.1	1240	1448.3
1662.4	3230	3233.0	1205.3	3230	3427.9
1627.6	3380	3385.7	1150.3	3380	3574.5
1591.8	3440	3448.3	1106.3	3440	3631.7
1485.8	3495	3510.6	992.8	3495	3679.1
784.5	3600	3663.5	277.3	3600	3735.7

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

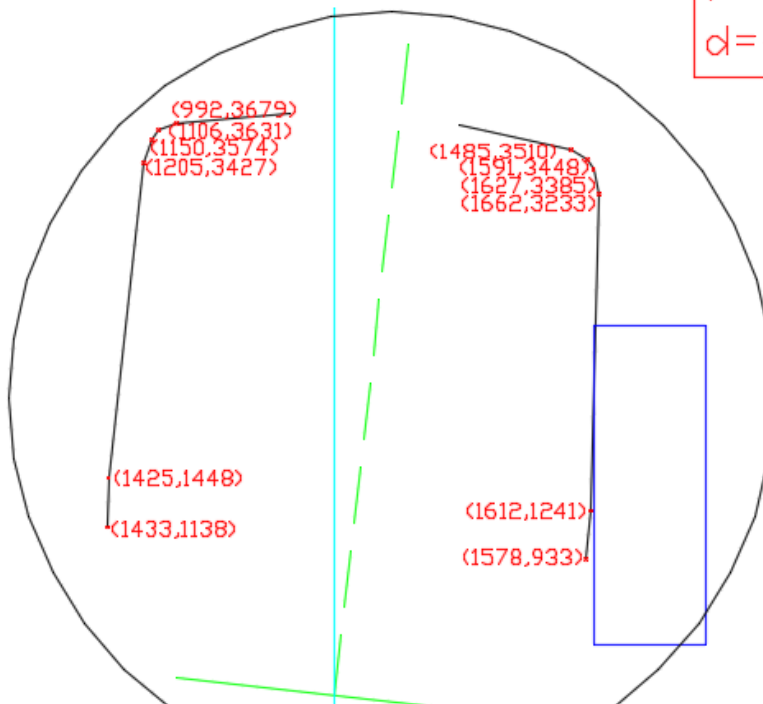
$R=350\text{m}$
 $r=2440\text{mm}$
 $d=4880\text{mm}$



Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με δεξιά στροφή περί τον πόλο

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

$R=350\text{m}$
 $r=2409\text{mm}$
 $d=4818\text{mm}$



Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με αριστερή στροφή περί τον πόλο

Ακτίνα καμπυλότητας R=400m

1. Δεξιά καμπύλη με δεξιά στροφή περί τον πόλο

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

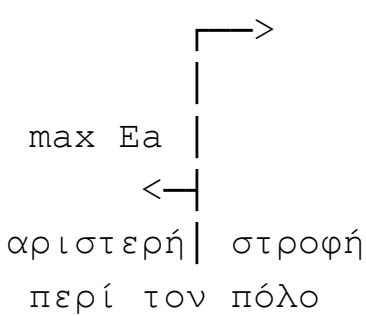
ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 400

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
max E _i			Η τιμή max E _i		
			αναφέρεται		
Δεξιά στροφή περί τον πόλο			στη μέση του οχήματος		
ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1580.9	930	818.8	1393.1	930	1252.1
1638.5	1240	1123.7	1361.3	1240	1560.7
1841.2	3230	3105.2	990.3	3230	3517.7
1818.3	3380	3260.1	924.1	3380	3659.6
1787.4	3440	3325.2	875.9	3440	3713.2
1686.5	3495	3395.5	759.1	3495	3751.8
999.0	3600	3601.8	41.4	3600	3753.3

2. Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο

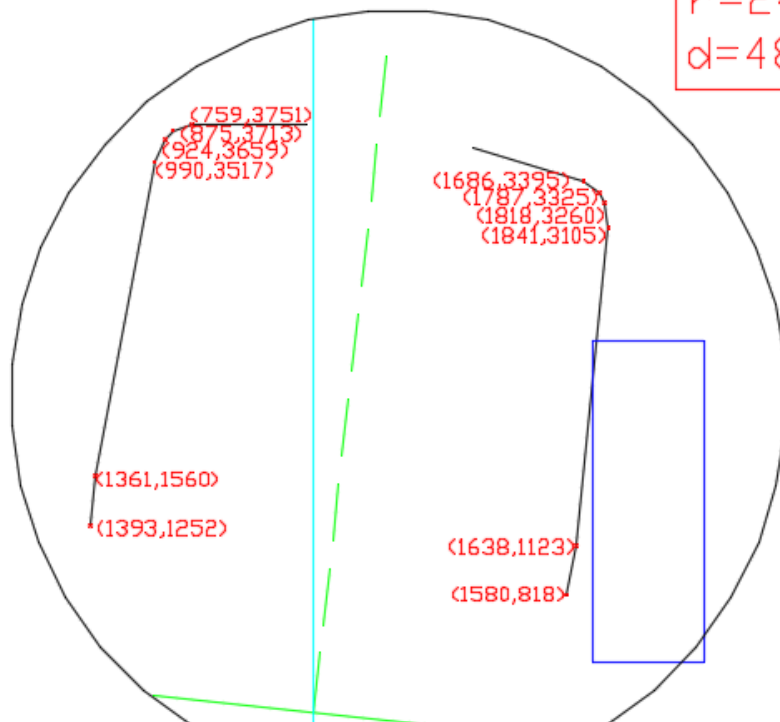
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 400

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxEa ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1572.1	930	933.8	1426.3	930	1137.7
1606.1	1240	1242.2	1418.3	1240	1447.8
1656.3	3230	3233.4	1198.5	3230	3427.5
1621.6	3380	3386.1	1143.5	3380	3574.1
1585.7	3440	3448.7	1099.5	3440	3631.2
1479.7	3495	3511.0	986.0	3495	3678.6
778.5	3600	3664.0	270.5	3600	3735.3

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

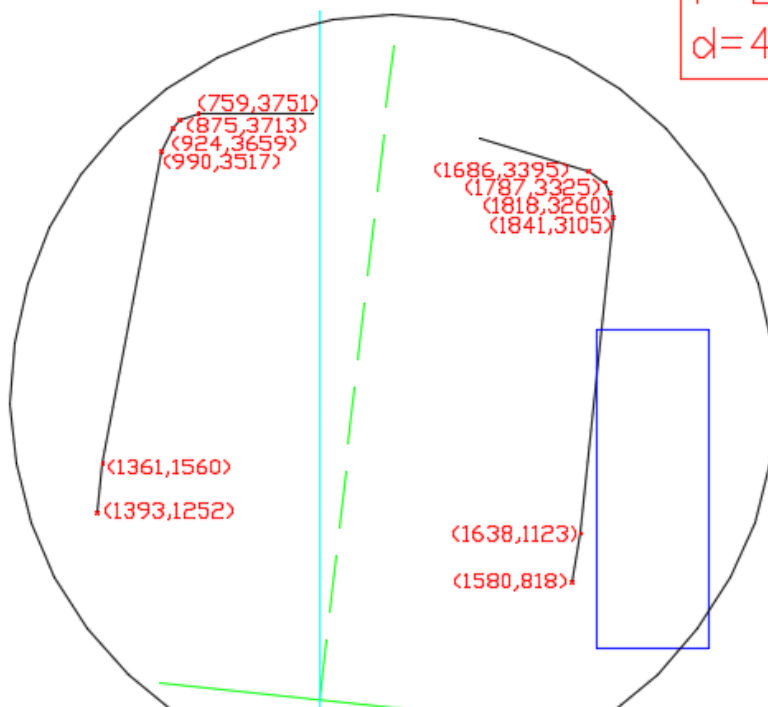
$R=400\text{m}$
 $r=2420\text{mm}$
 $d=4840\text{mm}$



Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με δεξιά στροφή περί τον πόλο

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

$R=400\text{m}$
 $r=2401\text{mm}$
 $d=4802\text{mm}$



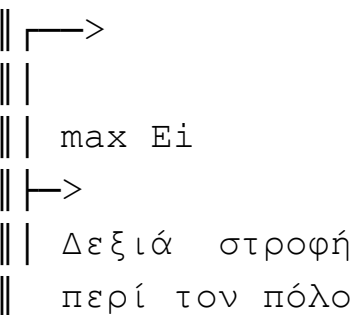
Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με αριστερή στροφή περί τον πόλο

Ακτίνα καμπυλότητας R=500m

1. Δεξιά καμπύλη με δεξιά στροφή περί τον πόλο

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 155.0

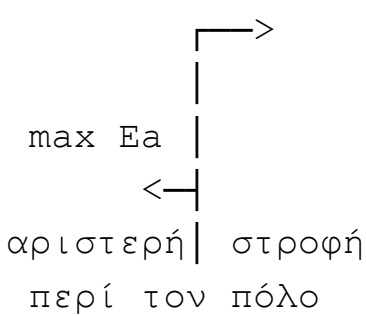
ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 500

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
max Ei			Η τιμή max Ei αναφέρεται στη μέση του οχήματος		
ΤΙΜΗ max Ei ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ Ea ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1570.0	930	822.5	1387.5	930	1243.4
1626.6	1240	1127.5	1356.7	1240	1552.1
1822.8	3230	3109.7	992.2	3230	3510.3
1799.4	3380	3264.5	926.5	3380	3652.4
1768.2	3440	3329.6	878.4	3440	3706.2
1667.1	3495	3399.5	761.8	3495	3745.2
979.0	3600	3603.5	44.1	3600	3749.1

2.Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο

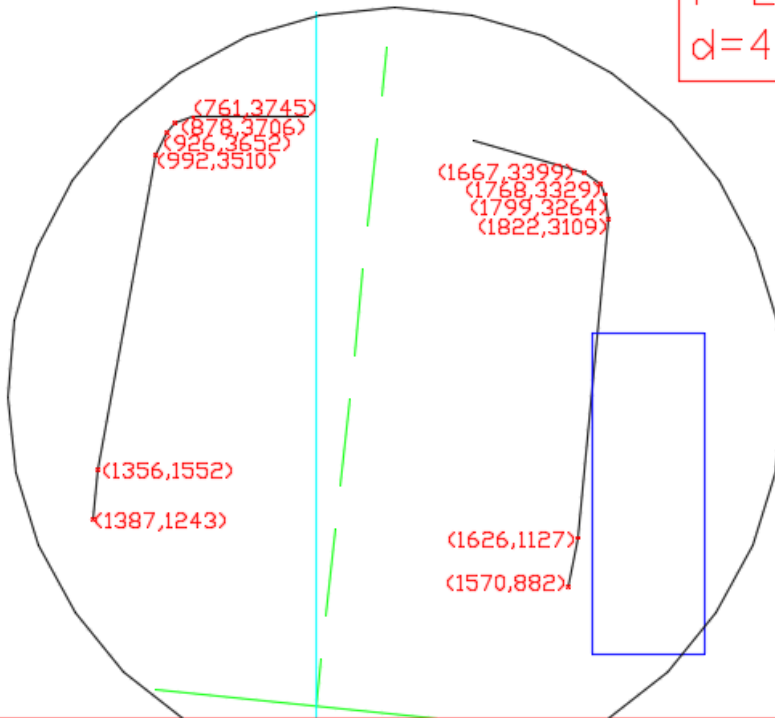
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 155.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 500

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxE _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1560.8	930	936.8	1420.3	930	1129.6
1593.8	1240	1245.3	1413.3	1240	1439.8
1637.4	3230	3236.7	1200.1	3230	3420.1
1602.1	3380	3389.3	1145.5	3380	3566.9
1566.1	3440	3451.7	1101.7	3440	3624.2
1459.9	3495	3513.7	988.4	3495	3672.0
758.1	3600	3664.3	273.1	3600	3731.0

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

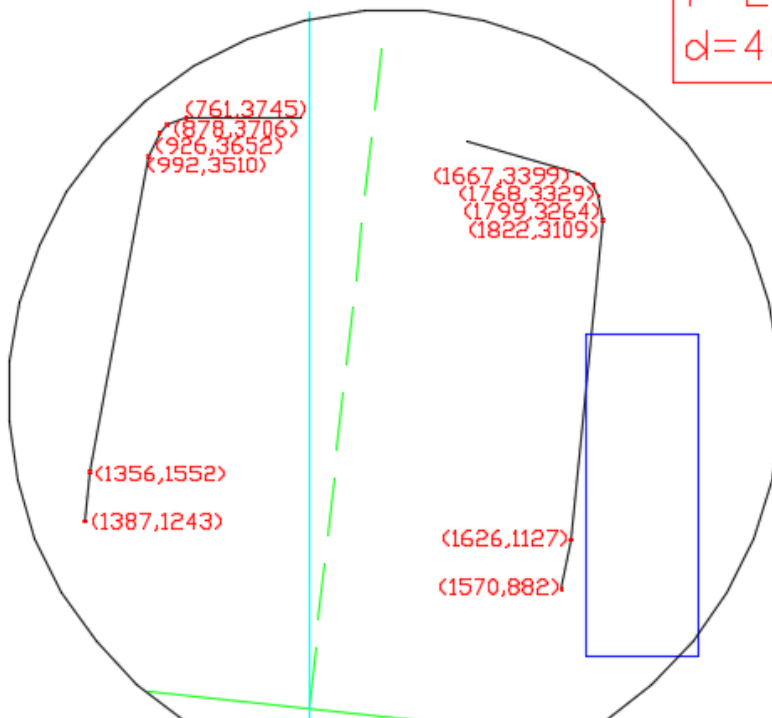
$R=500\text{m}$
 $r=2414\text{mm}$
 $d=4828\text{mm}$



Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με δεξιά στροφή περί τον πόλο

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

$R=500\text{m}$
 $r=2400\text{mm}$
 $d=4800\text{mm}$



Κινηματικό περιτύπωμα σε δεξιά στροφή με αριστερή στροφή περί τον πόλο

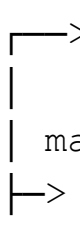
ΣΗΡΑΓΓΑ 2 ΑΞΟΝΩΝ

Ακτίνα καμπυλότητας R=200m

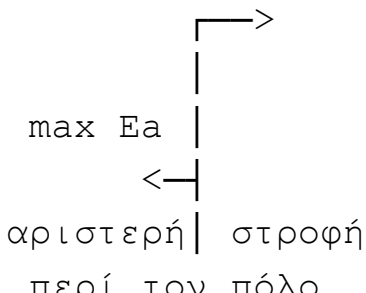
1. Δεξιά καμπύλη με δεξιά στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 1 και αριστερή στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 2

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 200

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
max E _i			Η τιμή max E _i		
Δεξιά στροφή			αναφέρεται		
περί τον πόλο			στη μέση του οχήματος		
ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1623.2	930	812.7	1440.2	930	1258.9
1680.7	1240	1117.6	1408.4	1240	1567.6
1883.5	3230	3099.0	1037.4	3230	3524.5
1860.6	3380	3253.9	971.2	3380	3666.5
1829.6	3440	3319.1	923.0	3440	3720.1
1728.7	3495	3389.4	806.2	3495	3758.7
1041.3	3600	3595.6	88.5	3600	3760.2

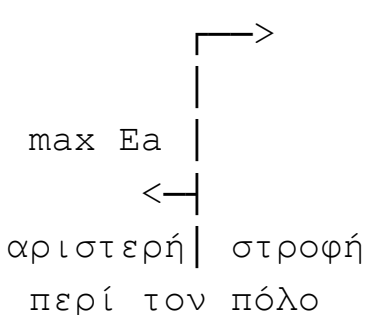
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0
 ΑΚΤΙΝΑ R2 (mm) = 200

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxE _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1614.7	930	930.9	1473.8	930	1140.9
1648.7	1240	1239.4	1465.8	1240	1451.1
1698.9	3230	3230.5	1246.0	3230	3430.7
1664.2	3380	3383.2	1191.0	3380	3577.3
1628.3	3440	3445.8	1147.0	3440	3634.5
1522.3	3495	3508.1	1033.5	3495	3681.9
821.1	3600	3661.1	318.0	3600	3738.5

2. Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 1 και δεξιά στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 2

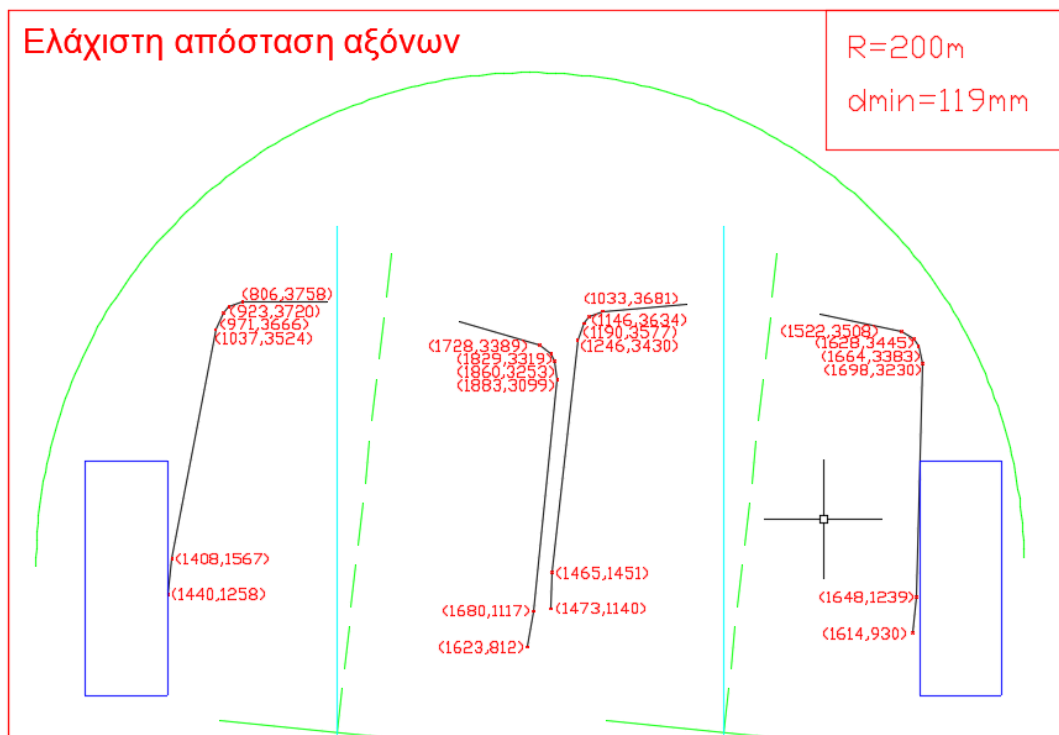
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 200

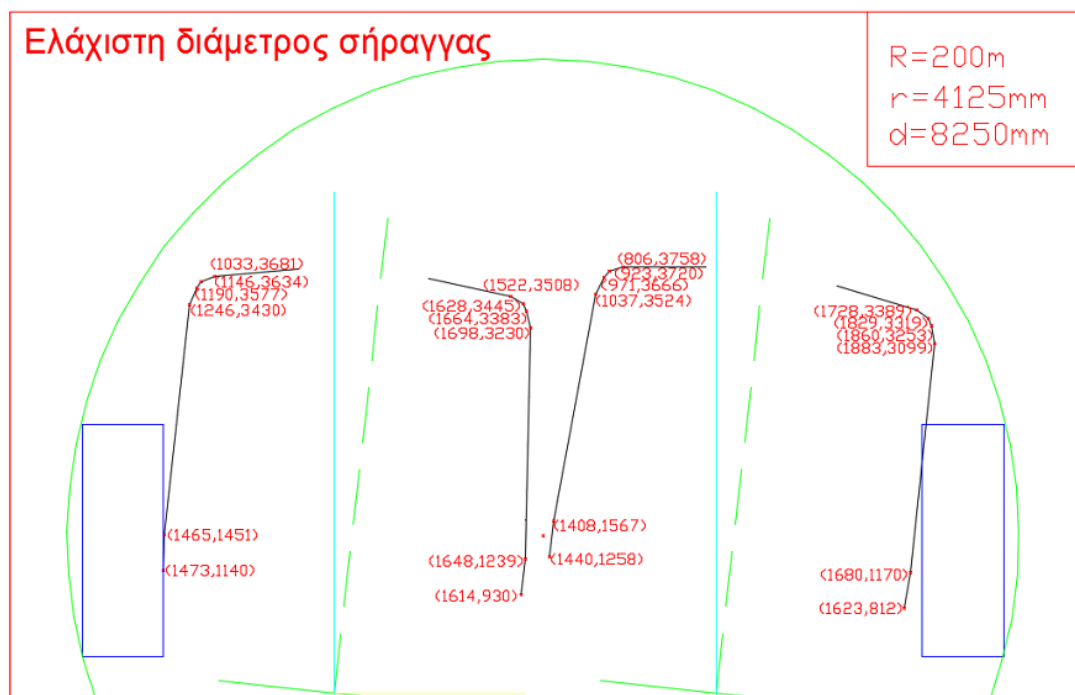
Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxEa ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1614.7	930	930.9	1473.8	930	1140.9
1648.7	1240	1239.4	1465.8	1240	1451.1
1698.9	3230	3230.5	1246.0	3230	3430.7
1664.2	3380	3383.2	1191.0	3380	3577.3
1628.3	3440	3445.8	1147.0	3440	3634.5
1522.3	3495	3508.1	1033.5	3495	3681.9
821.1	3600	3661.1	318.0	3600	3738.5

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0
 ΑΚΤΙΝΑ R2 (mm) = 200

ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1623.2	930	812.7	1440.2	930	1258.9
1680.7	1240	1117.6	1408.4	1240	1567.6
1883.5	3230	3099.0	1037.4	3230	3524.5
1860.6	3380	3253.9	971.2	3380	3666.5
1829.6	3440	3319.1	923.0	3440	3720.1
1728.7	3495	3389.4	806.2	3495	3758.7
1041.3	3600	3595.6	88.5	3600	3760.2



Κινηματικό περιτύπωμα στην δυσμενέστερη θέση για την απόσταση των αξόνων για $R=200m$



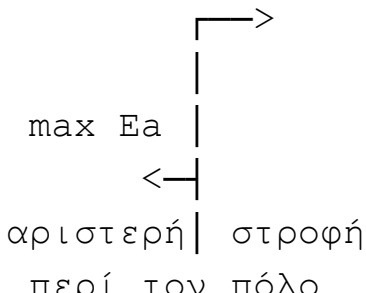
Κινηματικό περιτύπωμα στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για $R=200m$

Ακτίνα καμπυλότητας R=250m

Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 1 και δεξιά στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 2

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 250

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxEa ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1597.7	930	932.1	1454.8	930	1139.6
1631.7	1240	1240.5	1446.8	1240	1449.8
1681.8	3230	3231.7	1227.0	3230	3429.4
1647.1	3380	3384.4	1172.0	3380	3576.0
1611.3	3440	3447.0	1128.0	3440	3633.2
1505.3	3495	3509.3	1014.5	3495	3680.6
804.0	3600	3662.2	299.0	3600	3737.2

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R2 (mm) = 250

ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Ύψος από ΑΚΣ	Ύψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Ύψος από ΑΚΣ	Ύψος από ορ. θέση
1606.3	930	815.1	1421.4	930	1256.2
1663.8	1240	1120.0	1389.5	1240	1564.8
1866.6	3230	3101.5	1018.6	3230	3521.8
1843.7	3380	3256.4	952.4	3380	3663.7
1812.7	3440	3321.5	904.2	3440	3717.3
1711.8	3495	3391.8	787.4	3495	3755.9
1024.4	3600	3598.1	69.7	3600	3757.5



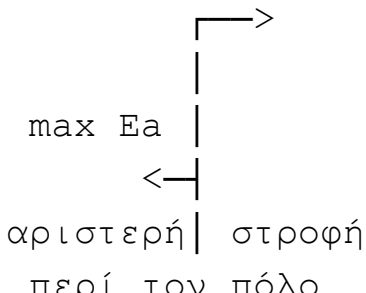
Κινηματικό περιτύπωμα στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για $R=250m$

Ακτίνα καμπυλότητας R=300m

Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 1 και δεξιά στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 2

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 300

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxE _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Ύψος από ΑΚΣ	Ύψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Ύψος από ΑΚΣ	Ύψος από ορ. θέση
1586.3	930	932.9	1442.2	930	1138.7
1620.3	1240	1241.3	1434.1	1240	1448.9
1670.5	3230	3232.5	1214.4	3230	3428.6
1635.8	3380	3385.2	1159.3	3380	3575.2
1599.9	3440	3447.7	1115.3	3440	3632.3
1493.9	3495	3510.1	1001.8	3495	3679.7
792.7	3600	3663.0	286.4	3600	3736.3

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R2 (mm) = 300

ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Ύψος από ΑΚΣ	Ύψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Ύψος από ΑΚΣ	Ύψος από ορ. θέση
1595.0	930	816.8	1408.8	930	1254.4
1652.5	1240	1121.7	1377.0	1240	1563.0
1855.3	3230	3103.1	1006.0	3230	3520.0
1832.4	3380	3258.0	939.8	3380	3661.9
1801.5	3440	3323.2	891.6	3440	3715.5
1700.5	3495	3393.5	774.8	3495	3754.1
1013.1	3600	3599.7	57.1	3600	3755.6



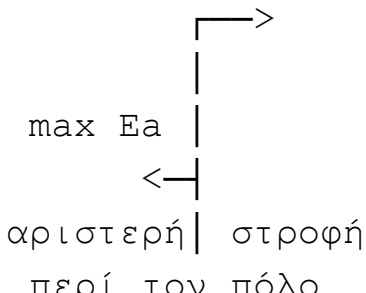
Κινηματικό περιτύπωμα στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για R=300m

Ακτίνα καμπυλότητας R=350m

Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 1 και δεξιά στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 2

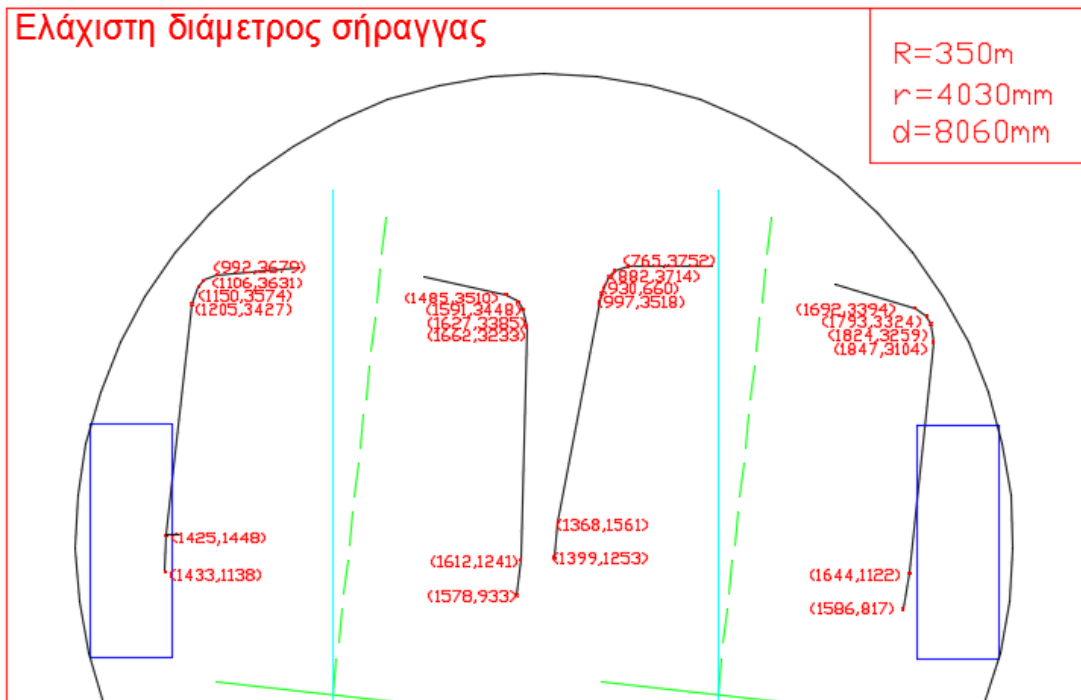
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 350

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxE _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Ύψος από ΑΚΣ	Ύψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Ύψος από ΑΚΣ	Ύψος από ορ. θέση
1578.2	930	933.4	1433.1	930	1138.1
1612.2	1240	1241.8	1425.1	1240	1448.3
1662.4	3230	3233.0	1205.3	3230	3427.9
1627.6	3380	3385.7	1150.3	3380	3574.5
1591.8	3440	3448.3	1106.3	3440	3631.7
1485.8	3495	3510.6	992.8	3495	3679.1
784.5	3600	3663.5	277.3	3600	3735.7

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0
 ΑΚΤΙΝΑ R2 (mm) = 350

ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1586.9	930	817.9	1399.8	930	1253.1
1644.5	1240	1122.8	1368.0	1240	1561.7
1847.3	3230	3104.3	997.0	3230	3518.7
1824.3	3380	3259.2	930.9	3380	3660.6
1793.4	3440	3324.4	882.6	3440	3714.2
1692.5	3495	3394.6	765.9	3495	3752.8
1005.0	3600	3600.9	48.1	3600	3754.3



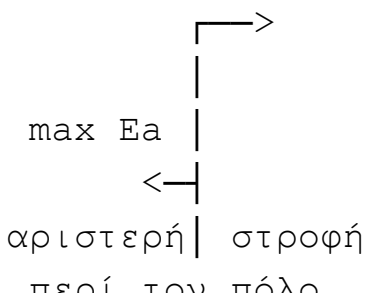
Κινηματικό περιτύπωμα στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για R=350m

Ακτίνα καμπυλότητας R=400m

Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 1 και δεξιά στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 2

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 400

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxEa ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1572.1	930	933.8	1426.3	930	1137.7
1606.1	1240	1242.2	1418.3	1240	1447.8
1656.3	3230	3233.4	1198.5	3230	3427.5
1621.6	3380	3386.1	1143.5	3380	3574.1
1585.7	3440	3448.7	1099.5	3440	3631.2
1479.7	3495	3511.0	986.0	3495	3678.6
778.5	3600	3664.0	270.5	3600	3735.3

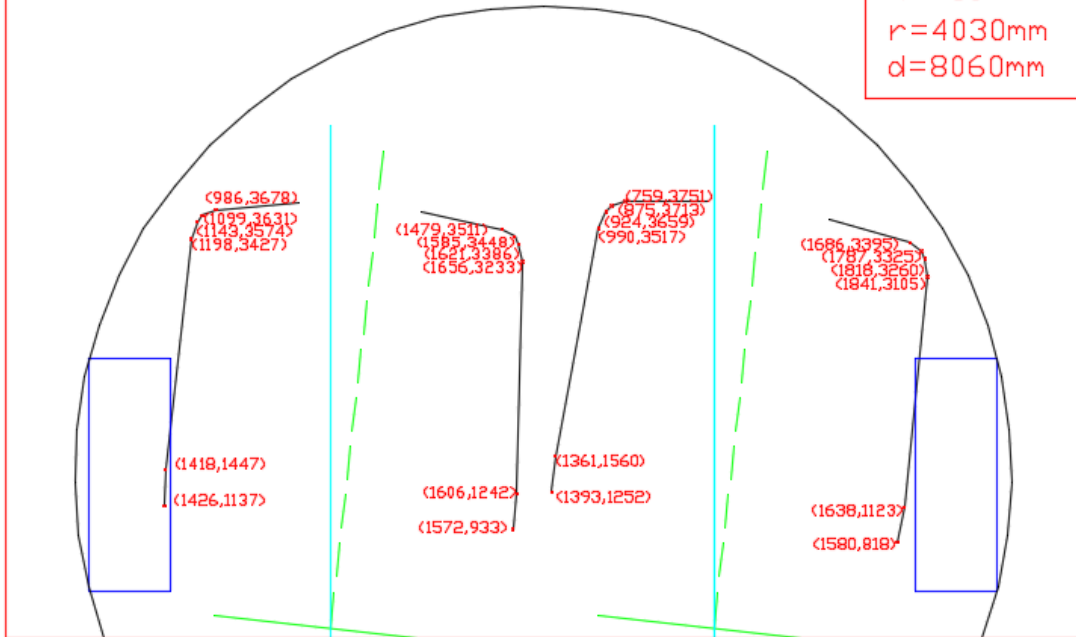
ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 160.0

ΑΚΤΙΝΑ R2 (mm) = 400

ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1580.9	930	818.8	1393.1	930	1252.1
1638.5	1240	1123.7	1361.3	1240	1560.7
1841.2	3230	3105.2	990.3	3230	3517.7
1818.3	3380	3260.1	924.1	3380	3659.6
1787.4	3440	3325.2	875.9	3440	3713.2
1686.5	3495	3395.5	759.1	3495	3751.8
999.0	3600	3601.8	41.4	3600	3753.3

Ελάχιστη διάμετρος σήραγγας

R=400m
r=4030mm
d=8060mm



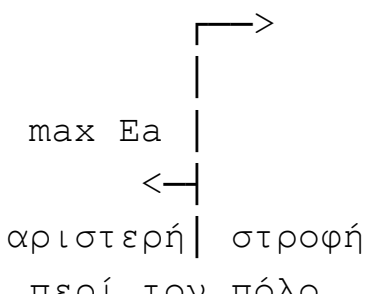
Κινηματικό περιτύπωμα στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για R=400m

Ακτίνα καμπυλότητας R=500m

Δεξιά καμπύλη με αριστερή στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 1 και δεξιά στροφή περί τον πόλο στην γραμμή 2

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 155.0

ΑΚΤΙΝΑ R1 (m) = 500

Δεξιά καμπύλη			Α Π Ο Τ Ε Λ Ε Σ Μ Α Τ Α		
			(σε χιλιοστά)		
			Η τιμή max Ea αναφέρεται στο μέτωπο του οχήματος		
ΤΙΜΗ E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ maxE _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1560.8	930	936.8	1420.3	930	1129.6
1593.8	1240	1245.3	1413.3	1240	1439.8
1637.4	3230	3236.7	1200.1	3230	3420.1
1602.1	3380	3389.3	1145.5	3380	3566.9
1566.1	3440	3451.7	1101.7	3440	3624.2
1459.9	3495	3513.7	988.4	3495	3672.0
758.1	3600	3664.3	273.1	3600	3731.0

ΥΠΕΡΥΨΩΣΗ (mm) = 155.0
 ΑΚΤΙΝΑ R2 (mm) = 500

ΤΙΜΗ max E _i ΜΕΣΗ ΟΧΗΜΑΤΟΣ			ΤΙΜΗ E _a ΜΕΤΩΠΟ ΟΧΗΜΑΤΟΣ		
Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση	Απόσταση από ΑΕ1	Υψος από ΑΚΣ	Υψος από ορ. θέση
1570.0	930	822.5	1387.5	930	1243.4
1626.6	1240	1127.5	1356.7	1240	1552.1
1822.8	3230	3109.7	992.2	3230	3510.3
1799.4	3380	3264.5	926.5	3380	3652.4
1768.2	3440	3329.6	878.4	3440	3706.2
1667.1	3495	3399.5	761.8	3495	3745.2
979.0	3600	3603.5	44.1	3600	3749.1



Κινηματικό περιτύπωμα στη δυσμενέστερη θέση για το εσωράχιο της σήραγγας για $R=500m$