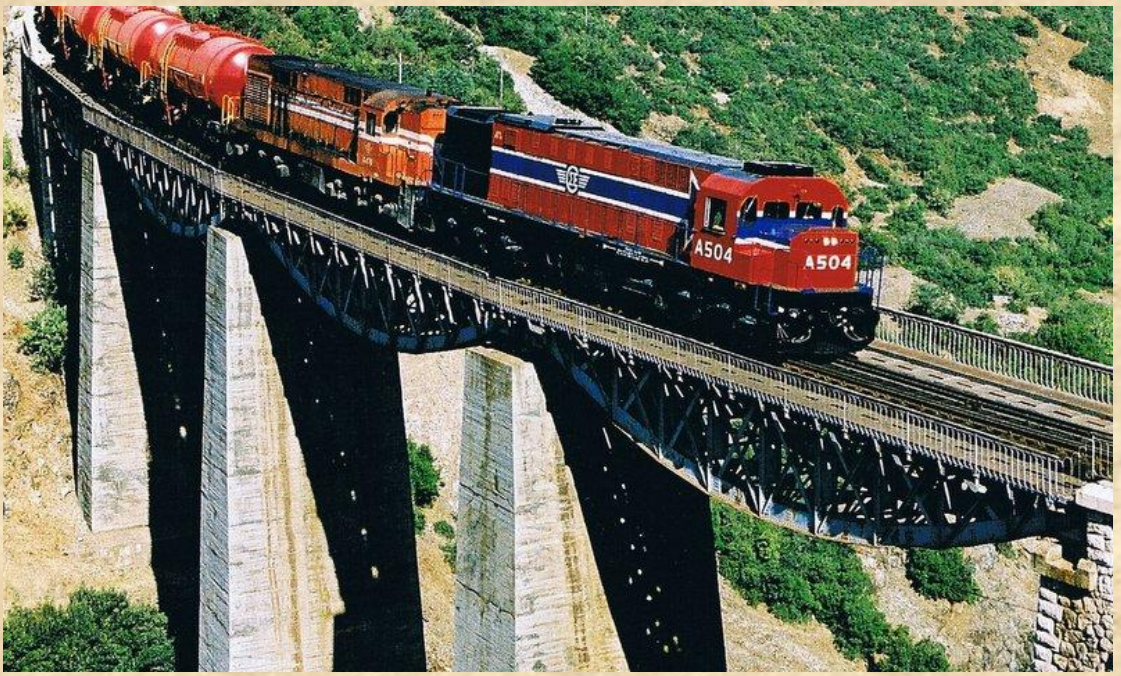
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΓΓΡΑΦΗΣ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΤΟΥ ΟΣΕ ΣΕ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΜΙΚΡΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΟΓΡΑΦΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ



ΜΑΡΙΑ Κ. ΚΟΥΤΕΛΙΔΑΚΗ

Επιβλέπων: Κ. Λυμπέρης, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ 2013

Ευχαριστίες

Με την περάτωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες:

Στον επιβλέποντα καθηγητή του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών ΕΜΠ κ. Κώστα Λυμπέρη, για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας και την επιστημονική του καθοδήγηση, καθώς και τη ψυχολογική στήριξη.

Στην υποψήφια διδάκτορα κ. Τατιάνα Γιαλαμά για τις συμβουλές και την πολύτιμη βοήθεια της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου καθώς και όσους βοήθησαν με οποιονδήποτε τρόπο στη διαμόρφωση της παρούσας διπλωματικής.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της εγγραφής των σιδηροδρομικών οχημάτων σε οριζοντιογραφικές καμπύλες που δεν υπερβαίνουν τα 400 m (R≤400 m). Για τον σκοπό αυτό εξετάστηκαν σιδηροδρομικά οχήματα με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά, όπως μήκος μεταξονίου, απόσταση ομφαλών φορείων και αριθμός τροχοφόρων αξόνων στο φορείο. Ταυτόχρονα, έγινε υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης των τροχών επί της εσωτερικής παρειάς των σιδηροτροχιών, καθώς και των απαιτούμενων διαπλατύνσεων, ώστε να επιτυγχάνεται η εγγραφή των φορείων. Επίσης, υπολογίζονται οι κατευθυντήριες δυνάμεις και οι δυνάμεις καθοδήγησης που αναπτύσσονται κατά την κύλιση των οχημάτων.

Για την εγγραφή των φορείων στην καμπύλη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Vogel και για την εκτίμηση των δυνάμεων η μέθοδος ελαχίστου του Heumann. Τα σιδηροδρομικά οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν στη διερεύνηση ανήκουν στον Οργανισμό Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ) και κινούνται στο ελληνικό σιδηροδρομικό δίκτυο.

Λέξεις κλειδιά: Εγγραφή φορείου σε καμπύλη, Μέθοδος Vogel, Διαπλάτυνση σε καμπύλη, Γωνία πρόσπτωσης, Μέθοδος Heumann.

Abstract

The scope of this thesis is the research of the behavior of railway bogies when travelling around a curve in the railroad, with radius of curvature less than 400 m (R≤400 m). For this purpose railway bogies with variety of technical characteristics, such as wheelbase, distance between the bogie pivots and number of axles per bogie, were used. Simultaneously the angle of attack of the wheels on the inner side of the rails is calculated. In order to achieve the appropriate positioning of bogies, the calculations also include the required widening of curves. This thesis also refers to the rails' stress, which results from the forces arising during the rolling of the used railway vehicles.

The behaviour of the railway bogies when passing a curve was examined with the Vogel's method. The forces were estimated by using the minimum Heumann's method. The railway vehicles used at the research belong to the Hellenic Railways Organisation (OSE) and travel through the Greek railway network.

Keywords: Bogies passing a curve, Vogel method, Curve widening, Angle of attack, Heumann method.

Περιεχόμενα

Περίληψη 3
Abstract 3
Συμβολισμοί 7
Κατάλογος Εικόνων 9
Κατάλογος Πινάκων 9
Κατάλογος Σχημάτων 9
Κεφάλαιο 1^{ο} 13
1.1 Εισαγωγή 13
1.2 Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής 13
1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας 14
Κεφάλαιο 2^{ο}: Γενικά 15
2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος ΄΄Σιδηρόδρομος΄΄ 15
2.2 Τροχαίο υλικό 15
2.2.1 Αμάξωμα 16
2.2.2 Φορεία 16
2.2.3 Τροχοφόροι Άξονες 19
2.2.4 Τροχός 20
2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής 21
2.4 Κύλιση 24
2.4.1 Στην ευθυγραμμία 24
2.4.2 Στην καμπύλη 31
Κεφάλαιο 3^{ο}: Εγγραφή οχήματος στην καμπύλη 35
3.1 Εισαγωγή 35
3.2 Μέθοδος Vogel 35
3.2.1: Υπολογισμός σφάλματος μεθόδου 40
3.2.2 Πως γίνεται η μέτρηση στην απεικόνιση Vogel 41
3.3 Θέση αξόνων και οχημάτων στις οριζοντιογραφικές καμπύλες 42
3.4 Παράδειγμα υπολογισμού με την μέθοδο Vogel 44
3.5 Δυνάμεις μεταξύ τροχού σιδηροτροχιάς-Μέθοδος Ελαχίστου του Heumann 50
3.5.1 Δυνάμεις και ολισθήσεις υπό ορισμένες συνθήκες 51
3.5.2 Περίπτωση ελεύθερης κύλισης 52
3.5.3 Περίπτωση σφηνοειδούς κύλισης 56
3.6 Παράδειγμα υπολογισμού των δυνάμεων 60

3.7 Γωνία πρόσπτωσης 63
Κεφάλαιο 4^{ο}: Εφαρμογή στο τροχαίο υλικό του ΟΣΕ 65
4.1 Εισαγωγή 65
4.2 Βήματα επεξεργασίας 65
4.3 Υπολογισμός δυνάμεων 69
4.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων 70
4.4.1 Αποτελέσματα διαπλατύνσεων 70
4.4.2 Αποτελέσματα γωνίας πρόσπτωσης 73
4.4.3 Αποτελέσματα υπολογισμού δυνάμεων 77
4.4.4 Ποσοστό διερχόμενων οχημάτων 79
Κεφάλαιο 5^{ο}: Συμπεράσματα 81
Κεφάλαιο 6^{ο}: Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα 83
Βιβλιογραφία 85
ΠΑΡΑΡΤΗΤΜΑ Α (ΤΡΟΧΑΙΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΟΣΕ-ΔΙΑΠΛΑΤΥΝΣΕΙΣ-ΓΩΝΙΕΣ ΠΡΟΣΠΩΤΣΗΣ) 87
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β (ΔΙΑΠΛΑΤΥΝΣΕΙΣ) 147
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ (ΔΥΝΑΜΕΙΣ) 155

Συμβολισμοί

R (m): Οριζοντιογραφική ακτίνα

V(km/hr): Ταχύτητα κίνηση συρμού

a(mm): Μεταξόνιο φορείου

2d(mm): Απόσταση ομφαλών φορείων

δ(mm): Διάκενο

d(mm): Διαπλάτυνση

x_g**(mm):** Κατά μήκος κίνηση τροχοφόρου άξονα

y_g**(mm):** Εγκάρσια κίνηση τροχοφόρου άξονα

ω (rad/s): Γωνιακή ταχύτητα τροχού

ψ(μοίρες): Γωνία πρόσπτωσης τροχού επί της σιδηροτροχιάς

r_i**(mm):** Ακτίνα κύλισης τροχού

L(m): Μήκος κύματος

Q(kN): Φορτίο τροχού

μ: Συντελεστής τριβής

P(kN): Κατευθυντήρια δύναμη

Y(kN): Δύναμη καθοδήγησης

q(mm): Βραχίονες δυνάμεων τριβής

ξ(μοίρες): Γωνία βραχιόνων q

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Σιδηροδρομικό όχημα (αμάξωμα, φορεία, τροχοφόροι άξονες)
Εικόνα 2.2: Φορείο
Εικόνα 2.3: Αρθρωτό φορείο
Εικόνα 2.4: Φορείο κατευθυνόμενων και μη κατευθυνόμενων αξόνων
Εικόνα 2.5: Φορείο-Μεταξόνιο
Εικόνα 2.6: Συζευγμένο σύστημα τροχών-άξονα (τροχοφόρος άξονας)
Εικόνα 2.7: Οφιοειδής κίνηση
Εικόνα 2.8: Κωνικότητα τροχών-Συζευγμένο σύστημα τροχών/άξονα
Εικόνα 2.9: Κυλιόμενος κώνος επί κωνικής έδρασης
Εικόνα 2.10: Τροχοφόρος άξονας ως κυλιόμενο σώμα

Εικόνα 3.1: Εγκάρσια συρρίκνωση τροχοφόρου άξονα
Εικόνα 3.2: Μηδενισμός απόστασης ίχνους
Εικόνα 3.3: Συνολικό διάκενο
Εικόνα 3.4: Κανάλι ίχνους και τροχοφόρος άξονας ως σημείο
Εικόνα 3.5: Θέσεις του άξονα στην καμπύλη
Εικόνα 3.6: Τυπικές θέσεις φορείων με δυο τροχοφόρους άξονες στην καμπύλη

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Κανονισμός ΟΣΕ
Πίνακας 3.1: Κανάλι Vogel με R=350m και δ_{max}=18mm
Πίνακας 3.2: Υπολογισμός σημείων σχεδίασης διακένου
Πίνακας 3.3: Προτεινόμενες τιμές του συντελεστή τριβής μ
Πίνακας 4.1: Συντεταγμένες σιδηροτροχιών
Πίνακας 4.2: Υπολογισμός δυνάμεων σε σφηνοειδή κύλιση
Πίνακας 4.3: Υπολογισμός δυνάμεων σε σφηνοειδή κύλιση
Πίνακας 4.4: Ποσοστό διερχόμενων οχημάτων
Πίνακας 4.5: Διαπλατύνσεις όπως προέκυψαν από τη διερεύνηση σε σχέση με τον κανονισμό
Πίνακας Π1-Π20: Στοιχεία οχημάτων και απαιτούμενες διαπλατύνσεις
Πίνακας ΠΓ.1: Βραχίονες και συντεταγμένες γραμμής ροπών MLW A501-510
Πίνακας ΠΓ.2: Βραχίονες και συντεταγμένες γραμμής ροπών General Electric

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Διατομή τροχού με τα κυριότερα στοιχεία του
Σχήμα 2.2: Απεικόνιση εύρους και ίχνους
Σχήμα 2.3: Μέτρηση q_R
Σχήμα 2.4: Θέση μέτρησης εύρους γραμμής
Σχήμα 2.5: Σταδιακή εφαρμογή διαπλάτυνσης (Ελληνικός Κανονισμός)

Σχήμα 2.6: Σταδιακή εφαρμογή διαπλάτυνσης (Αυστριακός Κανονισμός)
Σχήμα 2.7: Δημιουργία κοιλώματος σε κυλινδρικούς τροχούς μετά από μονόπλευρη επαφή μεγάλης διάρκειας
Σχήμα 2.8: Κύριες παράμετροι κατά Klingel

Σχήμα 3.1: Προσομοίωση ενός κυκλικού τόξου σε έλλειψη
Σχήμα 3.2: Απεικόνιση της οριζοντιογραφικής καμπύλης με τη Μέθοδο Vogel
Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση θ.Θαλή
Σχήμα 3.4: Μέτρηση μήκους και απόστασης
Σχήμα 3.5: Μέτρηση γωνία πρόσπτωσης
Σχήμα 3.6: Απεικόνιση θέσης οχήματος με τη Μέθοδο Vogel
Σχήμα 3.7: Απεικόνιση θέσης οχήματος με τη Μέθοδο Vogel
Σχήμα 3.8: Απεικόνιση γωνίας πρόσπτωσης ψ τροχού επί σιδηροτροχιάς (κάτοψη-προοπτικό)
Σχήμα 3.9: Ολισθήσεις και δυνάμεις μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς κατά την κίνηση στροφής του οχήματος στην καμπύλη (όχημα σε ελεύθερη κύλιση)
Σχήμα 3.10: Μέθοδος ελαχίστου για όχημα με 3 τροχοφόρους άξονες
Σχήμα 3.11: Ολισθήσεις και δυνάμεις μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς κατά την κίνηση στροφής του οχήματος στην καμπύλη (σφηνοειδής θέση)
Σχήμα 3.12: Κέντρο τριβής στην περίπτωση σφηνοειδούς κύλισης
Σχήμα 3.13: Μέθοδος ελαχίστου για οχήματα με 3 τροχοφόρους άξονες σε σφηνοειδή θέση
Σχήμα 3.14: Vogelplan για R=250m
Σχήμα 3.15: Απεικόνιση δυνάμεων
Σχήμα 3.16: Γραμμή ροπών και δυνάμεων τροχού- Απεικόνιση βραχιόνων και γωνιών

Σχήμα 4.1: Απεικόνιση οριζοντιογραφικής καμπύλης με τη Μέθοδο Vogel R=400m και δ_{max}=10mm
Σχήμα 4.2:Τοποθέτηση φορείου στο κανάλι Vogel (ελεύθερη κύλιση)
Σχήμα 4.3:Τοποθέτηση φορείου στο κανάλι Vogel (σφηνοειδής κύλιση)
Σχήμα 4.4: Γωνία πρόσπτωσης τροχού επί σιδηροτροχιάς
Σχήμα 4.5: Τριαξονικό φορείο (Σφηνοειδής θέση-Διαπλάτυνση)
Σχήμα 4.6: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία
Σχήμα 4.7: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία
Σχήμα 4.8: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για τριαξονικά φορεία
Σχήμα 4.9: Γωνία πρόσπτωσης ψ του τροχού επί της σιδηροτροχιάς (διαξονικά φορεία)
Σχήμα 4.10: Γωνία πρόσπτωσης ψ του τροχού επί της σιδηροτροχιάς (διαξονικά φορεία)

Σχήμα 4.11: Γωνία πρόσπτωσης ψ του τροχού επί της σιδηροτροχιάς (διαξονικά φορεία)
Σχήμα 4.12: Γωνία πρόσπτωσης ψ του τροχού επί της σιδηροτροχιάς (τριαξονικά φορεία)

Σχήμα Π1-Π54: Vogelplan για τα διερευνημένα οχήματα
Σχήμα ΠΒ.1-ΠΒ.14: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις διερευνημένων οχημάτων
Σχήμα ΠΓ.1: Μέθοδος ελαχίστου του Heumann σε σφηνοειδή κύλιση MLW A501-510
Σχήμα ΠΓ.2: Μέθοδος ελαχίστου του Heumann σε σφηνοειδή κύλιση General Electric

Κεφάλαιο 1ο

1.1 Εισαγωγή

Ο σιδηρόδρομος είναι ένα από τα σημαντικότερα μέσα μεταφοράς επιβατών και αγαθών. Το μεγαλύτερο μέρος των σιδηροδρομικών δικτύων δημιουργήθηκε πριν από πολλές δεκαετίες με καθοριστικό στοιχείο χάραξης τις ατμομηχανές και μετέπειτα τις δηζελομηχανές και τις ηλεκτρικές μηχανές έλξης των συρμών. Για τον λόγο αυτό οι κατά μήκος κλίσεις υπήρξαν μικρές και η υπέρβασή τους απαιτούσε αρκετές προσαρμογές της γραμμής στο ανάγλυφο του εδάφους με μικρές οριζοντιογραφικές ακτίνες (βλ. μονή γραμμή Τιθορέα – Δομοκός του ΟΣΕ).

Παρά την σημερινή ανάπτυξη ορισμένων δικτύων σε δίκτυα με υψηλές ταχύτητες (ΓΥΤ), ένα μεγάλο ποσοστό αυτών λειτουργεί ακόμη με συμβατικές ταχύτητες (V≤160 km/h). Η χάραξη των γραμμών αυτών παρουσιάζει τμήματα με μεγάλη καμπυλότητα (μικρές οριζοντιογραφικές ακτίνες R≤400 m), στα οποία η κατασκευή των γραμμών ακολουθεί κανονισμούς **διαπλάτυνσης του εύρους**. Επίσης, εγκαταστάσεις όπου εκτελούνται καθημερινά πολλοί ελιγμοί (χώροι σύνθεσης συρμών, αμαξοστασίων κ.α.), χαράσσονται με μικρές οριζοντιογραφικές ακτίνες και συνήθως χωρίς συναρμογές, γεγονός που απαιτεί ιδιαίτερη διερεύνηση της αναγκαίας διαπλάτυνσης, καθόσον και τα κυκλοφορούντα οχήματα στις γραμμές αυτές έχουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά.

Η διαπλάτυνση του εύρους γραμμής είναι αναγκαία, όπου αυτή απαιτείται, για την ομαλή κύλιση του τροχαίου υλικού, έτσι ώστε να αποφεύγονται σημαντικές φθορές τόσο στο τροχαίο υλικό όσο και στις σιδηροτροχιές. Με άλλα λόγια, συμβάλλει γεωμετρικά στο να μη δυσχεραίνεται η εγγραφή των οχημάτων σε συγκεκριμένες καμπύλες αυξημένης καμπυλότητας. Η διαπλάτυνση ολοκληρώνεται εντός της καμπύλης συναρμογής, εφόσον αυτή υφίσταται, ή επί της ευθυγραμμίας πριν την κυκλική καμπύλη.

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και σχεδιασμού του τροχαίου υλικού, έχει συμβάλλει ώστε οι οριακές οριζοντιογραφικές ακτίνες κάτω των οποίων εφαρμόζεται διαπλάτυνση εύρους γραμμής, να είναι μικρότερες των R≤400 m. Όμως υπάρχει ακόμη τροχαίο υλικό παλαιότερης γενιάς, το οποίο κυκλοφορεί στα δίκτυα, για το οποίο απαιτείται διερεύνηση κατά πόσο μπορεί να κυκλοφορεί χωρίς πρόβλημα στις μικρότερες ακτίνες.

1.2 Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής, είναι η διερεύνηση ενός αριθμού σιδηροδρομικών οχημάτων με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά των

προαναφερόμενων παραμέτρων, ως προς την εγγραφή τους σε οριζοντιογραφικές καμπύλες με ακτίνα R≤400 m. Επίσης, θα γίνει αναφορά στην καταπόνηση των σιδηροτροχιών από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κύλιση των οχημάτων αυτών στις συγκεκριμένες καμπύλες.

Προς τούτο, θα ληφθούν στοιχεία από το υφιστάμενο σε λειτουργία τροχαίο υλικό του Οργανισμού Σιδηροδρόμων Ελλάδος (ΟΣΕ) σε συνδυασμό με τμήματα γραμμής του, με οριζοντιογραφικές καμπύλες ακτίνας R≤400 m.

Ας μου επιτραπεί η ένταξη της εργασίας αυτής κάτω από την γενικότερη ενότητα της τεχνικής κύλισης σιδηροδρομικών οχημάτων, υπό την επί μέρους ονομασία

«τεχνική καθοδήγησης του ίχνους»

1.3 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Κεφάλαιο 2ο: Γίνεται αναφορά στα χαρακτηριστικά του σιδηροδρόμου και ακολουθεί περιγραφή του τροχαίου υλικού, των χαρακτηριστικών της γραμμής και τέλος περιγράφεται η κύλιση επί των σιδηροτροχιών.

Κεφάλαιο 3ο: Περιγράφονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιήθηκαν (Μέθοδος Vogel και Μέθοδος Ελαχίστου του Heumann) και δίνονται χαρακτηριστικά παραδείγματα για κάθε μια.

Κεφάλαιο 4ο: Παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε για το τροχαίο υλικό του ΟΣΕ και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διερεύνηση.

Κεφάλαιο 5ο: Παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τη διερεύνηση.

Κεφάλαιο 6ο: Γίνονται εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα.

Κεφάλαιο 2ο: Γενικά

2.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος ΄΄Σιδηρόδρομος΄΄

Ο σιδηρόδρομος είναι μέσο σταθερής τροχιάς όπου οχήματα με μεταλλικούς τροχούς φέροντες όνυχες στην εσωτερική τους πλευρά, κινούνται σε αποκλειστικά δικό τους διάδρομο κυκλοφορίας που ορίζεται από δυο παράλληλες, σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους χαλύβδινες σιδηροτροχιές (σταθερή τροχιά).

Στις τεχνικές συνιστώσες του συστήματος περιλαμβάνονται:

- το τροχαίο υλικό, δηλαδή όλα τα οχήματα που κινούνται μέσω χαλύβδινων τροχών στις σιδηροτροχιές
- ο σιδηροδρομικός διάδρομος, ο οποίος αποτελείται από την επιδομή και την υποδομή, δηλαδή τη σιδηροδρομική γραμμή
- το σύνολο των τεχνικών έργων και εγκαταστάσεων, που εξασφαλίζουν την ομαλή και ασφαλή λειτουργία του.

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, λαμβάνονται υπόψη μόνο επί μέρους συνιστώσες, που αφορούν στα τεχνικά χαρακτηριστικά των τροχοφόρων αξόνων, στη γεωμετρική διάταξη των φορείων καθώς και των τροχοφόρων αξόνων σε αυτά, ως και τη διάταξη μεμονωμένων τροχοφόρων αξόνων του τροχαίου υλικού, στα τεχνικά χαρακτηριστικά των σιδηροτροχιών καθώς και στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής με έμφαση στα καμπύλα τμήματα. Ειδικότερα, μεταξύ των παραμέτρων που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι:

- η απόσταση μεταξύ των φορείων (απόσταση ομφαλών φορείων) καθώς και το μεταξόνιο (απόσταση τροχοφόρων αξόνων ενός φορείου)
- η μορφή της διατομής των τροχών
- το ίχνος καθοδήγησης
- το εύρος γραμμής

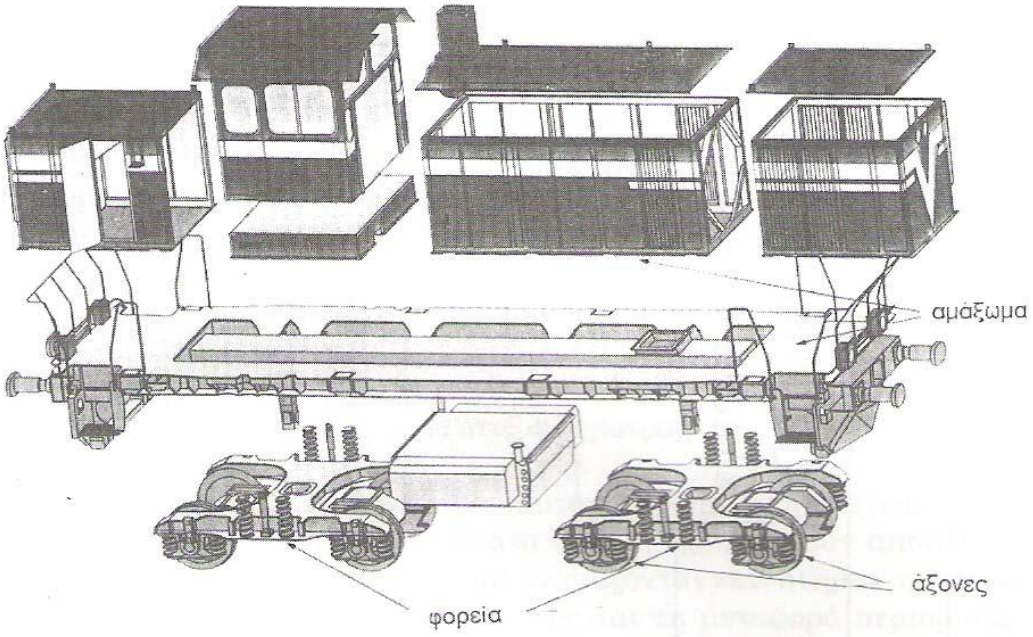
2.2 Τροχαίο υλικό

Το τροχαίο υλικό περιλαμβάνει κάθε είδους σιδηροδρομικό όχημα που κινείται επί της σιδηροδρομικής γραμμής. Σιδηροδρομικά οχήματα μπορεί να είναι:

- επιβατικά οχήματα
- εμπορικά οχήματα κλειστού ή ανοικτού τύπου
- ειδικά οχήματα (π.χ. πλατφόρμες μεταφοράς υλικού)
- μηχανές έλξης

- μηχανήματα συντήρησης γραμμής

Κάθε σιδηροδρομικό όχημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη: το αμάξωμα, τα φορεία και τους τροχοφόρους άξονες (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Σιδηροδρομικό όχημα (αμάξωμα, φορεία, τροχοφόροι άξονες)

2.2.1 Αμάξωμα

Αμάξωμα [2] καλείται το τμήμα του οχήματος που βρίσκεται πάνω από το πλαίσιο των φορείων και στηρίζεται επί αυτών. Στο αμάξωμα επιβιβάζονται οι επιβάτες που ταξιδεύουν (επιβατικά οχήματα), τοποθετούνται τα εμπορεύματα που μεταφέρονται (εμπορικά οχήματα) ή προσαρμόζονται, ο θάλαμος οδήγησης και το σύστημα έλξης (έλκοντα οχήματα). Η διαμόρφωση του αμαξώματος εξαρτάται άμεσα από τη λειτουργικότητα του οχήματος.

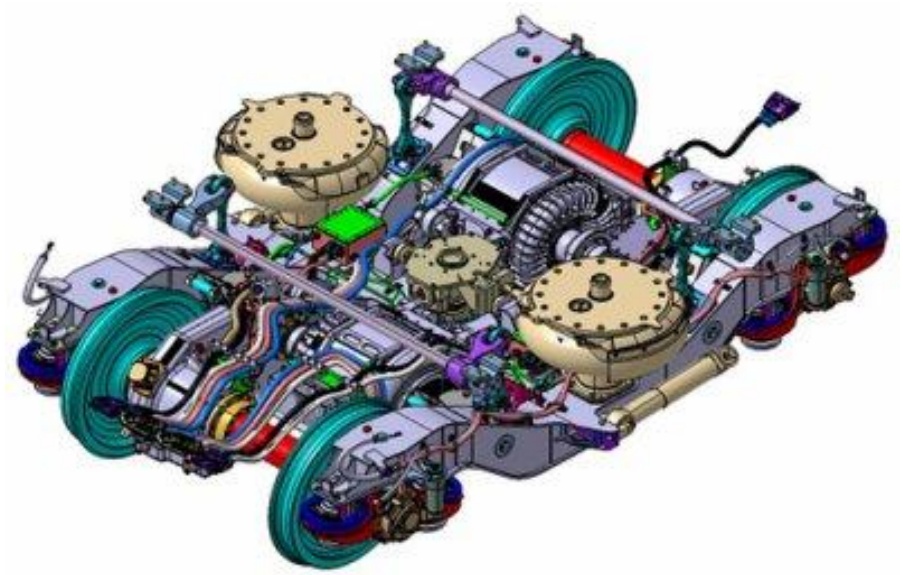
2.2.2 Φορεία

Τα φορεία [2] αποτελούν τη βάση πάνω στην οποία τοποθετείται το αμάξωμα. Εξασφαλίζουν την ευσταθή κύλιση των οχημάτων και μεταφέρουν τα κατακόρυφα φορτία μέσω των τροχοφόρων αξόνων στη γραμμή. Τέλος, περιορίζουν τις κατακόρυφες και εγκάρσιες ταλαντώσεις του οχήματος εξασφαλίζοντας το καλύτερο επίπεδο δυναμικής άνεσης στους επιβάτες.

Τα σύγχρονα οχήματα διαθέτουν συνήθως δυο φορεία. Κάθε φορείο μπορεί να έχει δυο τροχοφόρους άξονες (διαξονικό φορείο) ή τρεις τροχοφόρους άξονες (τριαξονικό φορείο), συνήθως στις μηχανές έλξης.

Τεχνολογίες φορείων

Σήμερα χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε έλκοντα και ελκόμενα οχήματα τα **συμβατικά ή κλασικά φορεία**. Στην τεχνολογία αυτή τα φορεία είναι εφοδιασμένα με τροχοφόρους άξονες των οποίων οι δυο τροχοί είναι άκαμπτα συνδεδεμένοι με το σώμα του άξονα με αποτέλεσμα σώμα άξονα και τροχοί να στρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα (κλασικοί άξονες). Το πλαίσιο των φορείων συνδέεται με το αμάξωμα και τους άξονες με τη βοήθεια ελατηρίων και αποσβεστήρων. Υπάρχουν διάφοροι τύποι συμβατικών φορείων. Η επιλογή τους και ο σχεδιασμός τους εξαρτάται άμεσα από τη λειτουργικότητα των οχημάτων που θα εξοπλίσουν και από τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της γραμμής στην οποία θα κυκλοφορούν.



Εικόνα 2.2: Φορείο

Αρθρωτά και μη-αρθρωτά φορεία (articulated and non-articulated bogies) [3],[4]:

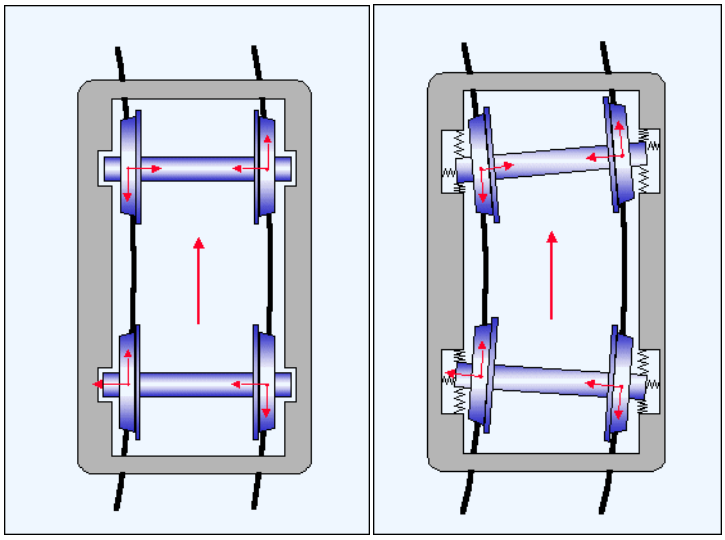
Τα φορεία χωρίζονται σε αρθρωτά και μη ανάλογα με την ανάρτηση. Συνήθως, δυο μη-αρθρωτά φορεία στηρίζουν ένα αμάξωμα, ενώ ένα αρθρωτό φορείο στηρίζει το πίσω μέρος του μπροστινού αμαξώματος και το μπροστινό μέρος του πίσω αμαξώματος (Εικόνα 2.3). Τα μη-αρθρωτά φορεία έχουν επικρατήσει επειδή έχουν

πιο απλή δομή και συντηρούνται πιο εύκολα, παρότι τα αρθρωτά προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση.

Εικόνα 2.3: Αρθρωτό φορείο

Καθοδηγούμενων (steerable bogies) αξόνων και μη-καθοδηγούμενων αξόνων [3],[4]:

Υπάρχουν φορεία που κατευθύνονται στις καμπύλες μέσω του ιθυντήριου τροχού, οπότε στα κυκλικά τόξα οι άξονες έχουν υπερακτινική ή υποακτινική θέση, υπάρχουν όμως και φορεία που τρέπουν τους άξονες πάντα σε ακτινική θέση, είτε μέσω αυτοματοποιημένου συστήματος, είτε μέσω συστήματος εξαναγκασμού του άξονα σε ακτινική θέση. Τα φορεία αυτά, όμως, δεν χρησιμοποιούνται ευρέως, αλλά σε ελάχιστα τρένα υψηλών ταχυτήτων και όχι σε εμπορευματικούς συρμούς. (Εικόνα 2.4)

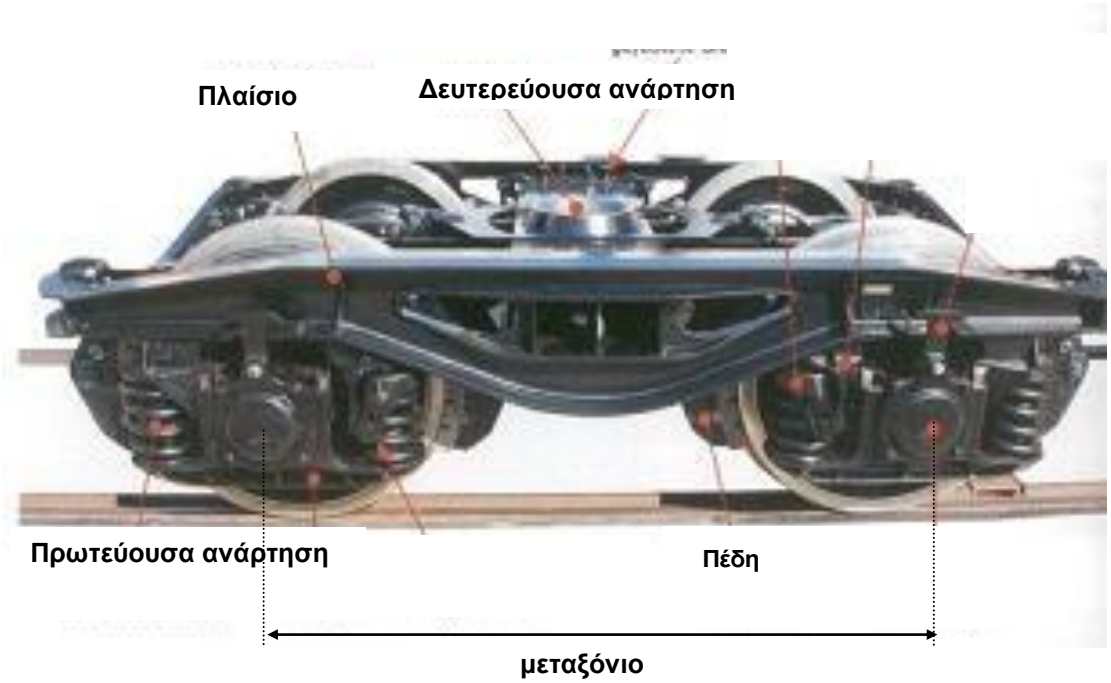


Εικόνα 2.4: Φορείο μη κατευθυνόμενων αξόνων (αριστερά)-Φορείο κατευθυνόμενων αξόνων (δεξιά)

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας θα διερευνηθούν φορεία με άκαμπτους τροχοφόρους άξονες. Η βασική παράμετρος που λαμβάνεται υπόψη κατά τη διερεύνηση, είναι το **μεταξόνιο**.

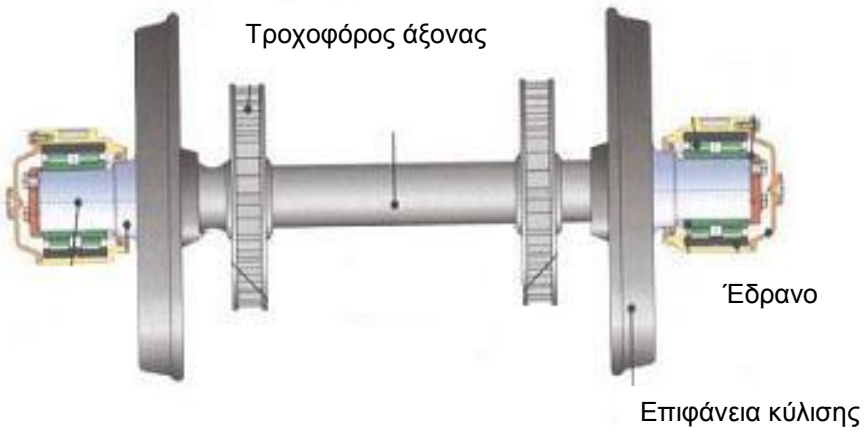
2.2.3 Τροχοφόροι Άξονες

Οι τροχοφόροι άξονες μεταβιβάζουν τα φορτία στις σιδηροτροχιές και εξασφαλίζουν την ομαλή κύλιση του οχήματος στην ευθυγραμμία και στις καμπύλες. Αποτελούνται από τρία κύρια στοιχεία [2]: το σώμα του άξονα, τους δυο τροχούς και τα λιποκιβώτια.



Εικόνα2.5: Φορείο-Μεταξόνιο

Εικόνα 2.6: Συζευγμένο σύστημα τροχών-άξονα (τροχοφόρος άξονας)

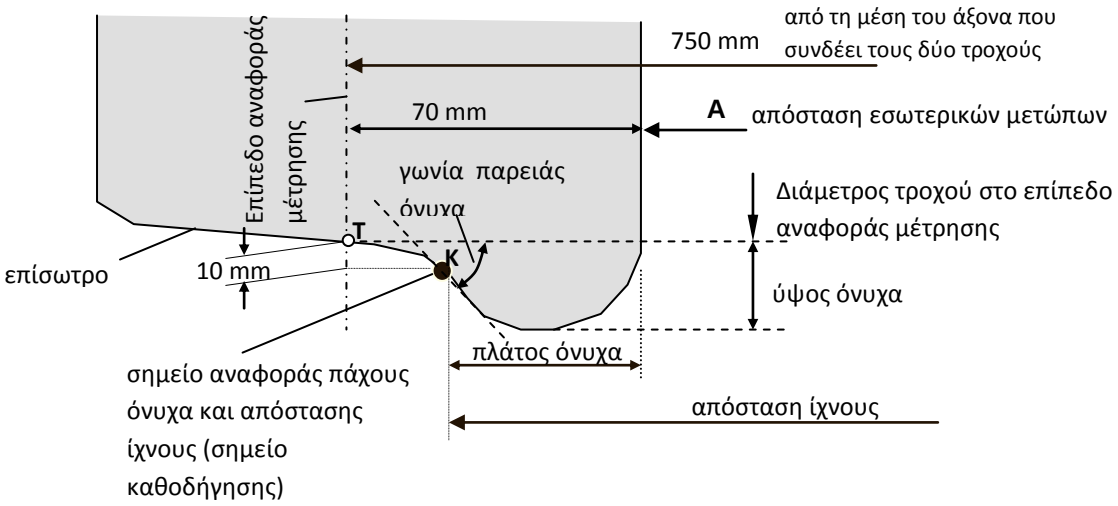


2.2.4 Τροχός

Ο τροχός αποτελείται από το κύριο σώμα, επί του οποίου περιφερειακά βρίσκεται η επιφάνεια κύλισης, και από τον όνυχα. Ο όνυχας βρίσκεται από την πλευρά του τροχού που βλέπει προς το εσωτερικό της γραμμής.

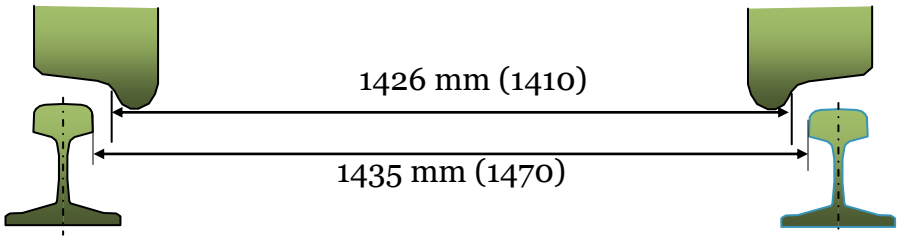
Η διατομή του τροχού στην περιοχή της επιφάνειας κύλισης είναι κωνικής μορφής (βλ. Κεφ.2.4). Από τη μέση του σώματος του άξονα που συνδέει τους δύο τροχούς και σε 750 mm, χαρακτηρίζεται το επίπεδο αναφοράς μέτρησης της διαμέτρου του τροχού.

Από τη θέση ''τομή επιπέδου και επιφάνειας κύλισης'' (σημείο Τ) και σε 10 mm προς τα κάτω επί της παρειάς του όνυχα, ορίζεται το σημείο αναφοράς του ίχνους ή σημείο καθοδήγησης (σημείο Κ). Επίσης, από τη θέση αυτή (σημείο Τ) μετράται το ύψος του όνυχα, ενώ από το σημείο καθοδήγησης Κ το πλάτος του όνυχα. Το πλάτος του όνυχα συμμετέχει υπό προϋποθέσεις στην εγγραφή των φορείων. (Σχ.2.1)



Σχήμα 2.1: Διατομή τροχού με τα κυριότερα στοιχεία του

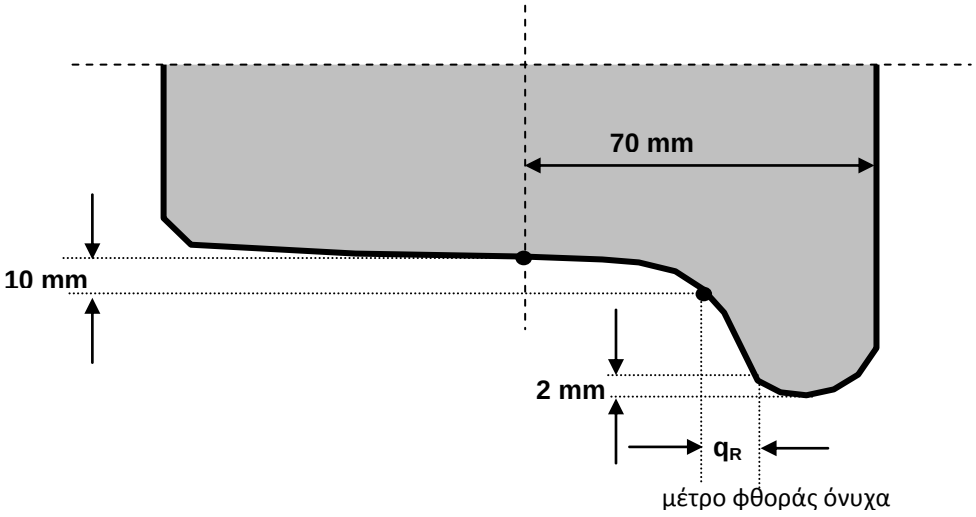
Η απόσταση του ίχνους αποτελεί σημαντική παράμετρο στη διερεύνηση της εγγραφής του οχήματος. Ορίζεται μεταξύ των σημείων αναφοράς απόστασης ίχνους (σημείο Κ, βλ. Σχ.2.1) των δύο τροχών ενός τροχοφόρου άξονα. Η τιμή της στην γραμμή κανονικού εύρους**, είναι 1426 mm,** με ελάχιστο τα 1410 mm. Μαζί με το εύρος της γραμμής καθορίζει το διάκενο **δ** μεταξύ τροχοφόρου άξονα και γραμμής.



Σχήμα 2.2: Απεικόνιση εύρους και ίχνους

Στοιχείο q_R

Το στοιχείο $\mathbf{q_R}$ στον όνυχα, είναι αυτό που δείχνει πόσο υλικό μπορεί να φθαρεί κατά τη διάρκεια λειτουργίας, μέχρι ο τροχός να συντηρηθεί (reprofiling).



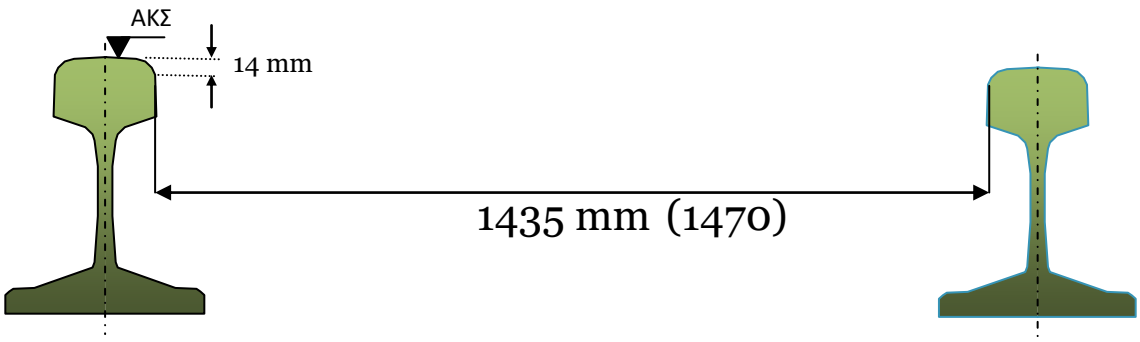
Σχήμα 2.3: Μέτρηση q_R

2.3 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γραμμής

Ως γραμμή στο επίπεδο κύλισης νοείται το σώμα που αποτελείται από τις δύο σιδηροτροχιές σε σταθερή απόσταση μεταξύ των, συνδεδεμένων σταθερά επί των εγκάρσιων διαδοκίδων (στρωτήρες). Η απόσταση των δυο σιδηροτροχιών ονομάζεται **εύρος γραμμής**.

Εύρος γραμμής

Ως εύρος γραμμής, σύμφωνα με τις Ευρωπαϊκές προδιαγραφές, νοείται η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των εσωτερικών παρειών των δύο σιδηροτροχιών. Μετράται σε 14 mm κάτω από την Άνω στάθμη Κεφαλής Σιδηροτροχιάς (ΑΚΣ). Στις γραμμές κανονικού εύρους, το εύρος ορίζεται στα 1435 mm με ελάχιστη τιμή τα 1430 mm και μέγιστη τιμή τα 1470 mm, λόγω διαπλάτυνσης ή φθοράς.



Σχήμα 2.4: Θέση μέτρησης εύρους γραμμής

Στις οριζοντιογραφικές καμπύλες με ακτίνα R≤400 m, η διαπλάτυνση φθάνει μέχρι τα 20 mm και επιτυγχάνεται σταδιακά, εντός της καμπύλης συναρμογής.

Τα γεωμετρικά στοιχεία που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό μιας σιδηροδρομικής γραμμής οριζοντιογραφικά είναι:

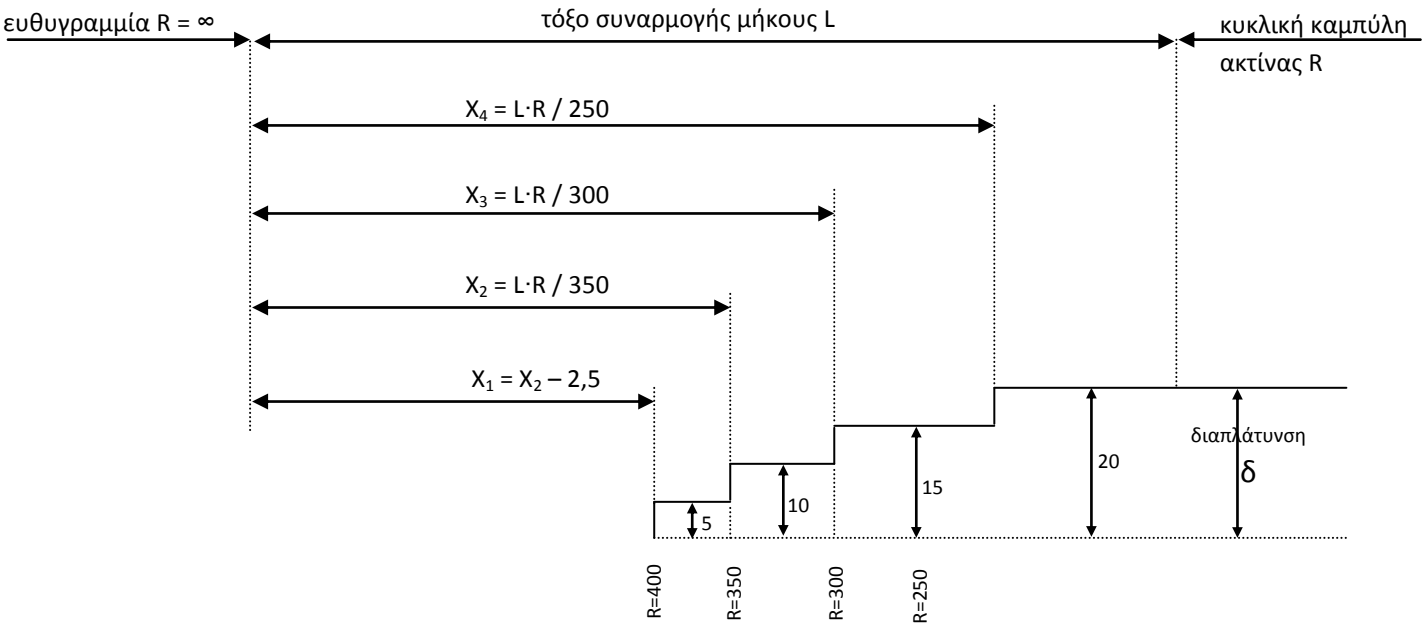
- η ευθεία γραμμή
- η κυκλική καμπύλη και
- η καμπύλη συναρμογής ή τόξο συναρμογής.

Σε δίκτυα στα οποία η χάραξη αποτελείται από οριζοντιογραφικές καμπύλες με ακτίνες κάτω μιας ορισμένης τιμής, θεωρείται αναγκαία η αύξηση του εύρους βαθμηδόν κατά 5 mm έως 20 mm. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **διαπλάτυνση εύρους.** Η κατώτατη τιμή της ακτίνας από την οποία και προς τα κάτω αρχίζει η διαπλάτυνση εύρους, εξαρτάται από τον τύπο του τροχαίου υλικού που κυκλοφορεί στο υπόψη δίκτυο. Σήμερα με την εξέλιξη της τεχνολογίας του τροχαίου υλικού, η τιμή αυτή είναι στα 170 m. Όμως επειδή στα περισσότερα δίκτυα υφίσταται πλήθος παλαιότερου τροχαίου υλικού, η τιμή αυτή μπορεί να αρχίζει από τα 400m (βλ. Πιν.2.1 από κανονισμό ΟΣΕ).

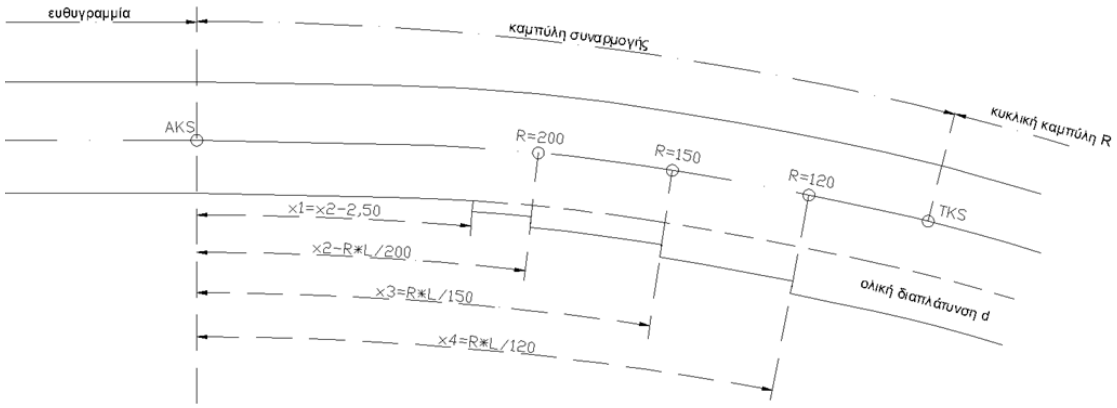
Ακτίνα καμπύλης (m)	Διαπλάτυνση (mm)	Εύρος γραμμής (mm)
R ≥ 400	0	1435
400 > R ≥ 350	5	1440
350 > R ≥ 300	10	1445
300 > R ≥ 250	15	1450
R < 250	20	1455

Πίνακας 2.1: Κανονισμός ΟΣΕ για διαπλατύνσεις

Σύμφωνα με τους αυστριακούς και ελληνικούς κανονισμούς η διαπλάτυνση μπορεί να επιτευχθεί με τις ακόλουθες διατάξεις:



Σχήμα 2.5: Σταδιακή εφαρμογή διαπλάτυνσης (Ελληνικός Κανονισμός)



Σχήμα 2.6: Σταδιακή εφαρμογή διαπλάτυνσης (Αυστριακός Κανονισμός)

2.4 Κύλιση

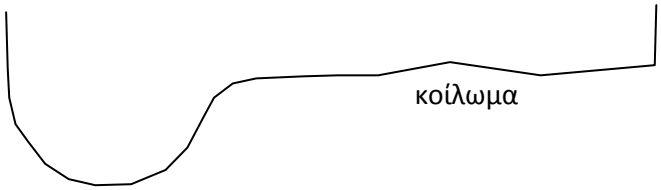
Η κύλιση των οχημάτων γίνεται επί της Άνω στάθμης Κεφαλής των Σιδηροτροχιών (ΑΚΣ) μέσω των τροχοφόρων αξόνων, οι τροχοί των οποίων έχουν κολουροκωνική επιφάνεια κύλισης με ελαφρά κλίση προς τον άξονα της γραμμής [1]. Το περίγραμμα της κωνικότητας αποτελείται από περισσότερα ομόρροπα τόξα διαφορετικών ακτίνων ή από σύνθεση διαφόρων κλίσεων (σχήματα S1002 και DB με κλίσεις). Η μορφή αυτή διατηρεί το όχημα (το επανακεντράρει) περί τον άξονα της γραμμής (οφιοειδής κίνηση) στην ευθυγραμμία, ενώ στις καμπύλες εξισώνει κατά το δυνατόν τη διαφορά μήκους μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής σιδηροτροχιάς. Η κλίση της σιδηροτροχιάς, συνήθως 1:20 έως 1:40 ως προς την κατακόρυφο, σε συνδυασμό με την κωνικότητα των επισώτρων, βοηθάει στην ευστάθεια και στην ομαλότερη κύλιση των συρμών.

Για να υπάρχει κατά την κύλιση η δυνατότητα εναλλαγής των διαφόρων ακτίνων που περιλαμβάνονται σε έναν τροχό, δίνεται στον τροχοφόρο άξονα η δυνατότητα για μετατόπιση δεξιά και αριστερά του άξονα της γραμμής, εντός ενός διακένου που προκύπτει από τη διαφορά εύρους γραμμής και ίχνους γραμμής (βλ. Κεφ. 2.2.3). Επίσης, κατασκευαστικοί λόγοι επιβάλλουν το διάκενο αυτό, καθόσον απόλυτη επίτευξη του αναγκαίου εύρους γραμμής σε όλο το μήκος της γραμμής είναι πρακτικά ανέφικτο.

2.4.1 Στην ευθυγραμμία

Ένας τροχοφόρος άξονας [7] (ή ένα φορείο) με κυλινδρικούς τροχούς, ο οποίος για μια στιγμή θα έρθει σε επαφή με την εσωτερική παρειά μιας εκ των δύο σιδηροτροχιών (ακόμη και στην ευθυγραμμία), θα διατηρήσει την επαφή του αν δεν υφίσταται δράση από εξωτερική αιτία (π.χ. από σφάλμα γραμμής) η οποία θα

διακόψει την επαφή αυτή. Θα υπάρχει, λοιπόν, μακράς διάρκειας μονόπλευρη επαφή, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ελαφρό κοίλωμα στην επιφάνεια κύλισης του τροχού με κωνικές πλευρές αντιθέτου κλίσης.



Εικόνα 2.7: Δημιουργία κοιλώματος σε κυλινδρικούς τροχούς μετά από μονόπλευρη επαφή μεγάλης διάρκειας

Η δημιουργία των κοιλωμάτων επιφέρει ασταθή κύλιση των τροχών, κάτι που στους τροχούς με κωνική μορφή του επισώτρου θα χρειαζόταν πολύ καιρό να γίνει, στους δε τροχούς S1002 με προβλεπόμενη φθορά σχεδόν δεν θα εμφανιζόταν πριν την προκαθορισμένη συντήρηση.

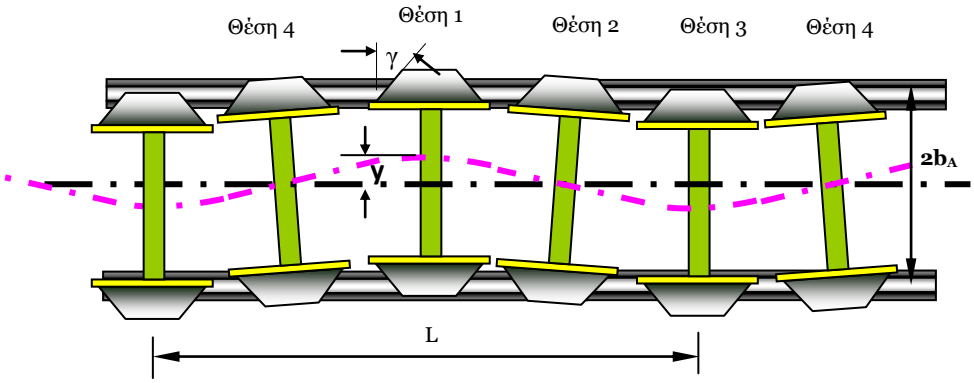
Ακόμη και αν οι τροχοί ενός τροχοφόρου άξονα μετά την επεξεργασία τους από τους τόρνους, είχαν εντελώς ίδια διάμετρο, λόγω διαφορετικής σκληρότητας του υλικού στην επιφάνεια κύλισης θα δημιουργούντο ελαφρές διαφοροποιήσεις στη διάμετρό τους. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα ό ένας τροχός με τη μεγαλύτερη διάμετρο να προηγείται και να ωθεί τον απέναντι τροχό να κυλίει με τον όνυχα στην εσωτερική παρειά της απέναντι σιδηροτροχιάς.

Από τη στιγμή που δημιουργούνται διαφοροποιήσεις στη διάμετρο, η κατάσταση δεν επανέρχεται.

Με τους κωνικά διαμορφωμένους τροχούς, επιτυγχάνεται το επανακεντράρισμα του τροχοφόρου άξονα στη γραμμή ως εξής:

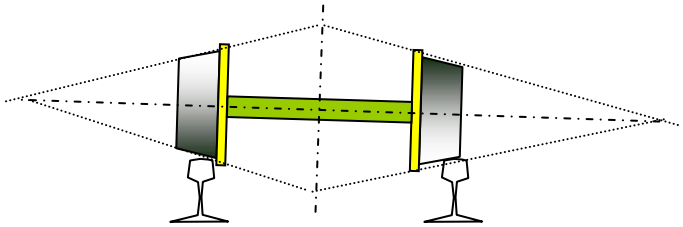
Όταν ένας άξονας δεν βρίσκεται ακριβώς στη μέση των σιδηροτροχιών αλλά ελαφρά μετατοπισμένος π.χ. προς τα αριστερά (θέση 1), τότε ο αριστερός τροχός κυλίει με τη μεγαλύτερη ακτίνα από ότι ο δεξιός τροχός. Επειδή και οι δύο τροχοί είναι συνδεδεμένοι σταθερά με τον άξονα έχουν την ίδια γωνιακή ταχύτητα. Επομένως, ο αριστερός τροχός διανύει μεγαλύτερη απόσταση από ότι ο δεξιός, δηλαδή ο αριστερός τροχός “προπορεύεται” του δεξιού και ο άξονας παίρνει μια πλάγια θέση ως προς τον άξονα της γραμμής (θέση 2). Στη συνέχεια κινείται προς το μέσο της γραμμής. Κινούμενος ο άξονας προς τα δεξιά, τα σημεία επαφής του τροχού με τη σιδηροτροχιά μετατοπίζονται επί της επιφάνειας κύλισης προς τα αριστερά. Έτσι η ακτίνα κύλισης του αριστερού τροχού μειώνεται, ενώ του δεξιού αυξάνεται. Στη θέση συνάντησης του μέσου του άξονα με τον άξονα της γραμμής οι δύο τροχοί κινούνται με ίσες ακτίνες (θέσεις 2 και 4), οπότε ο άξονας κινείται ευθύγραμμα, όμως λόγω της πλάγιας θέσης του προς την δεξιά σιδηροτροχιά. Η αύξηση της ακτίνας κύλισης του δεξιού έναντι του αριστερού τροχού συνεχίζεται,

με αποτέλεσμα ο δεξιός τροχός τώρα να είναι αυτός που διανύει μεγαλύτερη απόσταση από τον αριστερό, επομένως ο δεξιός τροχός “προπορεύεται” και κάποια στιγμή ο άξονας παίρνει θέση εγκάρσια ως προς τον άξονα της γραμμής (θέση 3) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται τώρα, όμως προς την αριστερή σιδηροτροχιά κ.ο.κ.

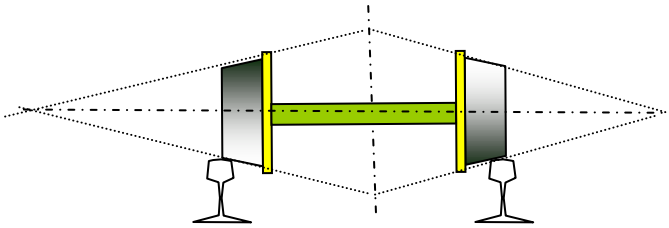


Εικόνα 2.7: Οφιοειδής κίνηση κατά Klingel

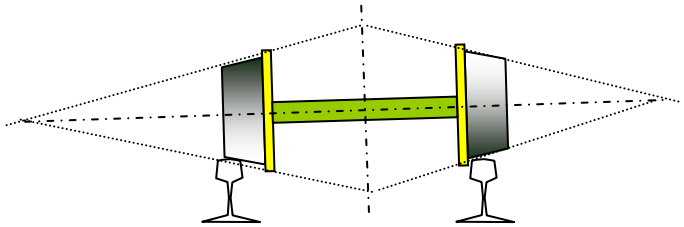
Θέση 1



Θέση 2



Θέση 3



Εικόνα 2.8: Κωνικότητα τροχών- συζευγμένο σύστημα τροχών/άξονα

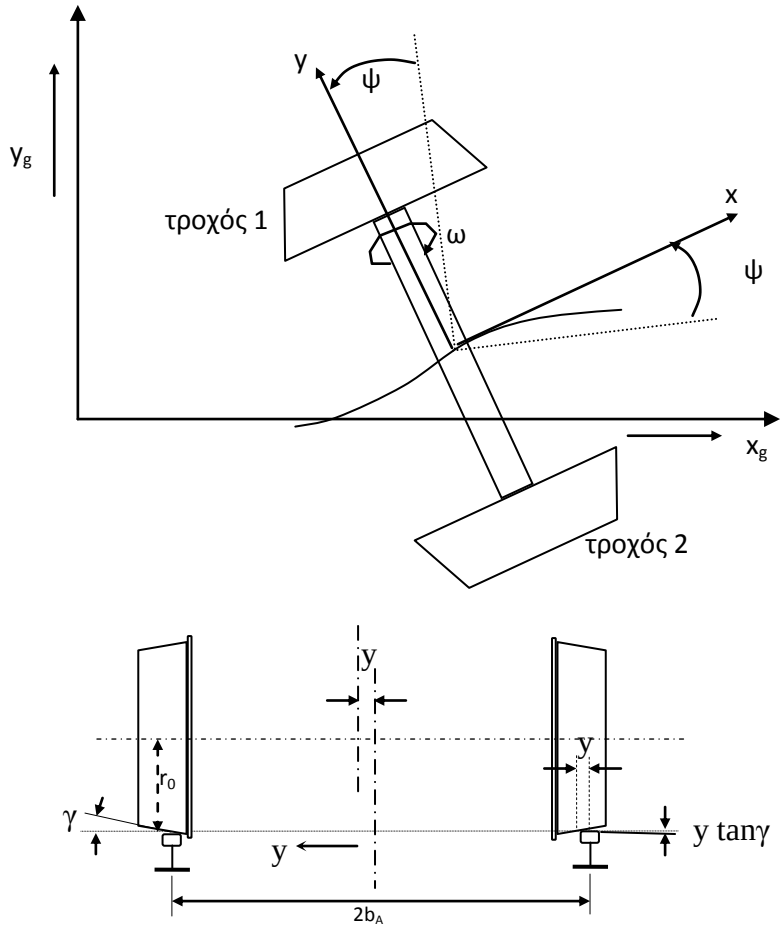
Με αυτές τις προϋποθέσεις η διαγραφόμενη καμπύλη πλησιάζει την ημιτονοειδή και για το λόγο αυτό ονομάζεται συχνά "ημιτονοειδής κίνηση του συρμού". Γενικότερα, είναι μια κυματοειδής μορφή κύλισης, η οποία περιγράφεται με τη σχέση **Klingel.**

Για τη σχέση του Klingel ισχύουν μερικές απλοποιημένες προϋποθέσεις όπως αναφέρονται στη συνέχεια. Επίσης, στο παρακάτω σχήμα παρατίθενται οι συμβολισμοί που θα χρησιμοποιηθούν για τη σχέση αυτή.

1. Ο τροχοφόρος άξονας αποτελεί άκαμπτο σώμα. Δεν δύναται ούτε να καμφθεί ούτε να δεχθεί στρέψη. Ως εκ τούτου και οι δύο τροχοί περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα ω και είναι πάντα παράλληλοι μεταξύ τους.
2. Το μέσον του τροχοφόρου άξονα έχει μόνο τον βαθμό ελευθερίας να κινείται κατά μήκος της γραμμής (x_g) και εγκάρσια του μέσου της γραμμής (y_g). Επίσης ο τροχοφόρος άξονας έχει την δυνατότητα περιστροφής κατά ψ ως προς τη κατά μήκος κατεύθυνση της γραμμής.
3. Η επιφάνεια κύλισης των τροχών (επίσωτρο), αποτελείται από κώνο με επίπεδο μανδύα χωρίς όνυχα.
4. Η επιφάνεια κύλισης των σιδηροτροχιών έχει πολύ μικρό πλάτος το σημείο επαφής του τροχού θεωρείται ότι δεν μετατίθεται εγκάρσια επί της σιδηροτροχιάς, μολονότι η κλίση της επιφάνειας κύλισης του τροχού μεταβάλλεται ως προς το επίπεδο ΑΚΣ, λόγω του ότι ο τροχοφόρος άξονας δέχεται μία πάρα πολύ μικρή κλίση.
5. Η εγκάρσια μετακίνηση y του μέσου του τροχοφόρου άξονα και κατ' επέκταση η στροφή του κατά τη γωνία ψ, παραμένουν πολύ μικρές, επειδή το y δεν μπορεί να γίνει μεγαλύτερο από το μισό της διαφοράς του εύρους μείον το ίχνος (τάξη μεγέθους επί της χιλίοις του μήκους κύματος L). Ως εκ τούτου μπορεί να τεθεί:

$$\tan\psi \sim \psi \sim \sin\psi$$

6. Το διάστημα διάνυσης του μέσου του τροχοφόρου άξονα στην κατεύθυνση x ίσο με αυτό στην κατεύθυνση x_g και η μετατόπιση των σημείων επαφής των τροχών επί της κωνικής επιφάνειας κατά την κίνηση στην κατεύθυνση y είναι ίση με y_g.
7. Οι τροχοί δεν ολισθαίνουν επί των σιδηροτροχιών, αλλά μόνο κυλίουν. Αυτό σημαίνει ότι οι τροχοί θα θεωρηθούν χωρίς μάζα που σημαίνει ότι δεν θα μεταφέρουν δυνάμεις.



Σχήμα 2.8: Κύριες παράμετροι σχέσης Klingel

Με βάση τις παραπάνω προϋποθέσεις μπορεί να ειπωθεί ότι:

Όταν, κατά την κυματοειδή κίνηση, το μέσον του τροχοφόρου άξονα κινηθεί πλευρικά από τον άξονα της γραμμής κατά y, μετακινείται επίσης το σημείο επαφής μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς κατά μήκος της κωνικής διατομής του τροχού. Στον τροχό 1 μεγαλώνει η ακτίνα κύλισης, στον τροχό 2 γίνεται μικρότερη. Έτσι:

$$r_1 = r_0 + y_g \, tan\gamma \qquad (2.1)$$

$$r_2 = r_0 - y_g \, tan\gamma \qquad (2.2)$$

$$\frac{r_1 + r_2}{2} = r_0 \qquad (2.3)$$

Κατά την περιστροφή του τροχοφόρου άξονα κατά την γωνία ω, οι τροχοί διανύουν το διάστημα:

$$dx_1 = r_1 \cdot d\omega \qquad (2.4)$$

$$dx_2 = r_2 \cdot d\omega \qquad (2.5)$$

Το διάστημα που διανύει το μέσον του τροχοφόρου άξονα (προϋπόθεση 5) είναι:

$$dx = dx_g = \frac{dx_1 + dx_2}{2} = d\omega \cdot \frac{r_1 + r_2}{2} = r_0 \cdot d\omega \qquad (2.6)$$

$$d\omega = \frac{1}{r_0} \cdot dx_g \qquad (2.7)$$

Η διαφορά του διαστήματος που διανύουν οι τροχοί 1 και 2 είναι:

$$dx_1 - dx_2 = d\omega \cdot (r_1 - r_2) = 2 \cdot y_g \cdot d\omega \cdot tan\gamma \qquad (2.8)$$

Η διαφορά αυτή έχει ως επακόλουθο μία μεταβολή της γωνίας περιστροφής **ψ** του τροχοφόρου άξονα και μάλιστα η γωνία ψ γίνεται μικρότερη (το dψ είναι αρνητικό).

$$d\psi = -\frac{dx_1 - dx_2}{2b_A} = -y_g \cdot d\omega \cdot \frac{2tan\gamma}{2b_A} \qquad (2.9)$$

Περιστρέφεται ο τροχοφόρος άξονας στην κατεύθυνση $\mathbf{y_g}$ κατά θετική γωνία ψ και το μέσον του κινείται προς τα εμπρός κατά το μήκος dx, τότε η μεταβολή της απόκλισης $\mathbf{y_g}$ του μέσου του από το μέσον της γραμμής (προϋπόθεση 5) είναι:

$$dy_g = \psi \cdot dx \text{ ή}$$

$$\frac{dy_g}{dx} = \psi \qquad (2.10)$$

Θέτοντας την σχέση (2.7) στην εξίσωση (2.9), έπεται:

$$d\psi = -y_g \cdot dx_g \frac{tan\gamma}{r_0 \cdot b_A}$$

$$\frac{d\psi}{dx_g} = -y_g \cdot \frac{tan\gamma}{r_0 \cdot b_A}$$

Παραγωγίζοντας την εξίσωση (2.10) ως προς x_g, προκύπτει:

$$\frac{d^2 y_g}{dx_g{}^2} = \frac{d\psi}{dx_g} = -y_g \cdot \frac{tan\gamma}{r_0 \cdot b_A}$$

$$\frac{d^2 y_g}{dx_g{}^2} + y_g \cdot \frac{tan\gamma}{r_0 \cdot b_A} = 0 \quad \text{ή}$$

$$y_g'' + y_g \cdot \frac{tan\gamma}{r_0 \cdot b_A} = 0 \qquad (2.11)$$

Για την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης χρησιμοποιείται η παρακάτω συνάρτηση:

$$y_g = C_1 cos\alpha \cdot x_g + C_2 \cdot sin\alpha \cdot x_g$$
$$y_g'' = -\alpha^2 (C_1 cos\alpha \cdot x_g + C_2 \cdot sin\alpha \cdot x_g) = -\alpha^2 \cdot y_g \quad (2.12)$$

Η πρώτη παραδοχή είναι ότι ο τροχοφόρος άξονας μετατοπίζεται εγκάρσια ως προς το μέσον της γραμμής κατά y_{g0}, αλλά ο άξονας περιστροφής του (άξονας y) μένει κάθετος στον άξονα της γραμμής, συνεπώς:

$$x_g = 0: \; y_g = y_{g0} \text{ και } \psi = y_g' = 0$$

θέτοντας τις τιμές αυτές στην εξίσωση (2.12), λαμβάνεται:

$$y_g = y_{g0} = C_1$$

$$y_g' = -C_1 \cdot \alpha \cdot sin\alpha \cdot x_g + C_2 \cdot \alpha \cdot cos\alpha \cdot x_g) = 0$$

$$C_2 \cdot \alpha = 0 \quad C_2 = 0$$

έτσι η συνάρτηση (2.12) απλοποιείται στη μορφή:

$$y_g = y_{g0} \cdot cos\alpha \cdot x_g \qquad (2.13)$$

$$y_g'' = y_{g0} \cdot \alpha^2 \cdot cos\alpha \cdot x_g \qquad (2.14)$$

θέτοντας τις σχέσεις αυτές στη σχέση (2.11), προκύπτει:

$$-y_{g0} \cdot \alpha^2 \cdot cos\alpha \cdot y_{g0} \cdot \frac{tan\gamma}{r_0 \cdot b_A} \cdot cos\alpha \cdot x_g = 0$$

$$y_{g0} \cdot cos\alpha \cdot x_g \cdot (-\alpha^2 + \frac{tan\gamma}{r_0 \cdot b_A}) = 0 \qquad (2.15)$$

Μία λύση στην εξίσωση αυτή είναι y_{g0} = 0. Η περίπτωση αυτή είναι η κύλιση στην ευθυγραμμία χωρίς κυματοειδή μορφή και ως εκ τούτου δεν παρουσιάζει ενδιαφέρον. Η δεύτερη λύση δίνεται από τον μηδενισμό της παρένθεσης, επομένως:

$$\alpha = \sqrt{\frac{tan\gamma}{r_0 \cdot b_A}} \qquad (2.16)$$

Ένα πλήρες κύμα έχει πραγματοποιηθεί όταν

$$\alpha \cdot x_g = 2\pi$$

δηλαδή όταν

$$x_g = L = \frac{2\pi}{\alpha} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{r_0 \cdot b_A}{tan\gamma}} \qquad (2.17)$$

αυτή είναι η σχέση Klingel.

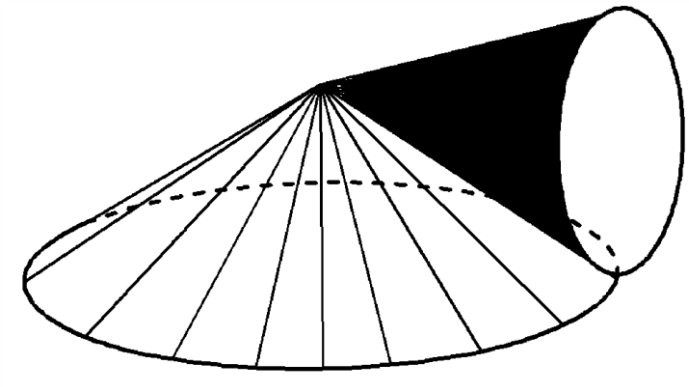
Στην πραγματικότητα η κίνηση ενός σιδηροδρομικού άξονα και ιδίως ενός πλήρους οχήματος (αμάξωμα και φορεία) είναι πολύ πιο σύνθετη. Η παρουσία των δυνάμεων ψευδολίσθησης και των δυνάμεων βαρύτητας στην επιφάνεια επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς και η μεταβλητή κωνικότητα των τροχών δεν επιτρέπουν την καθαρή κύλιση των τροχών και προσδίδουν στην κίνηση του άξονα δυναμική συμπεριφορά. Οπότε, οι δυνάμεις ψευδολίσθησης και βαρύτητας ενεργοποιούν το μηχανισμό της οφιοειδούς κίνησης του άξονα.

Η κίνηση αυτή στις μικρές ταχύτητες είναι ευσταθής και εξασφαλίζει τη φυσική καθοδήγηση του μεμονωμένου άξονα. Πέρα, όμως, από μια ταχύτητα η κίνηση γίνεται ασταθής δημιουργώντας ταλαντώσεις μεγάλου εύρους που περιορίζονται από την παρουσία των σιδηροτροχιών. Για το λόγο αυτό έχουμε και την εισαγωγή των φορείων στα οχήματα.

2.4.2 Στην καμπύλη

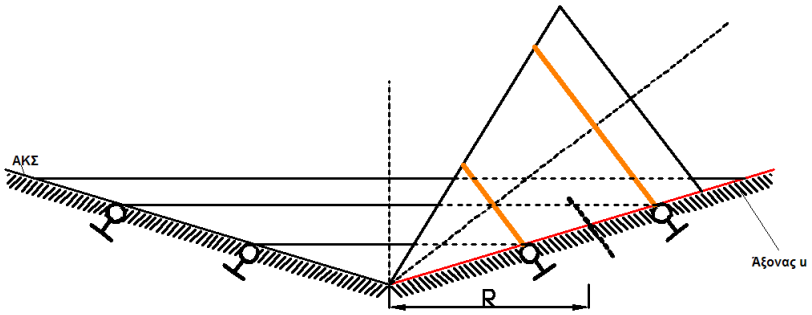
Για να κινείται ένα στερεό σώμα επί μιας στερεάς υπόβασης (διάδρομος κίνησης) σε κυκλική καμπύλη με καθαρή κύλιση θα πρέπει τα δυο σώματα να έχουν τη μορφή κώνου με κοινή κορυφή το κέντρο περί του οποίου διαγράφεται η κυκλική κίνηση [7]. Ο διάδρομος κίνησης νοείται ως ορθός κώνος μικρού ύψους, ενώ το κυλιόμενο σώμα ως ορθός κώνος μεγάλου ύψους ή ορθός κόλουρος κώνος. Η κορυφή των κώνων δε χρειάζεται να υφίσταται υλικοτεχνικά, αρκεί η επαφή να

γίνεται μεταξύ των κωνικών επιφανειών για να είναι δυνατή η κύλιση χωρίς ολίσθηση.



Εικόνα 2.9: Κυλιόμενος κώνος επί κωνικής έδρασης

Μεταφέροντας το σκεπτικό αυτό σε μια κυκλική σιδηροδρομική γραμμή όπου η άνω στάθμη κεφαλής της σιδηροτροχιάς ένα ανεστραμμένο ορθό κώνο (κορυφή προς τα κάτω). Αν το σώμα που κινείται είναι ορθός κώνος του οποίου η κορυφή συμπίπτει με την κορυφή του κώνου της ΑΚΣ, τότε είναι δυνατή η κύλιση χωρίς ολίσθηση. Στην περίπτωση αυτή, οι δύο τροχοί ενός άξονα αντιστοιχούν σε δυο επίπεδα τα οποία θεωρείται ότι περικλείονται στον κώνο αυτό και είναι παράλληλα στη βάση του, όπου ο άξονας περιστροφής των δυο τροχών συμπίπτει με τον άξονα του κώνου. ***Παρατηρείται ότι η ακτίνα κύλισης του εξωτερικού τροχού πρέπει να είναι μεγαλύτερη αυτής του εσωτερικού*** για να είναι δυνατή η κύλιση χωρίς ολίσθηση.



Εικόνα 2.10: Άξονας ως κυλιόμενο σώμα

Η κωνικότητα, λοιπόν, προσδίδει τα εξής πλεονεκτήματα:

I. Αποφυγή κατά το δυνατόν της ολίσθησης τροχών στις καμπύλες

Η διανυόμενη απόσταση στις καμπύλες είναι διαφορετική για κάθε τροχό. Καθώς οι τροχοί ενός άξονα είναι (στα περισσότερα οχήματα) σταθερά συνεζευγμένοι, η διάνυση διαφορετικών αποστάσεων με την ίδια γωνιακή ταχύτητα των τροχών (περίπτωση κυλινδρικών και όχι κωνικών τροχών) υποχρεώνει σε ολίσθηση τον ένα

ή και τους δυο τροχούς. Η κολουροκωνική διαμόρφωση της επιφάνειας κύλισης των τροχών επιτρέπει τη διαφοροποίηση της ακτίνας στη περιοχή επαφής τροχού – σιδηροτροχιάς. Έτσι, κατά την κίνηση του άξονα σε καμπύλη, ο εξωτερικός τροχός κυλίει με μεγαλύτερη ακτίνα ενώ ο εσωτερικός με μικρότερη. Αποτέλεσμα τούτου είναι ο εξωτερικός τροχός να διανύει μεγαλύτερο μήκος από τον εσωτερικό, εξισώνοντας όσο το δυνατό τη διαφορά μήκος εξωτερικής και εσωτερικής σιδηροτροχιάς. Με άλλα λόγια ο τροχοφόρος άξονας τείνει προς την ακτινική θέση επί της γραμμής, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της γωνίας πρόσπτωσης του όνυχα του εσωτερικού τροχού επί της σιδηροτροχιάς.

II. *Μείωση του κινδύνου τοπικών φθορών*

Κατά την επαφή τροχού – σιδηροτροχιάς αναπτύσσονται στην περιοχή επαφής φαινόμενα ψευδολίσθησης και αντίστοιχων φθορών. Σε περίπτωση κυλινδρικής επιφάνειας τροχού, ιδιαίτερα στις ευθυγραμμίες και όταν δε δρα κάποια εξωτερική δύναμη, η περιοχή επαφής τείνει να παραμένει στον ίδιο δακτύλιο του κυλίνδρου, με αποτέλεσμα την πρόκληση τοπικών φθορών είχε ως συνέπεια τη μείωση της ακτίνας κύλισης του ενός τροχού με αποτέλεσμα ο απέναντι τροχός να διανύει μεγαλύτερη απόσταση, φέρνοντας έτσι τον άξονα σε πλάγια θέση ανεπιστρεπτή.

III. *Μείωση επιπτώσεων από ανοχές κατασκευής*

Η κατασκευή των τροχών δεν μπορεί να διασφαλίσει μηδενικές αποκλίσεις από την επιθυμητή γεωμετρία και το επιθυμητό υλικό. Η εξ’ αρχής διαφοροποίηση των ακτίνων (κολουροκωνική επιφάνεια) δίνει τη δυνατότητα άρσης των διαφορών αυτών.

Κεφάλαιο 3ο: Εγγραφή οχήματος στην καμπύλη

3.1 Εισαγωγή

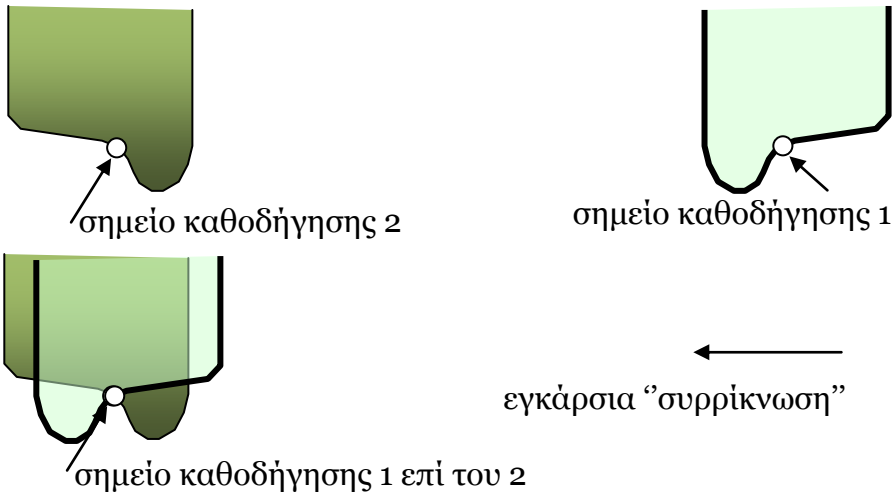
Το σημαντικότερο ερώτημα στην τεχνική καθοδήγησης του ίχνους (βλ. Κεφ. 2.2.4) είναι **''αν το όχημα εγγράφεται στην καμπύλη''** χωρίς δυσκολία και με όσο το δυνατόν μικρότερη καταπόνηση των σιδηροτροχιών. (βλ.Πιν.2.1)

Οι εγκάρσιες αποστάσεις μεταξύ όνυχα και σιδηροτροχιάς είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις διαστάσεις του ενός οχήματος ή ακόμη κι ενός τροχοφόρου άξονα. Έτσι, η σχεδιαστική απεικόνιση του συστήματος αυτού, απαιτεί μία μέθοδο, με την οποία θα εμφανίζεται μόνο η κατανομή του διακένου μεταξύ όνυχα και σιδηροτροχιάς. Προς τούτο χρησιμοποιείται η μέθοδος Vogel.

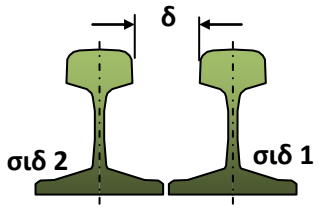
3.2 Μέθοδος Vogel

Γίνεται η θεώρηση ότι ο τροχοφόρος άξονας ''συρρικνώνεται'' εγκάρσια μέχρι τα δύο σημεία καθοδήγησης συμπέσουν το ένα επί του άλλου (σημείο καθοδήγησης 1 επί του 2, Εικ.3.1), συνεπώς μηδενίζεται η απόσταση ίχνους.

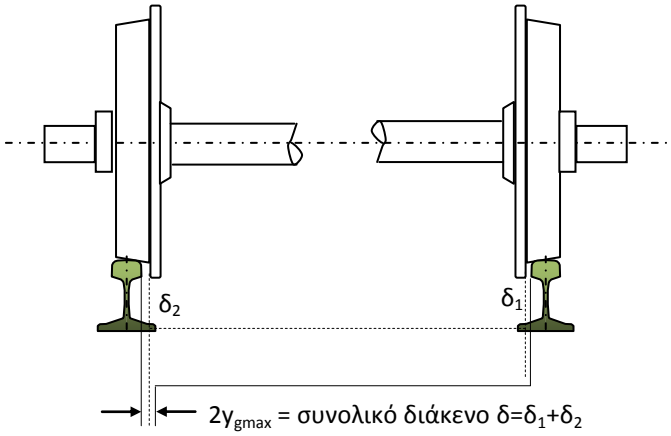
Κατά τη συρρίκνωση, αναγκαστικά μετακινείται και η σιδηροτροχιά 1 προς την σιδηροτροχιά 2. Έτσι όταν τα δύο σημεία καθοδήγησης συμπέσουν, τότε το εναπομείναν διάστημα είναι το διάκενο **δ** μεταξύ του εύρους γραμμής και του ίχνους (Εικ.3.2).



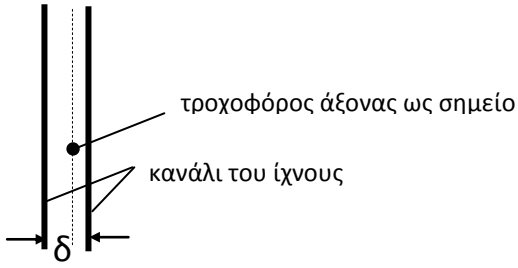
Εικόνα 3.1: Εγκάρσια συρρίκνωση τροχοφόρου άξονα



Εικόνα 3.2: Μηδενισμός απόστασης ίχνους



Εικόνα 3.3: Συνολικό διάκενο



Εικόνα 3.4: Κανάλι ίχνους και τροχοφόρος άξονας ως σημείο

Συνεχίζοντας την απεικόνιση του ίχνους για όλη τη γραμμή, δημιουργείται το **''κανάλι του ίχνους''** τα όρια του οποίου δεξιά και αριστερά αποτελούνται από την εσωτερική παρειά των σιδηροτροχιών.

Όπως προαναφέρθηκε, ο τροχοφόρος άξονας μετά την συρρίκνωσή του, απεικονίζεται ως σημείο, το οποίο κινείται εντός του καναλιού ίχνους. Η απεικόνιση αυτή παρά την απλότητά της, αρκεί για τον σκοπό της υπόψη διερεύνησης, καθόσον το ενδιαφέρον επικεντρώνεται μόνο στη καθοδήγηση του τροχοφόρου άξονα.

Επίσης, η μέθοδος αυτή περιέχει απλοποιήσεις όπως:

- Το κανάλι του ίχνους περιορίζεται σταθερά από την εσωτερική παρειά των δύο σιδηροτροχιών, ενώ στη πραγματικότητα λόγω της εγκάρσιας δυναμικής του οχήματος, το σημείο επαφής μεταξύ τροχού και σιδηροτροχιάς δεν σταματάει σε σταθερό σημείο αλλά μετακινείται στη κοιλότητά του όνυχα.
- Ούτε ο τροχοφόρος άξονας, ούτε η γραμμή είναι άκαμπτα σώματα και υπό την δράση των εγκάρσιων δυνάμεων επέρχεται παραμόρφωση.

Κατά συνέπεια το πλάτος του καναλιού ίχνους (διάκενο) αυξάνεται στη πραγματικότητα και γίνεται κατά τι μεγαλύτερο του διακένου δ. Η αύξηση αυτή κατά τη σχεδιαστική απεικόνιση, παραλείπεται. Το πλάτος του καναλιού ίχνους (διάκενο) αυξάνεται κατά 1 mm, επειδή το εύρος γραμμής και το ίχνος καθοδήγησης μετρώνται σε διαφορετικό ύψος. Έτσι, για κανονικό πλάτος γραμμής, το διάκενο σε καινουργή κατάσταση υπολογίζεται ως:

δ = εύρος γραμμής 1435 mm – απόσταση ίχνους 1426 mm + 1 mm = 10 mm

Επισημαίνεται ότι το πλάτος του καναλιού ίχνους, εξαρτάται τόσο από το εύρος γραμμής όσο και από την απόσταση του ίχνους (απόσταση σημείων καθοδήγησης). Επίσης, το πλάτος του καναλιού ίχνους διαφοροποιείται (αυξάνεται) όταν οι όνυχες λεπταίνουν λόγω φθοράς. Αν οι τροχοί ενός οχήματος έχουν διαφορετικό πάχος όνυχα (π.χ. οι τροχοί του μεσαίου τροχοφόρου άξονα ενός τριαξονικού φορείου είναι λεπτότεροι των άλλων), τότε πρέπει να σχεδιασθεί ένα επί πλέον κανάλι ίχνους για τον τροχοφόρο άξονα με τους λεπτότερους όνυχες (Σχήμα 3.6).

Η σχεδίαση σε κάτοψη ολόκληρων οχημάτων επί κυκλικής καμπύλης, αντιμετωπίζει την δυσκολία της συνύπαρξης σε ενιαία κλίμακα, του μήκους του οχήματος ή τουλάχιστον της απόστασης των φορείων (σε μέτρα κατά μήκος του άξονα x) και του διακένου καθώς και της πλευρικής απόκλισης από την κατεύθυνση του άξονα x (σε χιλιοστά κατά μήκος του άξονα y).

Η δυνατότητα της σχεδιαστικής απεικόνισης της θέσης του οχήματος, καθαρά γεωμετρικά, όπου καταρχήν δεν γίνεται καμία αναφορά στις δρώσες δυνάμεις,

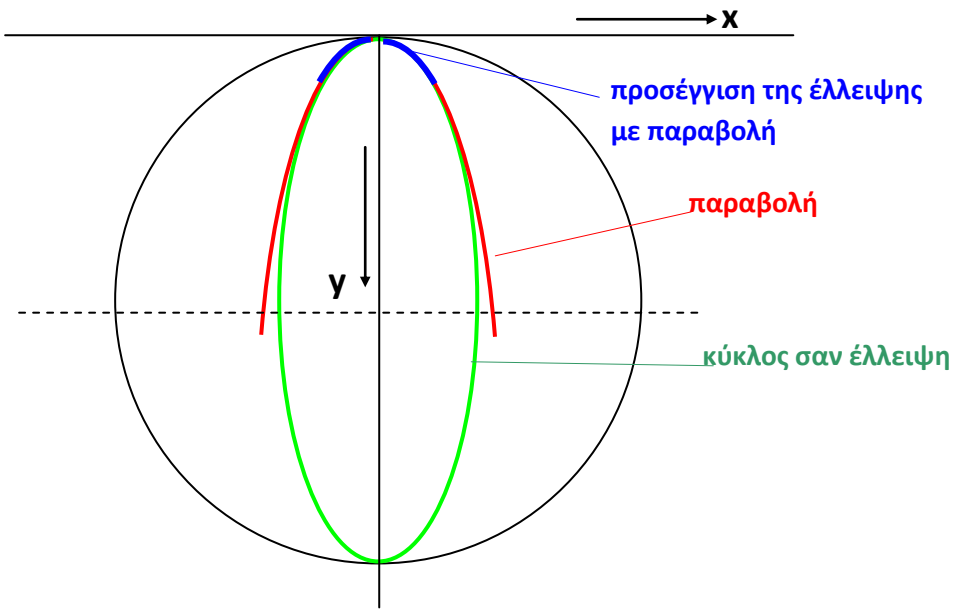
προσφέρεται από την μέθοδο **''Vogelplan''** η οποία ανήκει στην ευρηματικότητα του Δρ. Μηχ/κού Rudolf Vogel, κατά την οποία η απεικόνιση

- μεταξονίου (απόσταση μεταξύ των δυο αξόνων του ίδιου φορείου)
- του διακένου μεταξύ εύρους γραμμής και ίχνους
- της καμπυλότητας και
- της απόστασης μεταξύ των φορείων του οχήματος

γίνεται σε στρεβλή κλίμακα, όπου οι εγκάρσιες διαστάσεις όπως διάκενο, πλευρική μετατόπιση και ακτίνα καμπυλότητας αποδίδονται σε κλίμακα 1:1 ή 1:2, ενώ τα μήκη μεταξύ των αξόνων σε 1:20 έως 1:100. Με την κλίμακα αυτή απεικονίζονται οι κυκλικές καμπύλες σαν παραβολές.

Η μέθοδος Vogel [6] αναπαριστά σχεδιαστικά τη θέση των αξόνων στη γραμμή (μεμονωμένων ή σε φορεία με άκαμπτους τροχοφόρους άξονες), μέσω ενός καναλιού (κανάλι του ίχνους) πλάτους όσο το συνολικό διάκενο μεταξύ σημείου καθοδήγησης και σιδηροτροχιάς. Οι τροχοφόροι άξονες στο σχέδιο Vogel φαίνονται σαν σημεία και η γραμμή φαίνεται ως το κανάλι του ίχνους. Η ευθεία σύνδεσης των δυο σημείων αντιστοιχεί στον κατά μήκος άξονα του οχήματος ή του φορείου.

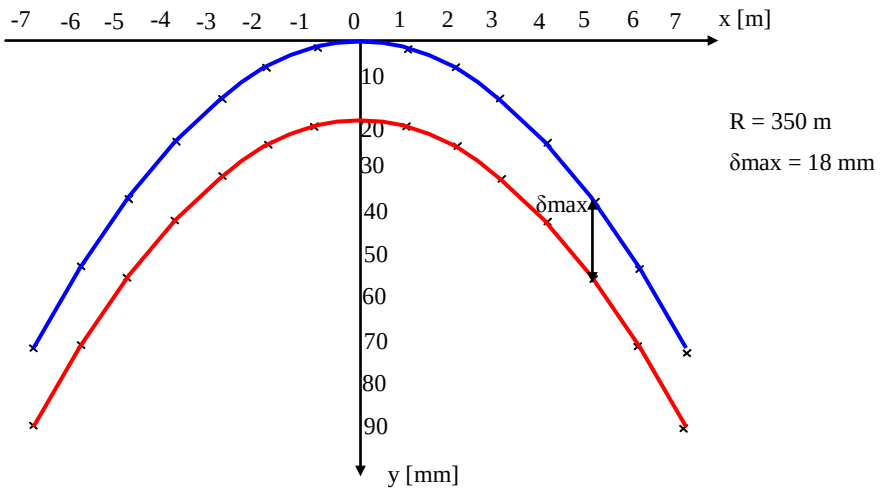
Η χρήση τέτοιας κλίμακας σημαίνει για την κυκλική καμπύλη συρρίκνωση κατά μήκος της κατεύθυνσης x και την παραμόρφωσή της σε έλλειψη. Για την ανάγκη της σχεδίασης επιτρέπεται η προσέγγιση της έλλειψης στην αρχή της από παραβολή της μορφής $y = x^2/2R$ (σφάλμα προσέγγισης 0,1%).



Σχήμα 3.1: Προσομοίωση ενός κυκλικού τόξου με έλλειψη

x [m]	x^2 [m^2]	y= x^2/2R [mm]	y+18 [mm]
1	1	1,43	19,43
2	4	5,71	23,71
3	9	12,86	30,86
4	16	22,86	40,86
5	25	35,71	53,71
6	36	51,43	69,43
7	49	70,00	88,00

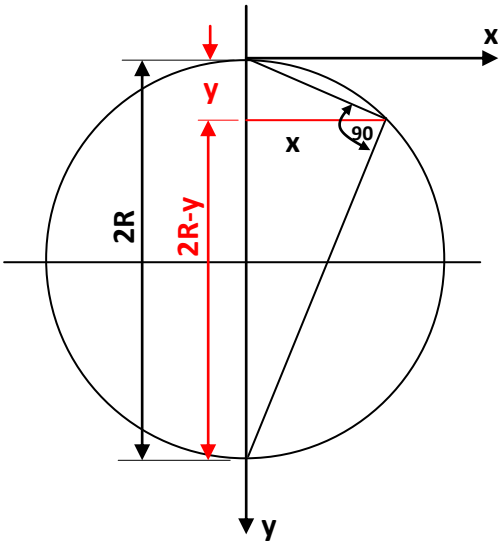
Πίνακας 3.1: Κανάλι Vogel με R=350m και δ_{max}=18mm



Σχήμα 3.2: Απεικόνιση της οριζοντιογραφικής καμπύλης με τη μέθοδο Vogel

3.2.1: Υπολογισμός σφάλματος μεθόδου

Σχήμα 3.3: Σχηματική απεικόνιση εφαρμογής θεωρήματος Θαλή



$x^2 = y_{\pi\rho}(2R - y_{\pi\rho})$ (Θεώρημα Θαλή) *(3.1)*

επειδή $y_{\pi\rho}$ <<2R έπεται x^2 ~ 2R·y ή $y = \frac{x^2}{2R}$ (παραβολή) *(3.2)*

από (3.1) προκύπτει η πραγματική τιμή

$$y_{\pi\rho} = \frac{x^2}{(2R - y_{\pi\rho})} \qquad (3.3)$$

Σχηματίζοντας τη διαφορά Δy = $y_{\pi\rho}$ – y και συσχετίζοντάς την ως προς $y_{\pi\rho}$ προκύπτει:

Ποσοστιαίο λάθος = $\frac{\Delta y}{y_{\pi\rho}} = \frac{y_{\pi\rho} - y}{y_{\pi\rho}} = 1 - \frac{y}{y_{\pi\rho}}$ *(3.4)*

με αντικατάσταση στην (3.4) με (3.1) και (3.2) προκύπτει:

$\frac{\Delta y}{y_{\pi\rho}} = 1 - \frac{x}{2R} \cdot \frac{2R - y_{\pi\rho}}{x^2} = \frac{y_{\pi\rho}}{2R}$ και

$$\frac{\Delta y}{y_{\pi\rho}} = \frac{y}{2R} \qquad (3.5)$$

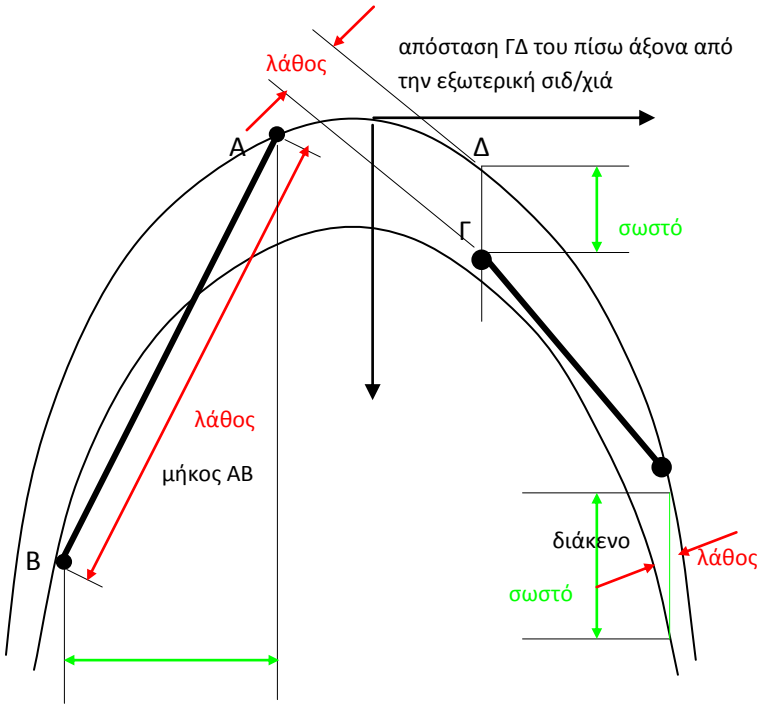
Από την παραπάνω σχέση εξάγονται τα εξής συμπεράσματα [6]:

- Το ποσοστιαίο λάθος της απεικόνισης ενός κυκλικού τόξου γίνεται μεγαλύτερο, όσο μικραίνει η ακτίνα του τόξου.
- Το ποσοστιαίο λάθος μεγαλώνει ανάλογα με το y. Επομένως, το σφάλμα είναι μικρό πλησίον σημείου αρχής των συντεταγμένων και μεγαλώνει ανάλογα με την απομάκρυνση από αυτό.
- Η προσεγγιστική τιμή y είναι πάντα μικρότερη από την πραγματική τιμή $y_{πρ}$. Αυτό σημαίνει ότι η προσεγγιστική παραβολή βρίσκεται πάντα εξωτερικά του κυκλικού τόξου, που στην προκείμενη περίπτωση λόγω της στρεβλής κλίμακας απεικονίζεται σαν έλλειψη.

3.2.2 Πως γίνεται η μέτρηση στην απεικόνιση Vogel

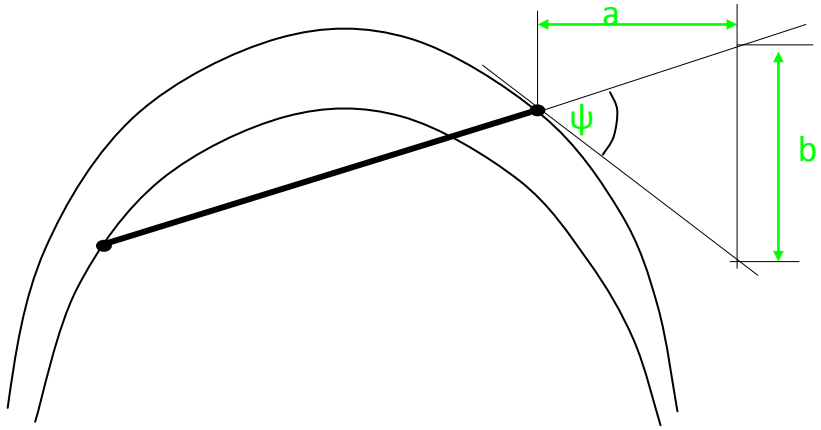
Κατά τη μέτρηση του μήκους και της γωνίας από την απεικόνιση Vogel, ελλοχεύει το λάθος, λόγω της στρεβλότητας της κλίμακας. Έτσι, οι αποστάσεις μετρώνται στις κατευθύνσεις x, y όπως φαίνεται στην απεικόνιση (α), ενώ η γωνία πρόσπτωσης **ψ** του όνυχα του τροχού σύμφωνα με την απεικόνιση (β). Για τον υπολογισμό της γωνίας **ψ** λαμβάνεται συγκεκριμένο μήκος **a** στην κατεύθυνση x, ενώ το μήκος **b** στη κατεύθυνση y μετράται με τη βοήθεια της εφαπτομένης στο σημείο πρόσπτωσης του υπόψη τροχοφόρου άξονα.

α) μέτρηση μήκους και απόστασης



Σχήμα 3.4: Μέτρηση μήκους και απόστασης

β) μέτρηση γωνίας



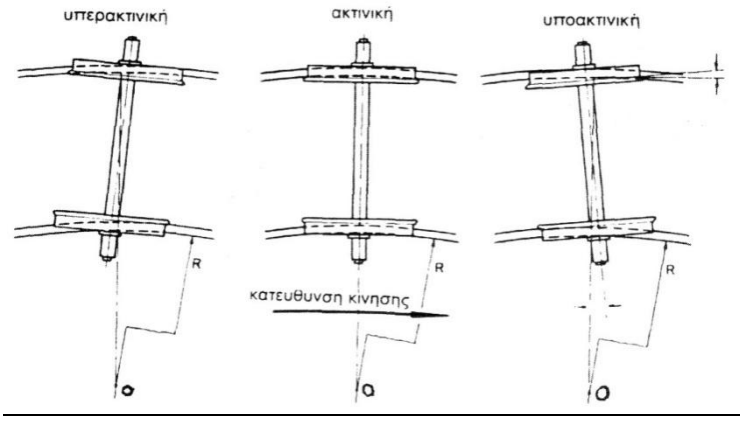
$$\varepsilon\phi\psi = \frac{b}{a}$$

Σχήμα 3.5: Μέτρηση γωνίας πρόσπτωσης

3.3 Θέση αξόνων και οχημάτων στις οριζοντιογραφικές καμπύλες

Η ιδανική θέση ενός άξονα στην καμπύλη είναι η ακτινική. Στη θέση αυτή η κύλιση γίνεται στο κυκλικό τόξο χωρίς ο τροχός να εφάπτεται, δηλαδή να προσπίπτει, με την παρειά του όνυχα του τόσο στην εξωτερική όσο και στην εσωτερική σιδηροτροχιά. Συνήθως, όμως, ο άξονας δεν παίρνει αυτή τη θέση, αλλά την υποακτινική ή την υπερακτινική.

Στην υποακτινική θέση ο εξωτερικός τροχός παραμένει πίσω κατάτι, σαν αποτέλεσμα της μη επαρκούς περιστροφής του άξονα στην κατεύθυνση του κυκλικού τόξου, ώστε να αποκτήσει την ακτινική θέση. Στην υπερακτινική θέση ο άξονας έχει ξεπεράσει την ακτινική θέση, δηλαδή έχει υποστεί μεγαλύτερη στροφή.

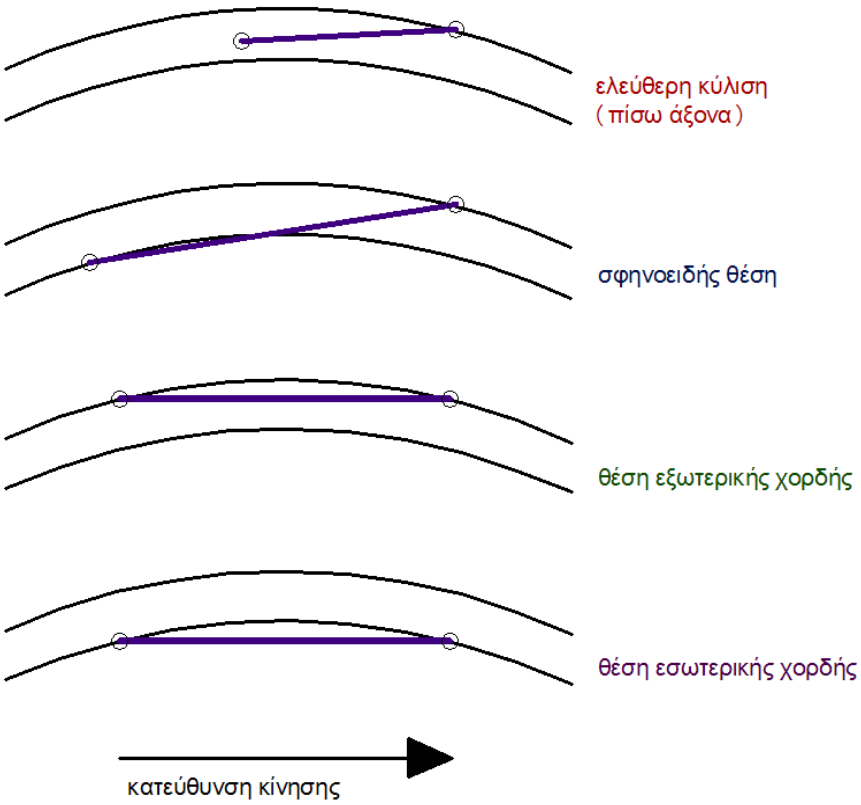


Εικόνα 3.5: Θέσεις του άξονα στην καμπύλη

Για να διερευνηθεί η θέση ενός οχήματος θεωρείται η απλούστερη μορφή του που είναι οι δυο τροχοφόροι άξονες ή ένα φορείο, με την παραδοχή, όμως ότι οι τροχοφόροι άξονες δεν έχουν καμία ελευθερία σχετικής κίνησης ως προς το φορείο ή τη θέση έδρασης. Επίσης, δεν έχουν τη δυνατότητα περιστροφής ως προς τον κατά μήκος άξονα του οχήματος. Βρίσκονται, επομένως, με τον άξονα περιστροφής τους πάντα κάθετοι στον κατά μήκος άξονα του πλαισίου και κινούνται προς την κατεύθυνση του. Φορεία με τέτοιους άξονες ονομάζονται άκαμπτα φορεία [6].

Σε ένα άκαμπτο φορείο που κινείται επί κυκλικού τόξου ο μπροστινός άξονας προσπίπτει στην εξωτερική σιδηροτροχιά και ευρίσκεται μόνιμα σε υποακτινική θέση. Ο πίσω άξονας στην πλειονότητα των περιπτώσεων έχει δυο δυνατότητες. Είτε κινείται μεταξύ των δυο σιδηροτροχιών ελεύθερα ή κινείται ολισθαίνων στην εσωτερική σιδηροτροχιά. Στην περίπτωση αυτή ο κατά μήκος άξονας του οχήματος σχηματίζει χορδή με την εσωτερική σιδηροτροχιά, ως εκ τούτου ο πίσω άξονας κυλίει συνεχώς παρά την εσωτερική σιδηροτροχιά, αυτή η θέση ονομάζεται σφηνοειδής. Η θέση αυτή θεωρείται φυσιολογική, απλά ένα όχημα σε αυτή τη θέση αντιμετωπίζει μεγαλύτερη αντίσταση καμπύλης και σαν αποτέλεσμα προκαλούνται γρηγορότερα φθορές τόσο στους τροχούς όσο και στις σιδηροτροχιές.

Οι δυο άλλες θέσεις, όπου οι δυο άξονες ολισθαίνουν παρά την εξωτερική ή την εσωτερική σιδηροτροχιά χαρακτηρίζονται ως μη φυσιολογικές και εμφανίζονται κατά τη δράση ιδιαίτερα ισχυρών εξωτερικών ή εσωτερικών δυνάμεων αντίστοιχα.



Εικόνα 3.6: Τυπικές θέσεις φορείων με δυο άξονες στην καμπύλη [6]

Με τη μέθοδο Vogel μπορεί να εκτιμηθεί η θέση ενός οχήματος ή φορείου με άκαμπτους άξονες. Στο κανάλι του διακένου τοποθετούνται κατ' αρχήν οι άξονες σε **σφηνοειδή θέση**. Αν η γραμμή σύνδεσης των δυο αξόνων **τέμνει** την εσωτερική σιδηροτροχιά τότε πιθανολογείται ότι το φορείο **έχει τη θέση αυτή**. Ειδεμή εκτιμάται ελεύθερη κύλιση του πίσω άξονα. Όσο μεγαλύτερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας και η τιμή του διακένου και όσο μικρότερο είναι το μεταξόνιο, τόσο περισσότερο τείνει το όχημα ή το φορείο προς τη θέση **ελεύθερης κύλισης**.

Επίσης όσο μεγαλύτερη τιμή ακτίνας καμπυλότητας και διακένου και μικρότερο μεταξόνιο, τόσο μεγαλύτερες είναι οι πιθανότητες το όχημα ή το φορείο να τείνει προς τη θέση της ελεύθερης κύλισης.

Τα **όρια** μεταξύ ελεύθερης και σφηνοειδούς κύλισης ορίζονται από εκείνη τη θέση του οχήματος, κατά την οποία ο πίσω τροχοφόρος άξονας αγγίζει την γραμμή **εφαπτομενικά**. Για ένα διαξονικό φορείο με την απόσταση μεταξύ των τροχοφόρων αξόνων 2a [m] και ακτίνα καμπυλότητας της γραμμής R [m], ισχύει:

$$\delta_{\text{ορ}} = \frac{(2a)^2}{2R} \qquad (3.6)$$

Όταν το $\delta > \delta_{\text{ορ}}$ τότε ''ελεύθερη'' κύλιση

Όταν το $\delta < \delta_{\text{ορ}}$ τότε ''σφηνοειδής'' κύλιση

3.4 Παράδειγμα υπολογισμού με την μέθοδο Vogel

Σχεδίαση ενός τμήματος καμπύλης γραμμής με οριζοντιογραφική ακτίνα R=200m, απόσταση ίχνους 1426 mm και εύρος γραμμής 1435 mm. Να γίνει επιλογή κατάλληλης κλίμακας στις κατευθύνσεις x και y.

Σχεδίαση ενός τμήματος καμπύλης γραμμής με οριζοντιογραφική ακτίνα R = 200 m, απόσταση ίχνους 1426 mm και εύρος γραμμής 1435 mm. Να γίνει επιλογή κατάλληλης κλίμακας στις κατευθύνσεις x και y

1. Επί της σχεδιασθείσης καμπύλης, να απεικονισθεί μία τριαξονική μηχανή έλξης με αποστάσεις μεταξύ των αξόνων

   a_{12} = 1500 mm και a_{23} = 2400 mm,

   και για τη περίπτωση που κινείται προς τα εμπρός και για την περίπτωση που κινείται όπισθεν (κατεύθυνση προς τα εμπρός είναι αυτή που δείχνει το βέλος x).

2. Να υπολογισθεί η γωνία πρόσπτωσης του τροχού καθοδήγησης
3. Να υπολογισθεί η γωνία πρόσπτωσης του τροχού καθοδήγησης για τη περίπτωση που οι όνυχες των τροχών των ακραίων τροχοφόρων αξόνων (1 και 3) έχουν υποστεί φθορά 6 mm.
4. Ποια η μεταβολή της γωνίας πρόσπτωσης του τροχού καθοδήγησης για μηχανή έλξης με ίσες αποστάσεις μεταξύ των αξόνων 1500 mm

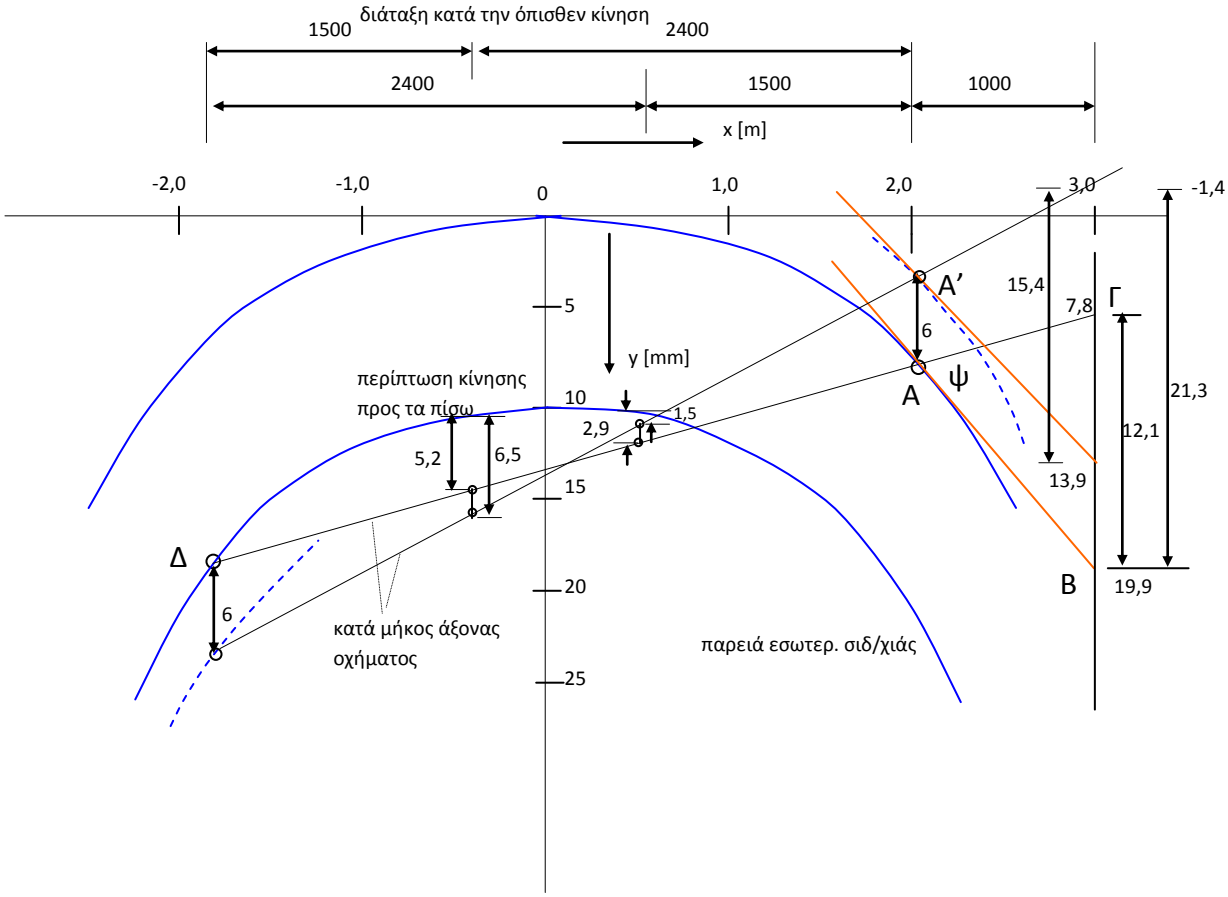
Επίλυση:

Ως προς το 1° ερώτημα:

Για τη σχεδίαση της καμπύλης επιλέγεται κλίμακα 1:50 στην κατεύθυνση **x** και 2:1 στην κατεύθυνση **y**. Απαιτούνται περίπου 10 έως 12 πόντοι κατά **x** για την απεικόνιση μήκους περίπου 5 έως 6 m, που αποτελούνται από τα 3,90 της μηχανής επί πλέον των βοηθητικών για τον υπολογισμό της γωνίας πρόσπτωσης **ψ**. Οι τιμές **x** διαβαθμίζονται έτσι ώστε να προκύπτουν επαρκή σημεία για την σχεδίαση της καμπύλης. Ο υπολογισμός των σημείων σχεδίασης του διακένου, φαίνεται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2: Υπολογισμός σημείων σχεδίασης διακένου

x	**x^2**	**$y = x^2 / 2R$**	**y + 10**	**y + 22**
m	m^2	m	Mm	mm
± 0,0	0	0	10,0	22,0
± 0,2	0,04	$0,1 \cdot 10^{-3}$	10,1	22,1
± 0,4	0,16	$0,4 \cdot 10^{-3}$	10,4	22,4
± 0,6	0,36	$0,9 \cdot 10^{-3}$	10,9	22,9
± 0,8	0,64	$1,6 \cdot 10^{-3}$	11,6	23,6
± 0,1	1,0	$2,5 \cdot 10^{-3}$	12,5	24,5
± 1,2	1,44	$3,6 \cdot 10^{-3}$	13,6	25,6
± 1,4	1,96	$4,9 \cdot 10^{-3}$	14,9	26,9
± 1,6	2,56	$6,4 \cdot 10^{-3}$	16,4	28,4
± 1,8	3,24	$8,1 \cdot 10^{-3}$	18,1	30,1
± 2,0	4,0	$10,0 \cdot 10^{-3}$	20,0	32,0
± 2,2	4,84	$12,1 \cdot 10^{-3}$		
± 2,4	5,76	$14,4 \cdot 10^{-3}$		



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση θέσης οχήματος με τη μέθοδο Vogel (Εφ.1,2,3,4)

Ως προς το 2° ερώτημα:

Η συνολική απόσταση μεταξύ των αξόνων ανέρχεται στα 3,9 m. Συνηθίζεται στο Vogelplan, η κατεύθυνση κίνησης να εννοείται προς τα δεξιά. Ως εκ τούτου οι τροχοφόροι άξονες διατάσσονται έτσι ώστε ο μπροστινός τροχοφόρος άξονας να ευρίσκεται στη θέση x = + 2,0 m και ο τελευταίος (τρίτος) στη θέση x = -1,9 m. Επειδή γίνεται η υπόθεση της ''σφηνοειδούς'' θέσης, λαμβάνεται ο πρώτος τροχοφόρος άξονας να προσπίπτει επί της εξωτερικής σιδηροτροχιάς και ο τελευταίος επί της εσωτερικής.

Κατά την ''όπισθεν'' κίνηση, δεν αλλάζει η θέση του κατά μήκος άξονα του οχήματος. Μόνο ο μεσαίος τροχοφόρος άξονας απαιτεί διαφορετική διαπλάτυνση του εύρους, σε διαφορετική θέση (+ 0,5 m για την κίνηση προς τα εμπρός και – 0,4 m για την κίνηση προς τα πίσω.

Ως προς το 3^{ο} ερώτημα:

Για τον υπολογισμό της προσπίπτουσας γωνίας ψ, επιλέγεται μία βάση 1000 mm, η οποία για την παρούσα περίπτωση είναι επαρκής, προκειμένου να διευκολύνεται η ανάγνωση των τιμών. Επίσης σχεδιάζεται εφαπτομένη στη θέση Α της εξωτερικής σιδηροτροχιάς, η οποία τέμνει την κατακόρυφο στη θέση 3,0 m στο σημείο Β όπου καταγράφεται τιμή 19, 9 mm. Ο κατά μήκος άξονας του οχήματος τέμνει την ίδια κατακόρυφο στη θέση Γ με τιμή 7,8 mm.

Έτσι η εφαπτομένη της γωνίας ψ ισούται με

$$\varepsilon\phi\psi_1 = \frac{19{,}9mm - 7{,}8mm}{1000mm} = 0{,}0121$$

και η γωνία πρόσπτωσης του τροχού στην εξωτερική σιδηροτροχιά είναι:

ψ_1 = 0,693º

Ως προς το 4^{ο} ερώτημα

Η λέπτυνση του όνυχα έχει ως συνέπεια την αύξηση του διακένου (βλ. Σχ.1.8 διακεκομμένη γραμμή). Η σφηνοειδής θέση παραμένει αλλά ο κατά μήκος άξονας του οχήματος μεταβάλλει τη θέση του. Στην θέση x = + 3,0 m τέμνει την κατακόρυφο με τιμή y = -1,4 mm και η εφαπτομένη στη θέση Α' της εξωτερικής σιδηροτροχιάς, τέμνει την ίδια κατακόρυφο στην τιμή y = + 13,9 mm. Ως εκ τούτου

$$\varepsilon\phi\psi_1 = \frac{13{,}9mm - (-1{,}4mm)}{1000mm} = 0{,}0153$$

και η γωνία πρόσπτωσης του τροχού στην εξωτερική σιδηροτροχιά είναι

ψ_1 = 0,876º

Η γωνία πρόσπτωσης μεταβλήθηκε λόγω της φθοράς στους όνυχες κατά

$$\frac{0{,}876^o - 0{,}693^o}{0{,}693^o} = 26{,}4\%$$

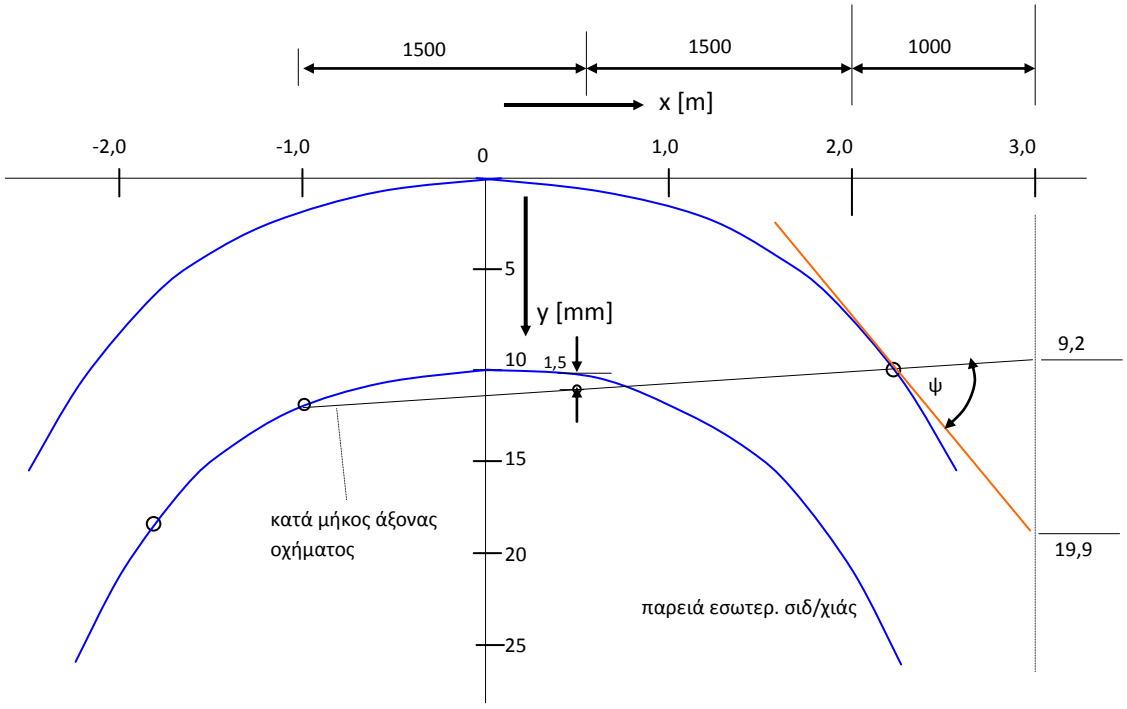
Ως προς το 5^{ο} ερώτημα:

Για την καλύτερη εποπτεία, το ερώτημα αυτό απαντάται σε δική του απεικόνιση, όμως με αρχή του πρώτου τροχοφόρου άξονα πάλι στη θέση x = + 2,0 m για να υπάρχει σύγκριση με τα προηγούμενα ερωτήματα. Έτσι

$$\varepsilon\phi\psi_1 = \frac{19{,}9mm - 9{,}2mm}{1000mm} = 0{,}0107$$

και η γωνία πρόσπτωσης του τροχού στην εξωτερική σιδηροτροχιά είναι

ψ_1 = 0,613º

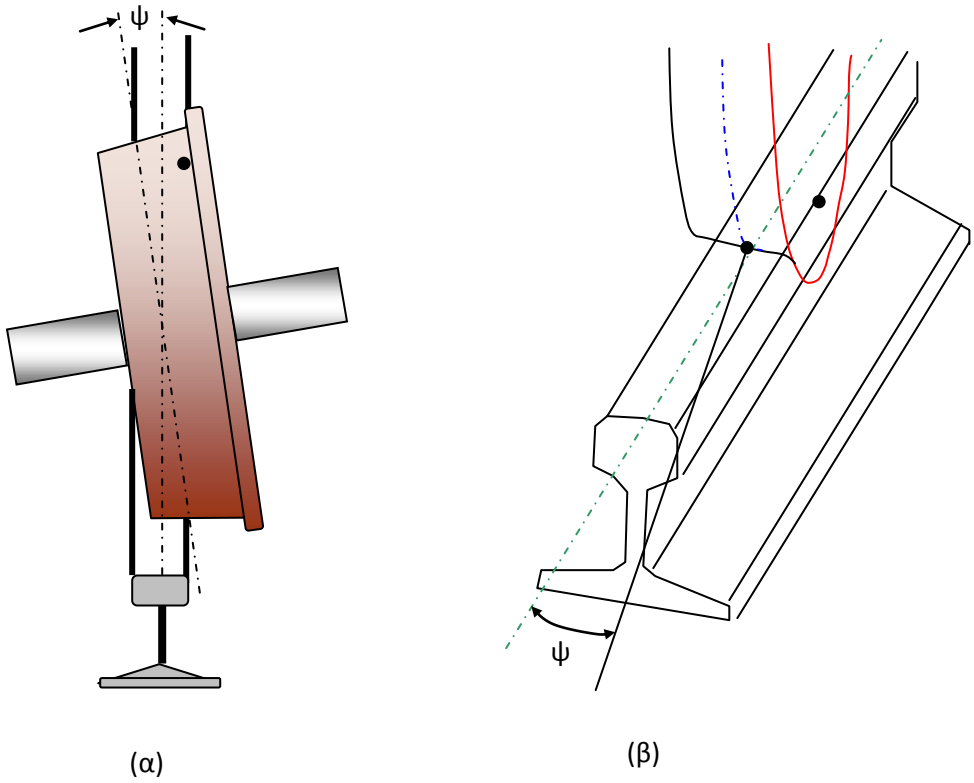


Σχήμα 3.7: Απεικόνιση θέσης οχήματος με τη μέθοδο Vogel (Εφ.5)

Η γωνία πρόσπτωσης μειώθηκε κατά

$$\frac{0{,}693^o - 0{,}613^o}{0{,}693^o} = 11{,}5\%$$

σε σχέση με το μεταξόνιο 1500 / 2400 mm.



Εικόνα 3.8: Απεικόνιση γωνίας προσπτωσης ψ τροχού στη σιδηροτροχιά (α-κάτοψη, β-προοπτικό)

3.5 Δυνάμεις μεταξύ τροχού σιδηροτροχιάς-Μέθοδος Ελαχίστου του Heumann

Η γραμμή αποτελείται γεωμετρικά από ευθυγραμμίες και καμπύλες (παραβολικές και κυκλικές). Οι τροχοί κατά την κίνησή τους παρουσιάζουν κύλιση και συγχρόνως ολίσθηση. Η αιτία του φαινομένου αυτού ευρίσκεται στη μορφή της διατομής των τροχών (κωνικότητα), στην καμπυλότητα της επιφάνειας κύλισης της σιδηροτροχιάς και στη συνεχή πλαστικοελαστική παραμόρφωση τροχού και σιδηροτροχιάς στην εκάστοτε θέση επαφής τους. Αποτέλεσμα αυτού είναι η κυματοειδής κύλιση των τροχών στην ευθυγραμμία (βλ.Κεφ.2.4.1), η οποία συντελεί ώστε οι τροχοί ενός άξονα να προσπίπτουν με τον όνυχα στη μια ή στην άλλη σιδηροτροχιά υπό μια γωνία.

Εκτίμηση των δυνάμεων μεταξύ τροχού σιδηροτροχιάς σε σχέση με την θέση των τροχοφόρων αξόνων εντός της γραμμής (μέθοδος ελαχίστου του Heumann), κατά την κίνηση του οχήματος στην καμπύλη

Επειδή κατά την κίνηση των οχημάτων στη καμπύλη, υφίσταται συνεχής πρόσπτωση του εξωτερικού ηγούμενου τροχού στην εξωτερική σιδηροτροχιά, η

παρακάτω ανάλυση των δυνάμεων γίνεται για ένα όχημα που κινείται σε καμπύλη καλύπτοντας έτσι και την περίπτωση της κίνησης στην ευθυγραμμία.

3.5.1 Δυνάμεις και ολισθήσεις υπό ορισμένες συνθήκες

Για την θεώρηση του προβλήματος στη βάση του, γίνονται κατ' αρχή παραδοχές που διευκολύνουν την επεξήγησή του. Στη συνέχεια οι παραδοχές αποσύρονται σταδιακά και η θεώρηση γίνεται λεπτομερέστερη.

Οι παραδοχές είναι:

- ίδιος συντελεστής τριβής μ σε όλους τους τροχούς
- ίδιο φορτίο Q σε όλους τους τροχούς
- επίσωτρα κυλινδρικής διατομής
- τροχοί χωρίς όνυχες (μηδενική τριβή μεταξύ όνυχα – σιδ/χιάς)
- ιδανική κυκλική καμπύλη γραμμή
- άκαμπτοι άξονες
- παράλληλοι άξονες στο πλαίσιο του φορείου χωρίς εγκάρσια ανοχή
- το σύστημα δυνάμεων στον χώρο αντικαθίσταται από επίπεδο σύστημα

Σύμφωνα με τις παραπάνω προϋποθέσεις, ένα όχημα δεν μπορεί να κινηθεί επί μιας καμπύλης χωρίς συγχρόνως να ολισθαίνει. Οι δύο κινήσεις θεωρούνται ξεχωριστά. Έστω ότι το όχημα κατ' αρχήν κυλίει για μία ελάχιστη απόσταση, σταματάει και επί τόπου στρέφεται κατά την έννοια του τόξου. Ένα σημείο επί του κατά μήκος άξονα Χ-Χ του οχήματος, είναι το κέντρο στροφής Μ. Ο Heumann ονόμασε το σημείο αυτό κέντρο τριβής επειδή ως προς αυτό αναλύονται όλες οι δυνάμεις τριβής στους τροχούς.

Θεωρώντας έναν άξονα (άξονας 1) και το αντίστοιχο κέντρο τριβής Μ (Σχ1.9), προκύπτει για στροφή περί το Μ ολίσθηση ζ στις θέσεις επαφής των τροχών με τις σιδηροτροχιές, η κατεύθυνση της οποίας είναι κάθετη στους βραχίονες q_1 και q_2.

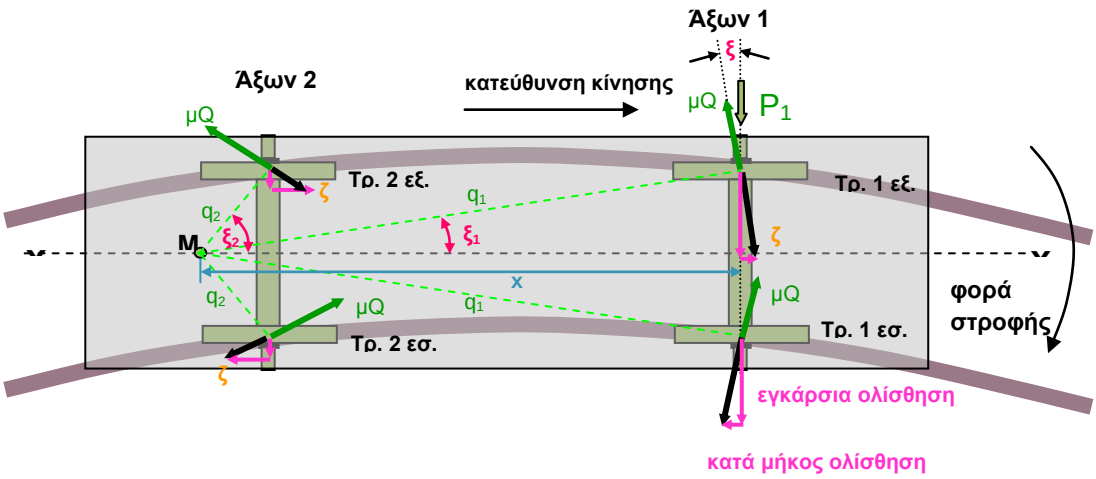
Οι δυνάμεις τριβής μQ εμφανίζονται ως αντιστάσεις ολίσθησης των ζ και έχουν αντίθετη κατεύθυνση. Για την ισορροπία των δυνάμεων σε ολόκληρο το όχημα, αντικαθιστώνται οι δυνάμεις μQ από τη συνισταμένη τους S, το μέγεθος και η θέση της οποίας καθορίζεται από την απόσταση του σημείου Μ από τον άξονα 1.

Οι ολισθήσεις μπορούν να αναλυθούν σε κατά μήκος και εγκάρσια κατεύθυνση. Όσο πλησιέστερα ευρίσκεται ο άξονας στο κέντρο τριβής Μ, τόσο μικρότερη είναι η εγκάρσια συνιστώσα. Έτσι, στο μπροστινό άξονα η εγκάρσια ολίσθηση παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή της.

Η κατά μήκος ολίσθηση έχει την ίδια τιμή για τους δύο τροχούς ενός άξονα, αλλά αντίθετη κατεύθυνση. Στην εξωτερική σιδηροτροχιά έχει κατεύθυνση προς τα εμπρός ενώ στην εσωτερική προς τα πίσω. Έτσι ο τροχός που κυλίει στην εξωτερική

σιδηροτροχιά, δεν διανύει επαρκή απόσταση σε σχέση με τον εσωτερικό και ως εκ τούτου πρέπει να καλύψει την υπόλοιπη με μία ολίσθηση προς τα εμπρός. Το αντίθετο συμβαίνει με τον εσωτερικό τροχό. Σε τροχούς με κωνική διατομή επισώτρων είναι δυνατή η μερική ή ολόκληρη εξίσωση αυτής της ολίσθησης με μετατόπιση του άξονα στο κανάλι διακένου από την μεσαία θέση προς την εξωτερική πλευρά. Στη περίπτωση ολικής εξίσωσης, αντιστρέφονται οι κατευθύνσεις των κατά μήκος ολισθήσεων των δύο τροχών.

Σχήμα 3.9: Ολισθήσεις και δυνάμεις μεταξύ τροχού και σιδ/χιάς κατά την κίνηση στροφής του οχήματος στην καμπύλη (όχημα σε ελεύθερη κύλιση)



Η μέθοδος παρουσιάζεται για την περίπτωση ελεύθερης κύλισης. Ανάλογα ισχύει για την σφηνοειδή θέση, κατά την οποία επίσης αναλύεται ο τρόπος εκτίμησης της θέσης του κέντρου τριβής.

3.5.2 Περίπτωση ελεύθερης κύλισης

Για τον καθορισμό των δυνάμεων ισορροπίας σε ένα όχημα με δυο άξονες που κυλίει σε ελεύθερη θέση, γίνεται η παραδοχή ότι το κέντρο τριβής M ευρίσκεται πριν τον άξονα 2, ορίζοντας καταρχήν το μήκος των βραχιόνων ολίσθησης q, καθώς και τη θέση των δυνάμεων τριβής μQ (βλ. Σχ.3.9).

Αποστάσεις a_i των αξόνων

Από τον πρώτο άξονα => $a_1=0$

Σχηματισμός των παρακάτω σχέσεων

Βραχίονες ολίσθησης:

$$q_1 = \sqrt{(x - a_1)^2 + b_A^2} \qquad (3.7)$$

$$q_2 = \sqrt{(x - a_2)^2 + b_A^2} \qquad (3.8)$$

$$q_i = \sqrt{(x - a_i)^2 + b_A^2} \qquad (3.9)$$

$$\cos\xi_1 = \frac{x - a_1}{q_1} = \frac{x - a_1}{\sqrt{(x - a_1)^2 + b_A^2}} \qquad (3.10)$$

$$\cos\xi_2 = \frac{x - a_2}{q_2} = \frac{x - a_2}{\sqrt{(x - a_2)^2 + b_A^2}} \qquad (3.11)$$

$$\cos\xi_i = \frac{x - a_i}{q_i} = \frac{x - a_i}{\sqrt{(x - a_i)^2 + b_A^2}} \qquad (3.12)$$

Παραγώγιση q ως προς x:

$$\frac{dq_i}{dx} = \frac{2(x - a_i)}{2 \cdot \sqrt{(x - a_i)^2 + b_A^2}} \qquad (3.13)$$

$$\frac{dq_i}{dx} = \cos\xi_i \qquad (3.14)$$

Για ένα όχημα με 2 τροχοφόρους άξονες, το άθροισμα των ροπών όλων των δυνάμεων ως προς το κέντρο τριβής είναι:

$$-\mu Q q_1 - \mu Q q_1 - \mu Q q_2 - \mu Q q_2 + P_1 \cdot x = 0 \qquad (3.15)$$

Για ένα όχημα με n τροχοφόρους άξονες, η εξίσωση είναι:

$$-\mu Q(2q_1 + 2q_2 + \ldots\ldots + 2q_i + \ldots\ldots + 2q_n) + P_1 \cdot x = 0$$ ή

$$2\mu Q \sum_{i=1}^{n} q_i = P_1 \cdot x \qquad (3.16)$$

Στην εξίσωση αυτή, το $2\mu Q \sum_{i=1}^{n} q_i$ εκφράζει το άθροισμα των ροπών των δυνάμεων τριβής που δρουν στους τροχούς.

Η εξίσωση για το άθροισμα των εγκαρσίων δυνάμεων είναι :

α) για όχημα με δύο τροχοφόρους άξονες

$$-2\mu Q cos\xi_1 - 2\mu Q cos\xi_2 + P_1 = 0 \qquad (3.17)$$

β) για όχημα με **n** τροχοφόρους άξονες

$$-2\mu Q \sum_{i=1}^{n} cos\xi_i + P_1 = 0 \text{ ή}$$

$$P_1 = 2\mu Q \sum_{i=1}^{n} cos\xi_i \qquad (3.18)$$

Με παραγώγιση της (3.16) ως προς x προκύπτει:

$$-2\mu Q \sum_{i=1}^{n} \frac{dq_i}{dx} + P_1 + x\frac{dP_1}{dx} = 0 \qquad (3.19)$$

Εξ αυτής και με τις (3.14) και (3.18) προκύπτει:

$$-2\mu Q \sum_{i=1}^{n} cos\xi_i + 2\mu Q \sum_{i=1}^{n} cos\xi_i + x\frac{dP_1}{dx} = 0 \qquad (3.20) \qquad \text{και}$$

$$x\frac{dP_1}{dx} = 0 \quad (3.21)$$

Επειδή το κέντρο τριβής δεν μπορεί να βρίσκεται ποτέ στον 1° άξονα, ισχύει x ≠ 0.

Επομένως $\frac{dP_1}{dx} = 0$ (σχέση ελαχίστου) *(3.22)*

Για διαφορετικές θέσεις κέντρου τριβής, η P_1 λαμβάνει διαφορετικές τιμές. Συνεπώς η P_1 είναι συνάρτηση του x. Η συνθήκη αυτή λέει

«ΤΟ ΟΧΗΜΑ ΠΑΙΡΝΕΙ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΕΤΟΙΑ ΘΕΣΗ, ΩΣΤΕ Η P_1 ΝΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΕΙΤΑΙ»

Ως εκ τούτου η θέση του κέντρου τριβής και η απόσταση του x από τον 1° τροχοφόρο άξονα είναι συγκεκριμένη.

Τα παραπάνω αποτελούν την αρχή της μεθόδου ελαχιστοποίησης του Heumann.

Υπολογισμό της θέσης του κέντρου τριβής με τη Μέθοδο Heumann, για όχημα με 2 ή 3 άξονες σε θέση ελεύθερης κύλισης - Υπολογισμός των δυνάμεων στους τροχούς

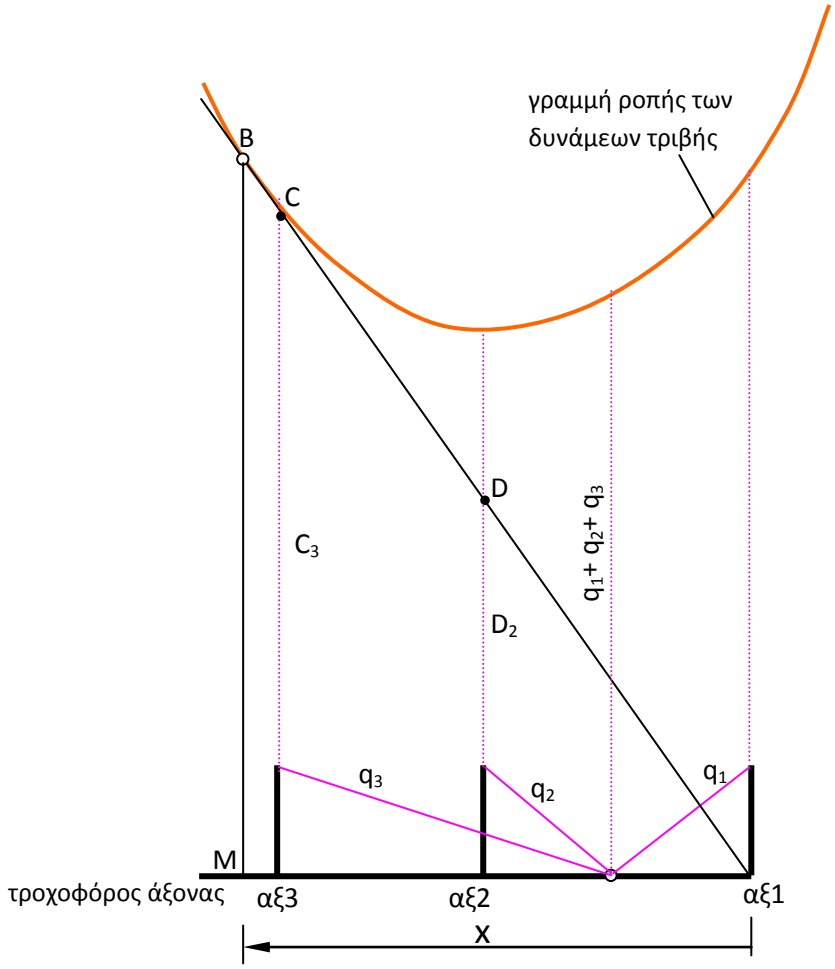
Οι δυνάμεις καθοδήγησης κατά την κίνηση σιδηροδρομικών οχημάτων στην καμπύλη, εκτιμώνται με απλό τρόπο σύμφωνα με την μέθοδο του καθηγητή Heumann του Πολυτεχνείου του Aachen.

Η μέθοδος περιέχει απλοποιήσεις, ως προς τις πραγματικές και συγχρόνως πολύπλοκες συνθήκες που επικρατούν. Όμως, το σημαντικό της μεθόδου αυτής είναι ότι στην εποχή των πολύπλοκων πακέτων προγραμμάτων Η/Υ, προσφέρει τη δυνατότητα γρήγορου ελέγχου της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων των προγραμμάτων αυτών.

Στη συνθήκη της σχέσης (3.22), βασίζεται η μέθοδος του Heumann η οποία εντοπίζει τη θέση του κέντρου τριβής και του μεγέθους της P_1.

Από τη σχέση (3.16) φαίνεται, ότι το άθροισμα των ροπών των δυνάμεων τριβής στους τροχούς, είναι διαφορετικό για κάθε θέση του Μ, εξαρτάται από το x.

Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, η ανερχόμενη ευθεία πρέπει να έχει τουλάχιστον ένα κοινό σημείο με την γραμμή των ροπών. Με τη συνθήκη του ελαχίστου, αυτό συμβαίνει όταν υφίσταται τουλάχιστον ένα σημείο επαφής της $\mathbf{P_1 \cdot x}$ με τη γραμμή ροπών των δυνάμεων τριβής.



Σχήμα 3.10: Μέθοδος ελαχίστου για όχημα με τρεις τροχοφόρους άξονες σε ελεύθερη κύλιση

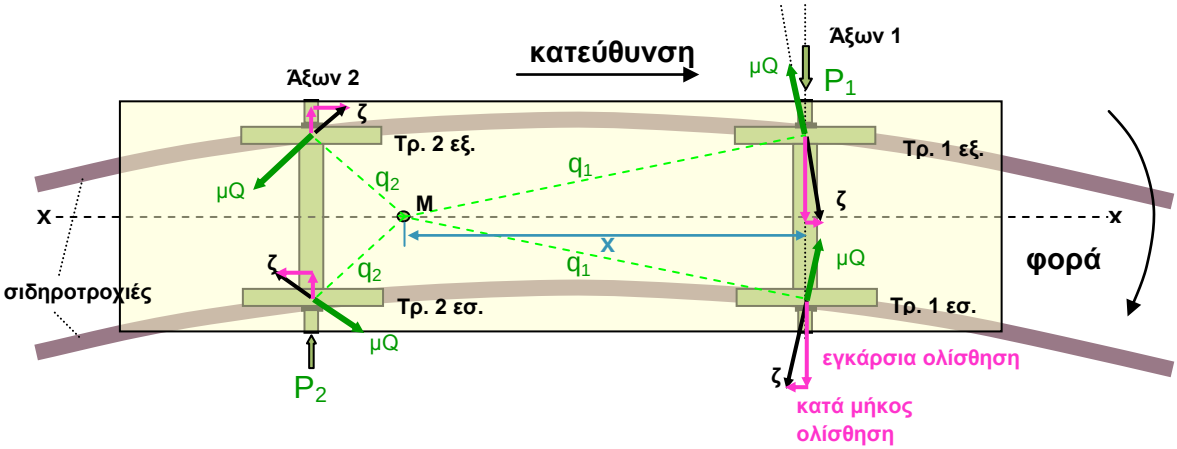
Λόγω του ελάχιστου της συνθήκης, ένα όχημα παίρνει τέτοια θέση στη καμπύλη, ώστε η P_1 να ελαχιστοποιείται. Τότε η P_1*x έχει σημείο επαφής με την γραμμή των ροπών. Συνεπώς η P_1 υπολογίζεται από BM ή C_3 ή D_2 με πολλαπλασιασμό *2μQ και διαιρώντας με x_M, x_3 ή x_2 αντίστοιχα. Έτσι,

$$P_1 = \frac{(MB, C_3, D_2) \cdot 2\mu Q}{x_{(M,3,2)}} \qquad (3.23)$$

3.5.3 Περίπτωση σφηνοειδούς κύλισης

Κατά την σφηνοειδή κύλιση η θέση του κέντρου τριβής M είναι γεωμετρικά ορισμένη και μάλιστα μέσω της θέσης όλων των τροχοφόρων αξόνων και του διακένου όπως φαίνεται στην απεικόνιση (Σχ.3.11). Χαρακτηριστικό της θέσης του

είναι ότι η κάθετος επί αυτού διέρχεται από το κέντρο της κυκλικής καμπύλης Ο. Η τιμή x μπορεί να υπολογισθεί ως εξής:

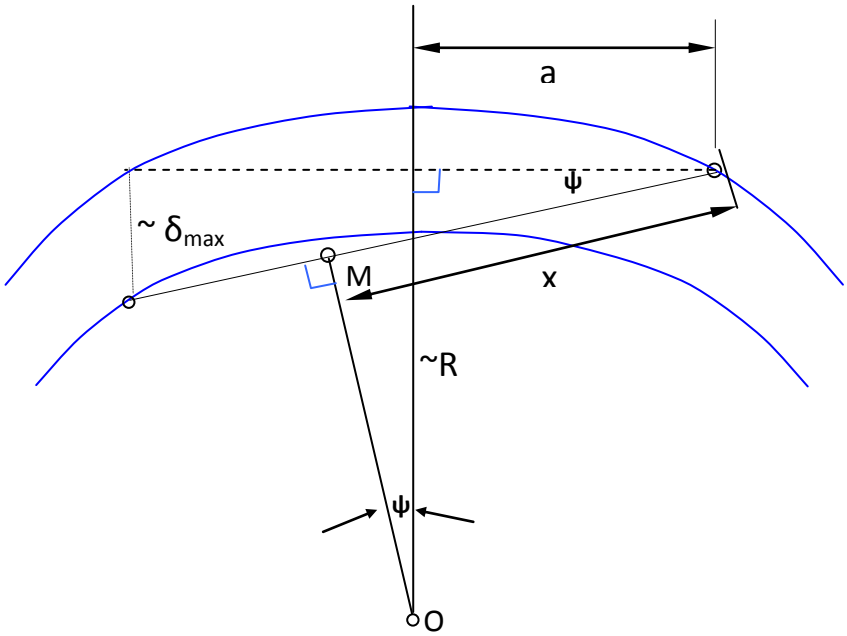


Σχήμα3.11: Ολισθήσεις και δυνάμεις μεταξύ τροχού και σιδ/χιας κατά την κίνηση στροφής του οχήματος στην καμπύλη (όχημα σε σφηνοειδή θέση)

Κατ΄ αρχήν το όχημα τοποθετείται στην θέση ''σφηνοειδής κύλιση'' (κατά μήκος άξονας με εστιγμένη γραμμή). Λόγω συμμετρίας το κέντρο τριβής βρίσκεται στη μέση του μεταξονίου (x = a). Τοποθετώντας το όχημα στην θέση ''σφηνοειδής κύλιση'', ο κατά μήκος άξονας του οχήματος δέχεται μία περιστροφή κατά τη γωνία ψ. Η ίδια γωνία εμφανίζεται μεταξύ των καθέτων στα δύο κέντρα τριβής. Προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon\phi\psi = \frac{\delta_{max}}{2a} = \frac{x-a}{R} \qquad (3.24)$$

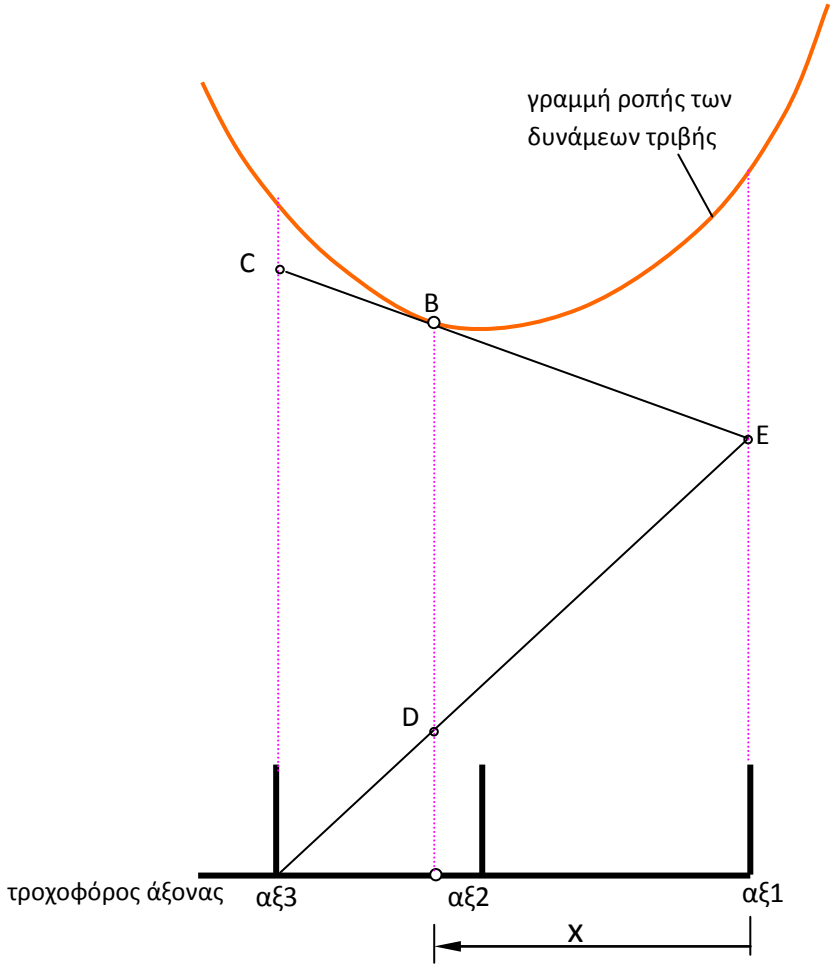
από τη σχέση αυτή έπεται $x = a + \frac{\delta_{max} \cdot R}{2a}$ *(3.25)*



Σχήμα 3.12: Κέντρο τριβής στην περίπτωση σφηνοειδούς κύλισης

Στην απεικόνιση (Σχ.3.13) φαίνεται η εφαρμογή της μεθόδου του ελαχίστου για την περίπτωση αυτή. Η γραμμή ροπών είναι η ίδια όπως και στη περίπτωση της ελεύθερης κύλισης. Σε απόσταση x από τον τροχοφόρο άξονα 1, σύμφωνα με την σχέση (3.25), σημείο B επί της γραμμής των ροπών, φέρεται εφαπτομένη η οποία τέμνει τις κατακόρυφες στους τροχοφόρους άξονες 1 και 3 στα σημεία E και C αντίστοιχα. Η τιμή των ροπών μεταξύ της ευθείας άξονα 3 – E και του κατά μήκος άξονα του οχήματος (3 – 1), απεικονίζουν τη ροπή $P_3 \cdot (a - x)$ της δύναμης κατεύθυνσης P_3. Εξ αυτού η P_3 υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή Σq που αντιστοιχεί υπεράνω του τροχοφόρου άξονα 1 έως το σημείο E, με την τιμή $2\mu \cdot Q$ και διαιρώντας δια το μεταξόνιο a_3. Η τιμή των ροπών για τον υπολογισμό της δύναμης κατεύθυνσης P_1, λαμβάνεται μεταξύ της ευθείας άξονα 3 – E και της ευθείας C – E. Εξ αυτού η P_1 υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την τιμή Σq που αντιστοιχεί υπεράνω του τροχοφόρου **άξονα 3 έως το σημείο C, με την τιμή $2\mu \cdot Q$ και διαιρώντας δια το μεταξόνιο a_3.**

$$P_1 = \frac{C3 \cdot 2\mu Q}{a_3} \quad (3.26) \quad \text{και} \quad P_3 = \frac{E0 \cdot 2\mu Q}{a_3} \quad (3.27)$$



Σχήμα 3.13: Μέθοδος ελαχίστου για όχημα με 3 τροχοφόρους άξονες σε σφηνοειδή θέση

- Υπολογισμός των δυνάμεων

Όπως προαναφέρθηκε, πρέπει οι κατευθυντήριες δυνάμεις P στον όνυχα, να ισορροπούν τις δυνάμεις τριβής μ·Q.

Στους τροχούς των οποίων ο όνυχας δεν προσπίπτει στην σιδηροτροχιά η δύναμη τριβής μ·Q κατανέμεται:

- σε κατά μήκος δυνάμεις ψευδολίσθησης ± μ·Q·ημξ, οι οποίες δημιουργούν ροπή στρέψης στον τροχοφόρο άξονα και
- σε εγκάρσιες δυνάμεις ψευδολίσθησης ± μ·Q·συνξ

Στους τροχούς των οποίων ο όνυχας προσπίπτει στην σιδηροτροχιά, δρα η δύναμη κατεύθυνσης P και στην αντίθετη κατεύθυνση η δύναμη τριβής μ·Q·συνξ. Η συνολική δύναμη καθοδήγησης υπολογίζεται ως:

Y = P - μ·Q·συνξ

Έτσι οι δυνάμεις για κάθε τροχό υπολογίζονται ως εξής:

$Y_{11} = P_1 - \mu \cdot Q \cdot \sigma\upsilon\nu\xi_1$

$Y_{12} = - \mu \cdot Q \cdot \sigma\upsilon\nu\xi_1$

$Y_{21} = - \mu \cdot Q \cdot \sigma\upsilon\nu\xi_2$

$Y_{22} = - \mu \cdot Q \cdot \sigma\upsilon\nu\xi_2$

$Y_{31} = \mu \cdot Q \cdot \sigma\upsilon\nu\xi_3$

$Y_{32} = - P_3 + \mu \cdot Q \cdot \sigma\upsilon\nu\xi_3$

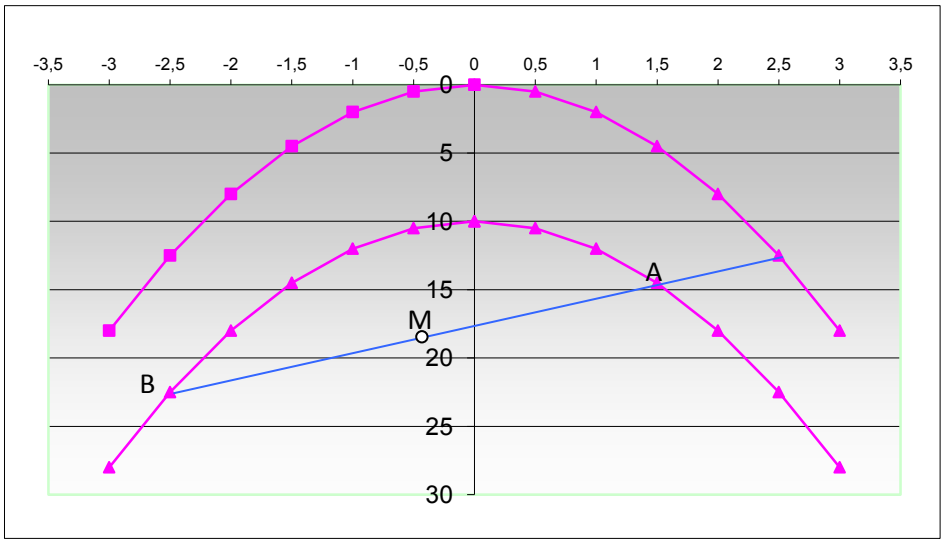
Θετικές δυνάμεις καθοδήγησης πιέζουν τον τροχό προς το εσωτερικό της καμπύλης, ενώ οι αρνητικές προς το εξωτερικό.

3.6 Παράδειγμα υπολογισμού των δυνάμεων

Να υπολογισθούν οι δυνάμεις ενός τριαξονικού φορείου με αξονικές αποστάσεις 2,5 m. Το φορείο αυτό δέχεται φορτίο 70 kN επί των τροχών και κινείται σε καμπύλη ακτίνας R = 250 m, με διάκενο δ = 10 mm. Ο συντελεστής τριβής λαμβάνεται ίσος με 0,3.

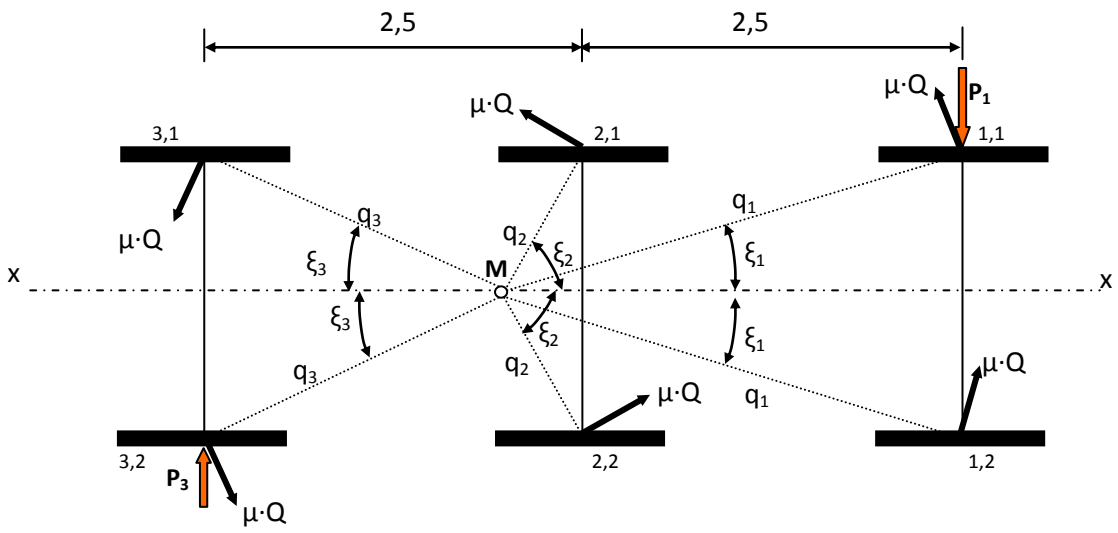
Επίλυση

Συντάσσεται το σχέδιο Vogel, σύμφωνα με τα προαναφερόμενα στην Παρ.1.7, προκειμένου να διαπιστωθεί η θέση του φορείου στο κανάλι του ίχνους και ως εκ τούτου και στη γραμμή.



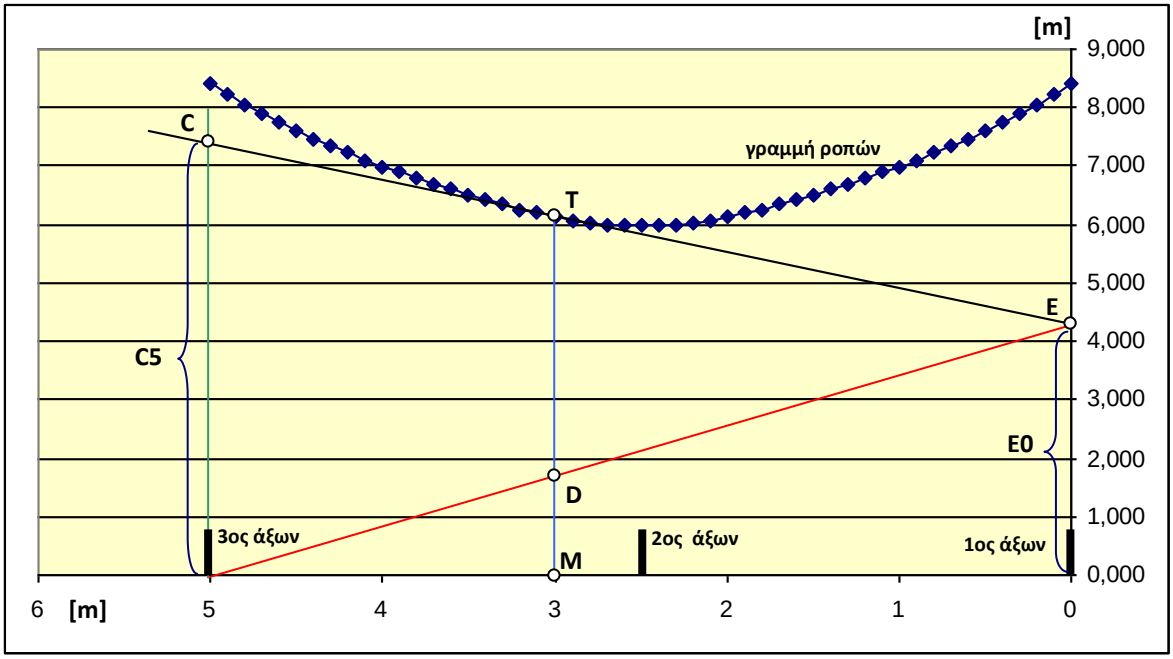
Σχήμα 3.14: Vogelplan για R=250m

Φέροντας τον άξονα του οχήματος (μπλε γραμμή) από x = 2,5 m (εξωτερική σιδηροτροχιά σε x = - 2,5 m (εσωτερική σιδηροτροχιά), διαπιστώνεται ότι η εσωτερική σιδηροτροχιά τέμνεται, που σημαίνει ότι το όχημα κινείται σε σφηνοειδή θέση. Σύμφωνα με την παραπάνω αναπτυχθείσα θεωρία, το μέσον M του τμήματος AB είναι το κέντρο τριβής του φορείου και βρίσκεται στη θέση x = -0,5. Ως εκ τούτου το σημείο M βρίσκεται 3,0 m από τον 1° άξονα του φορείου υπολογιστικά και γραφικά. Ως εκ τούτου το φορείο σε κάτοψη φαίνεται ως εξής:



Σχήμα 3.15: Απεικόνιση δυνάμεων

Συντάσσεται η γραμμή των ροπών των δυνάμεων τριβής, προκειμένου να υπολογισθούν οι κατευθυντήριες δυνάμεις P_1 και P_3. Λαμβάνονται περισσότερα υποθετικά σημεία (ανά 0,1 m) του κέντρου τριβής, προκειμένου να επιτευχθεί καλύτερη καμπυλότητα της γραμμής ροπών, επειδή η λύση είναι γραφική.



Σχήμα 3.16: Γραμμή ροπών και δυνάμεων τριβής-Απεικόνιση βραχιόνων και γωνιών

Υπολογίζονται οι βραχίονες q_1, q_2, q_3 και οι γωνίες ξ_1, ξ_2, ξ_3, για τις διάφορες θέσεις του σημείου **M**. Η κατακόρυφος στο σημείο **M** (τελική θέση) τέμνει τη γραμμή ροπών των δυνάμεων τριβής στο σημείο **T**. Στο σημείο **T** φέρεται εφαπτομένη (γραμμή CE), η οποία τέμνει τις κατακόρυφους στους άξονες 1 και 3, στα σημεία **E** και **C** αντίστοιχα. Οι τιμές C5=7,5 και E0=4,3 (βλ.Σχ.3.16), δίνουν τις κατευθυντήριες δυνάμεις:

$P_1 = 2 \cdot \mu \cdot Q \cdot C5 / a_3 = 2 \cdot 0{,}3 \cdot 70 \cdot 7{,}5 / 5 = 63{,}0$ kN και

$P_3 = -2 \cdot \mu \cdot Q \cdot E0 / a_3 = 2 \cdot 0{,}3 \cdot 70 \cdot 4{,}3 / 5 = 36{,}1$ kN αντίστοιχα.

Οι δυνάμεις καθοδήγησης προκύπτουν ως παρακάτω:

$Y_{11} = P_1 - \mu \cdot Q \cdot \text{συν}\xi_1 = 63 - 0{,}3 \cdot 70 \cdot 0{,}970143 = 42{,}63$ kN

$Y_{12} = - \mu \cdot Q \cdot \text{συν}\xi_1 = -0{,}3 \cdot 70 \cdot 0{,}970143 = 20{,}4$ kN

$Y_{21} = - \mu \cdot Q \cdot \text{συν}\xi_2 = -0{,}3 \cdot 70 \cdot 0{,}5547 = -11{,}6$ kN

$Y_{22} = - \mu \cdot Q \cdot \text{συν}\xi_2 = -0{,}3 \cdot 70 \cdot 0{,}5547 = -11{,}6$ kN

$Y_{31} = \mu \cdot Q \cdot \text{συν}\xi_3 = -0{,}3 \cdot 70 \cdot 0{,}936329 = 19{,}7$ kN

$Y_{32} = - P_3 + \mu \cdot Q \cdot \text{συν}\xi_3 = -36{,}1 + 0{,}3 \cdot 70 \cdot 0{,}936329 = -16{,}5$ kN

3.7 Γωνία πρόσπτωσης

Η γωνία πρόσπτωσης είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του τροχού και της σιδηροτροχιάς (βλ.Σχ.3.8). Βρίσκεται από το Vogelplan και υπολογίζεται στην περίπτωση σφηνοειδούς κύλισης, καθότι στην περίπτωση της ελεύθερης κύλισης δεν γνωρίζουμε την ακριβή θέση του άξονα, αλλά αυτή πιθανολογείται. Η γωνία πρόσπτωσης καθορίζει το συντελεστή τριβής, οπότε επηρεάζει τις δυνάμεις μQ και κατά συνέπεια και τις P. Παρατίθεται πίνακας που δίνει προτεινόμενες τιμές για το συντελεστή τριβής μ σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης.

Ψ (μοίρες)	μ
0	0
1	0,11
2	0,19
3	0,26
4	0,32
5	0,37
6	0,47
7	0,52
8	0,55

Πίνακας 3.3: Προτεινόμενες τιμές για το συντελεστή τριβής μ

Η αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης συνεπάγεται αύξηση των δυνάμεων, η οποία προκαλεί [5]:

- πρόσθετες φθορές στην επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς και κόπωση των υλικών επαφής
- αύξηση της πρόσφυσης με συνέπεια τη δυσχέρεια της κύλισης
- θόρυβο κατά την κύλιση
- πέρα από μια ορισμένη τιμή, ολίσθηση των τροχών
- θόρυβο κατά την κύλιση.

Μικρές γωνίες πρόσπτωσης παρουσιάζονται όταν οι τροχοφόροι άξονες βρίσκονται σε ελεύθερη κύλιση, ενώ όσο τείνει το φορείο να γίνει εφαπτομενικό στη σιδηροτροχιά, η γωνία πρόσπτωσης αυξάνει και παίρνει τη μέγιστη τιμή της όταν το όχημα βρίσκεται σε σφηνοειδή θέση.

Κεφάλαιο 4ο: Εφαρμογή στο τροχαίο υλικό του ΟΣΕ

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Vogel για τη διερεύνηση εγγραφής διαφόρων σιδηροδρομικών οχημάτων. Λήφθηκαν στοιχεία για διαφορετικούς τύπους οχημάτων (μηχανές έλξης, επιβατικά βαγόνια, εμπορευματικά βαγόνια, μηχανήματα συντήρησης) από τον ΟΣΕ τα οποία επεξεργάστηκαν και μετά ακολούθησε διερεύνηση ως προς την εγγραφή τους (βλ. Παράρτημα Α).

4.2 Βήματα επεξεργασίας

Τα σιδηροδρομικά οχήματα που χρησιμοποιήθηκαν έχουν φορεία είτε με δυο τροχοφόρους άξονες (διαξονικά), είτε με τρεις τροχοφόρους άξονες (τριαξονικά). Θεωρείται σκόπιμος ο διαχωρισμός των δυο διαδικασιών και η επισήμανση των διαφορών τους.

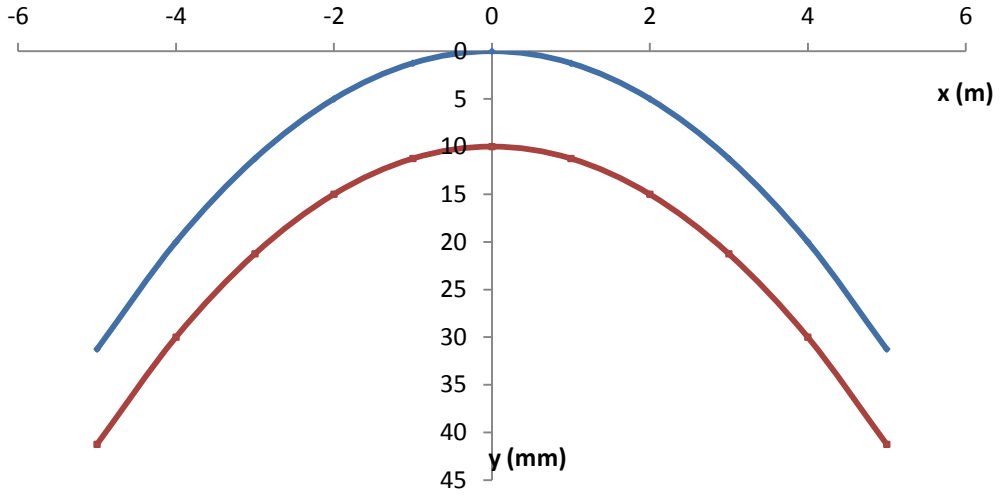
Το πρώτο βήμα είναι η απεικόνιση της οριζοντιογραφικής καμπύλης (παραμόρφωση κυκλικού τόξου με έλλειψη). Για όλα τα οχήματα επιλέχθηκε ενιαίο διάκενο (**δ=10mm**) και έγινε διερεύνηση για τις ακόλουθες τιμές ακτίνων:

R=100m, R=125m, R=150m, R=175m, R=200m, R=250m, R=300m, R=350m, R=400m.

R= 400m δ= 10mm

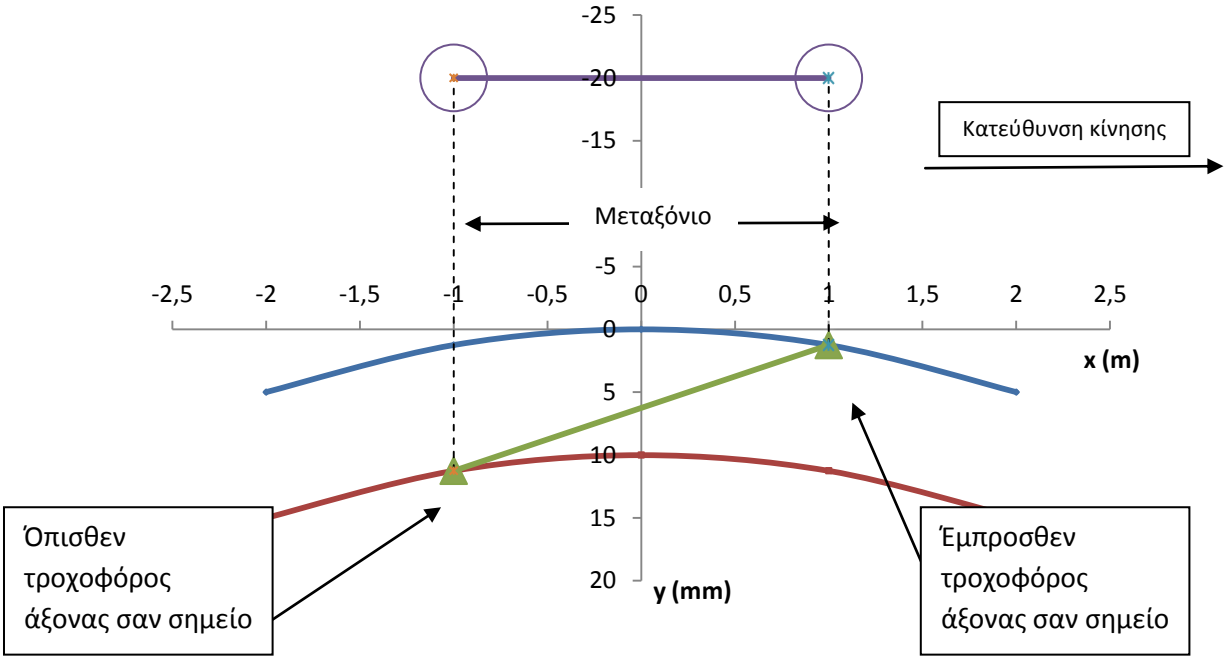
X	x^2	y	y+10
-5	25	31,25	41,25
-4	16	20	30
-3	9	11,25	21,25
-2	4	5	15
-1	1	1,25	11,25
0	0	0	10
1	1	1,25	11,25
2	4	5	15
3	9	11,25	21,25
4	16	20	30
5	25	31,25	41,25

Πίνακας 4.1: Συντεταγμένες σιδηροτροχιών

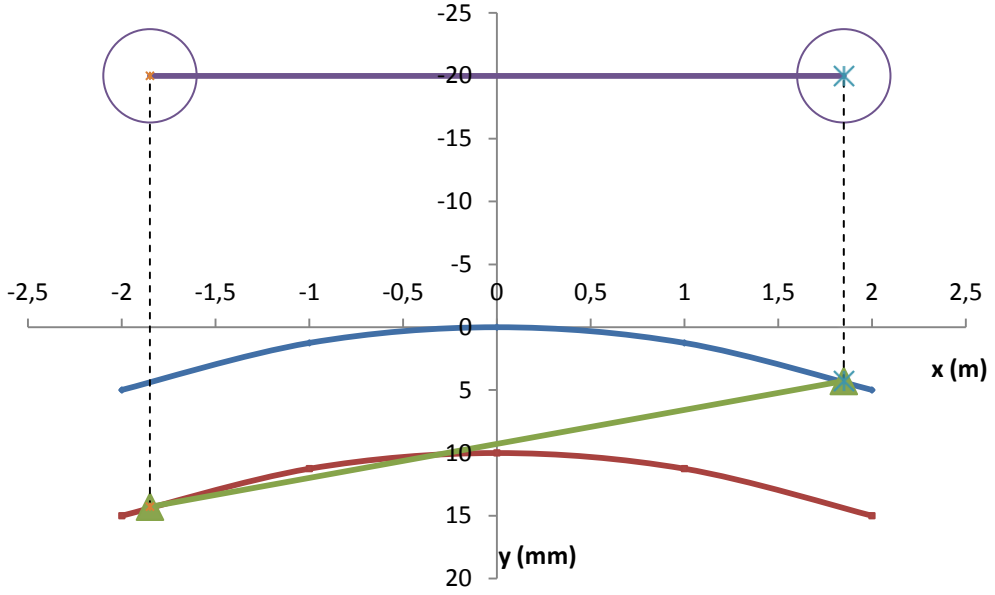


Σχήμα 4.1: Απεικόνιση με τη μέθοδο Vogel οριζοντιογραφικής καμπύλης με R=400m και δ=10mm

Έπειτα, κάθε όχημα τοποθετείται εντός της καμπύλης σε σφηνοειδή θέση, δηλαδή ο εξωτερικός τροχός του πρώτου τροχοφόρου άξονα εφάπτεται με τον όνυχα του στην εξωτερική σιδηροτροχιά και ο εσωτερικός τροχός του δεύτερου ή τρίτου άξονα (διαξονικό ή τριαξονικό φορείο αντίστοιχα) στην εσωτερική σιδηροτροχιά με τον όνυχα του αντίστοιχα. Αν η ευθεία σύνδεσης των τροχοφόρων αξόνων τέμνει την εσωτερική σιδηροτροχιά, τότε το φορείο βρίσκεται σε σφηνοειδή θέση (βλ.Σχ.4.3), ειδάλλως σε ελεύθερη κύλιση (βλ.Σχ.4.2).



Σχήμα 4.2: Τοποθέτηση φορείου στο κανάλι Vogel (φορείο σε ελεύθερη κύλιση)



Σχήμα 4.3: Όχημα στο κανάλι Vogel (σφηνοειδής θέση)

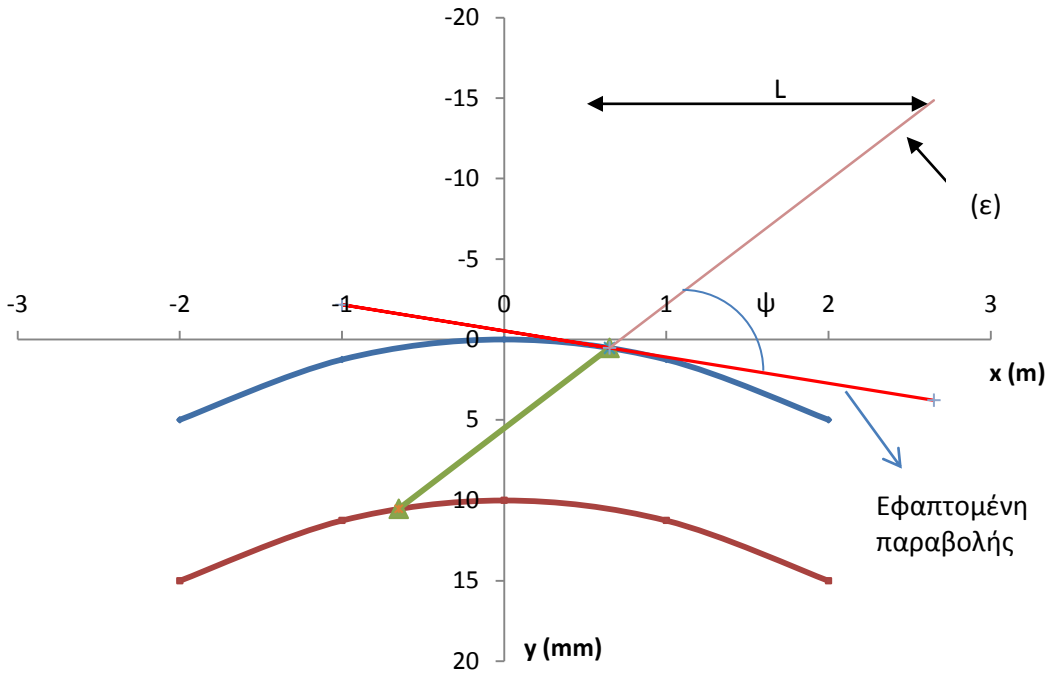
Τέλος, μετά την τοποθέτηση του φορείου υπολογίστηκε η γωνία πρόσπτωσης (βλ.Σχ.4.4):

- Σχεδιάζετε η εφαπτομένη της παραβολής στο σημείο που εφάπτεται ο πρώτος τροχοφόρος άξονας.
- Προεκτείνουμε την ευθεία (ε) σύνδεσης των τροχοφόρων αξόνων κατά μια απόσταση L=2000mm.
- Το τρίγωνο που δημιουργείται από την εφαπτομένη και την προέκταση της ευθείας (ε) είναι ορθογώνιο, λόγω της στρέβλωσης, όμως, η ορθή γωνία δεν είναι εμφανής. Η γωνία που δημιουργείται από την εφαπτομένη και την (ε) είναι η γωνία πρόσπτωσης.
- Για τον υπολογισμό της γωνίας χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon\varphi\psi = \frac{y(2000) - y(2000)_{\tau\rho o\chi.\alpha\xi.}}{L} \qquad (4.1)$$

Μέχρι και αυτό το σημείο η διαδικασία για τα διαξονικά και τριαξονικά φορεία είναι η ίδια. Η διαδικασία διαφέρει κατά τον υπολογισμό της απαιτούμενης διαπλάτυνσης σε περίπτωση που το όχημα βρίσκεται σε σφηνοειδή θέση (η ευθεία που ενώνει τους τροχοφόρους άξονες τέμνει την παραβολή).

Η εφαρμόσιμες τιμές διαπλάτυνσης σύμφωνα με τους ισχύοντες κανονισμούς του ΟΣΕ είναι 5mm-20mm, ενώ τιμές πάνω από 20mm θεωρούνται μη εφαρμόσιμες και τα οχήματα δεν έχουν τη δυνατότητα προσπέλασης της συγκεκριμένης οριζοντιογραφικής καμπύλης.



Σχήμα 4.4: Γωνία πρόσπτωσης τροχού επί της σιδηροτροχιάς

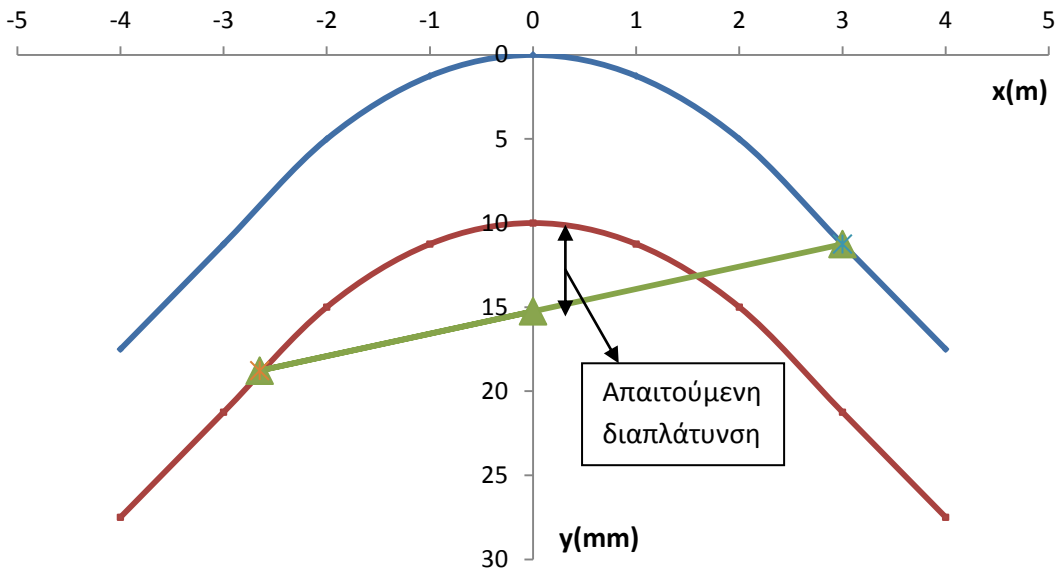
Διαξονικά Φορεία:

Για τον υπολογισμό της διαπλάτυνσης μετατοπίζουμε την εσωτερική σιδηροτροχιά έως ότου τμήσει το χαμηλότερο σημείο του φορείου. Η μετατόπιση της σιδηροτροχιάς που απαιτείται είναι και η απαιτούμενη διαπλάτυνση.

Οι τιμές που προκύπτουν μεταπίπτουν στην αμέσως μεγαλύτερη εφαρμόσιμη τιμή (5,10,15,20mm).

Τριαξονικά Φορεία:

Στα τριαξονικά φορεία η απαιτούμενη διαπλάτυνση προκύπτει από τη θέση του μεσαίου τροχοφόρου άξονα. Από τη στιγμή που το όχημα βρίσκεται σε σφηνοειδή θέση ο μεσαίος τροχοφόρος άξονας βρίσκεται εκτός του καναλιού Vogel, οπότε μετράμε την απόσταση του από την εσωτερική σιδηροτροχιά, αυτή είναι η απαιτούμενη διαπλάτυνση. Οι τιμές που προκύπτουν μεταπίπτουν στην αμέσως μεγαλύτερη εφαρμόσιμη τιμή (5,10,15,20mm).



Σχήμα 4.5: Τριαξονικό φορείο (σφηνοειδής θέση)-Διαπλάτυνση

4.3 Υπολογισμός δυνάμεων

Μετά τη διαδικασία εύρεσης της απαιτούμενης διαπλάτυνσης και της γωνίας πρόσπτωσης του τροχού επί της σιδηροτροχιάς για κάθε όχημα, ακολούθησε ο υπολογισμός των δυνάμεων μεταξύ τροχού σιδηροτροχιάς για την περίπτωση ελεύθερης και σφηνοειδούς κύλισης για ένα διαξονικό και ένα τριαξονικό φορείο.

Ελεύθερη κύλιση:

Στην περίπτωση της ελεύθερης κύλισης η θέση του κέντρου τριβής Μ είναι άγνωστη. Για την εύρεση του Μ φτιάχνουμε τη γραμμή ροπών του οχήματος. Η γραμμή ροπών προκύπτει ως άθροισμα των βραχιόνων q_i. Τέλος, σύμφωνα με τη Μέθοδο Ελαχίστου του Heumann το κέντρο τριβής παίρνει τέτοια θέση ώστε να ελαχιστοποιείται η κατευθυντήρια δύναμη. Οπότε, η εφαπτομένη από τον πρώτο άξονα προς τη γραμμή ροπών μας δίνει τη θέση του Μ. (βλ.Σχ.3.10)

Σφηνοειδής κύλιση:

Στην περίπτωση της σφηνοειδούς κύλισης η θέση του κέντρου τριβής Μ είναι γνωστή και υπολογίζεται από το Vogelplan (βλ.Σχ.3.12). Οπότε, αφού φτιάξουμε τη γραμμή ροπών, τοποθετούμε το Μ στο διάγραμμα και φέρνουμε την εφαπτομένη στο σημείο που μας υποδεικνύει το Μ (βλ.Σχ.3.13).

Από τις αποστάσεις που έχουμε μετρήσει από το διάγραμμα υπολογίζουμε τις κατευθυντήριες δυνάμεις P (σχέσεις 3.23, 3.26, 3.27) και τις δυνάμεις σε κάθε τροχό Y.

Τέλος, γίνεται σύγκριση της συνισταμένης των κατευθυντήριων δυνάμεων ΣY με την οριακή τιμή του Prud' homme.

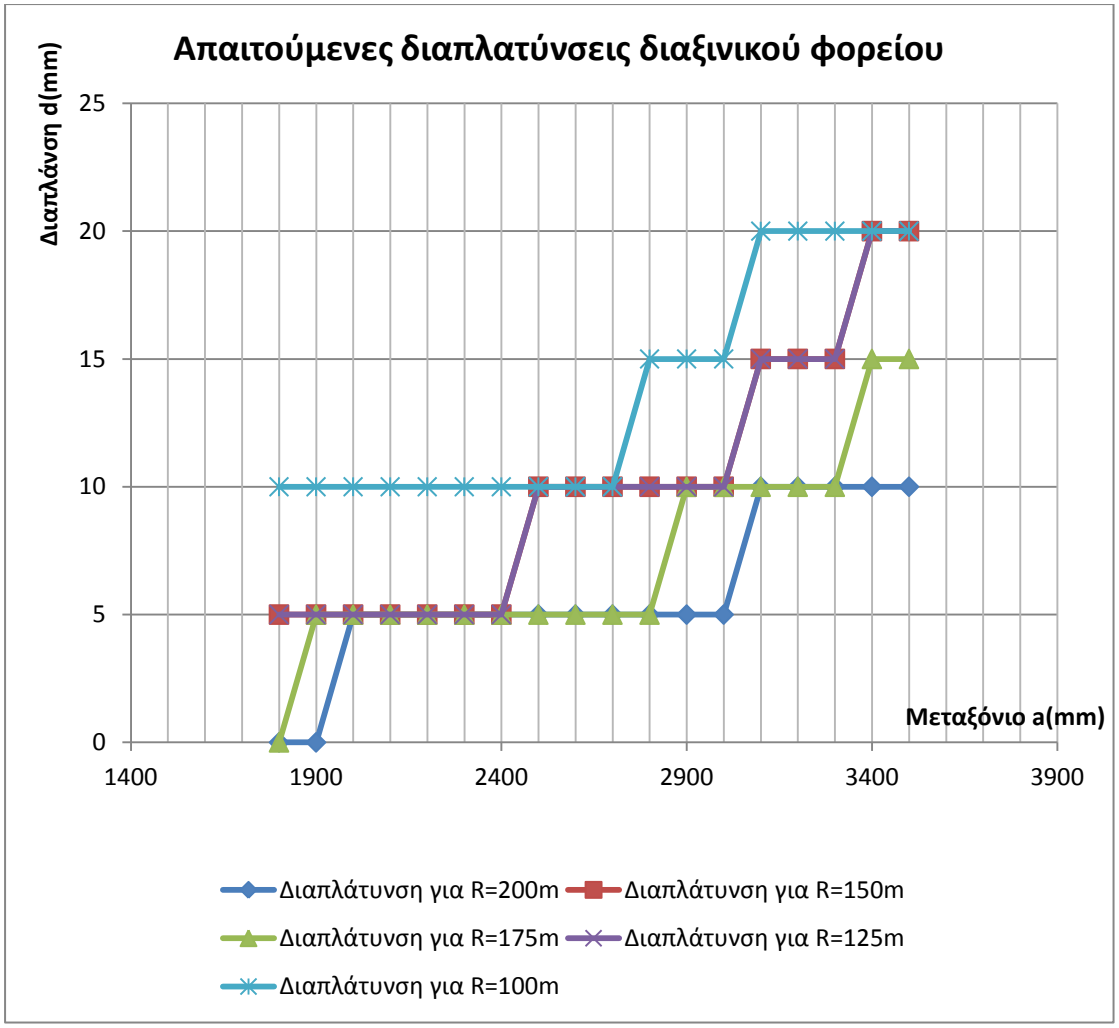
Η οριακή τιμή εξαρτάται από τα φορτία Q_1 και Q_2 των τροχοφόρων αξόνων του φορείου. Σύμφωνα με μετρήσεις των Γαλλικών Σιδηροδρόμων συντάχθηκε για την οριακή τιμή η εμπειρική εξίσωση, γνωστή ως σχέση Prud'homme:

$$\Sigma Y = 1.20 * [10kN + \frac{Q_1+Q_2}{3}] \qquad (4.2)$$

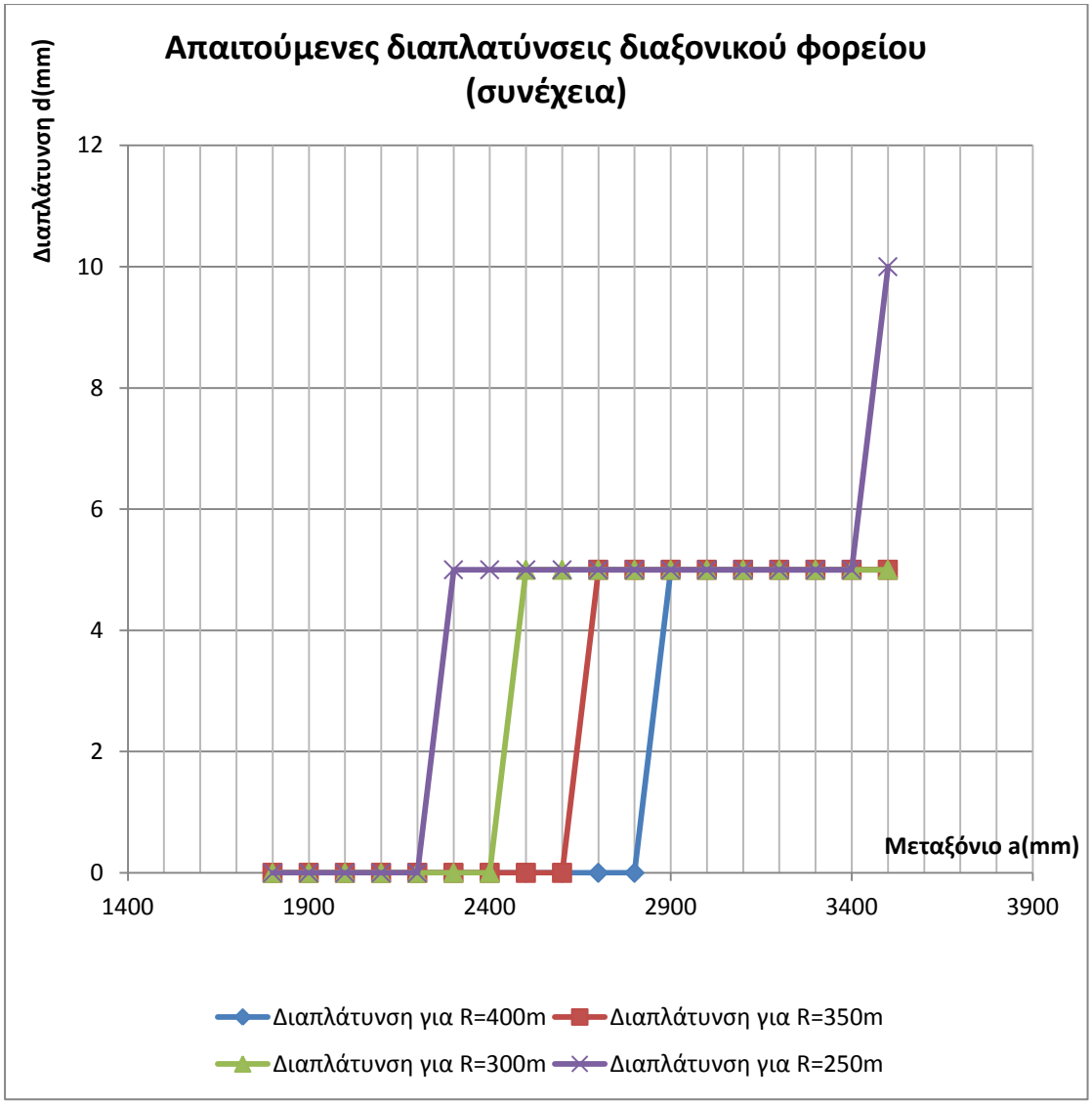
4.4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

4.4.1 Αποτελέσματα διαπλατύνσεων

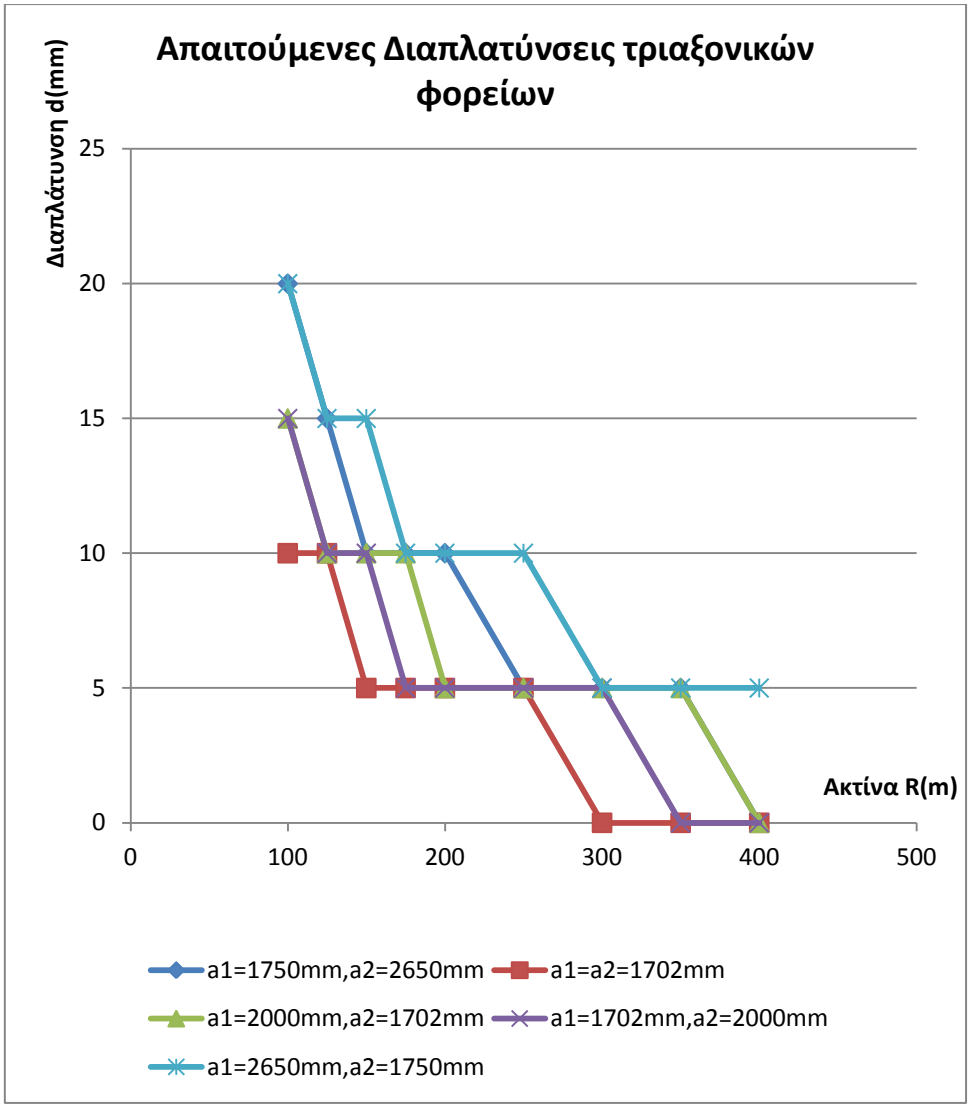
Η διερεύνηση έγινε για διαξονικά φορεία με τιμές μεταξονίων: **a=1800mm, a=1900mm, a=2000mm, a=2100mm, a=2200mm, a=2300mm, a=2400mm, a=2500mm, a=2600mm, a=2700mm, a=2800mm, a=2900mm, a=3000mm, a=3100mm, a=3200mm, a=3300mm, a=3400mm και a=3500mm,** και για τριαξονικά φορεία σε κίνηση προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Παρακάτω παρουσιάζονται οι διαπλατύνσεις που απαιτούνται για το καθένα για τις προαναφερθείσες τιμές ακτίνων.



Σχήμα 4.6: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις διαξονικών φορείων



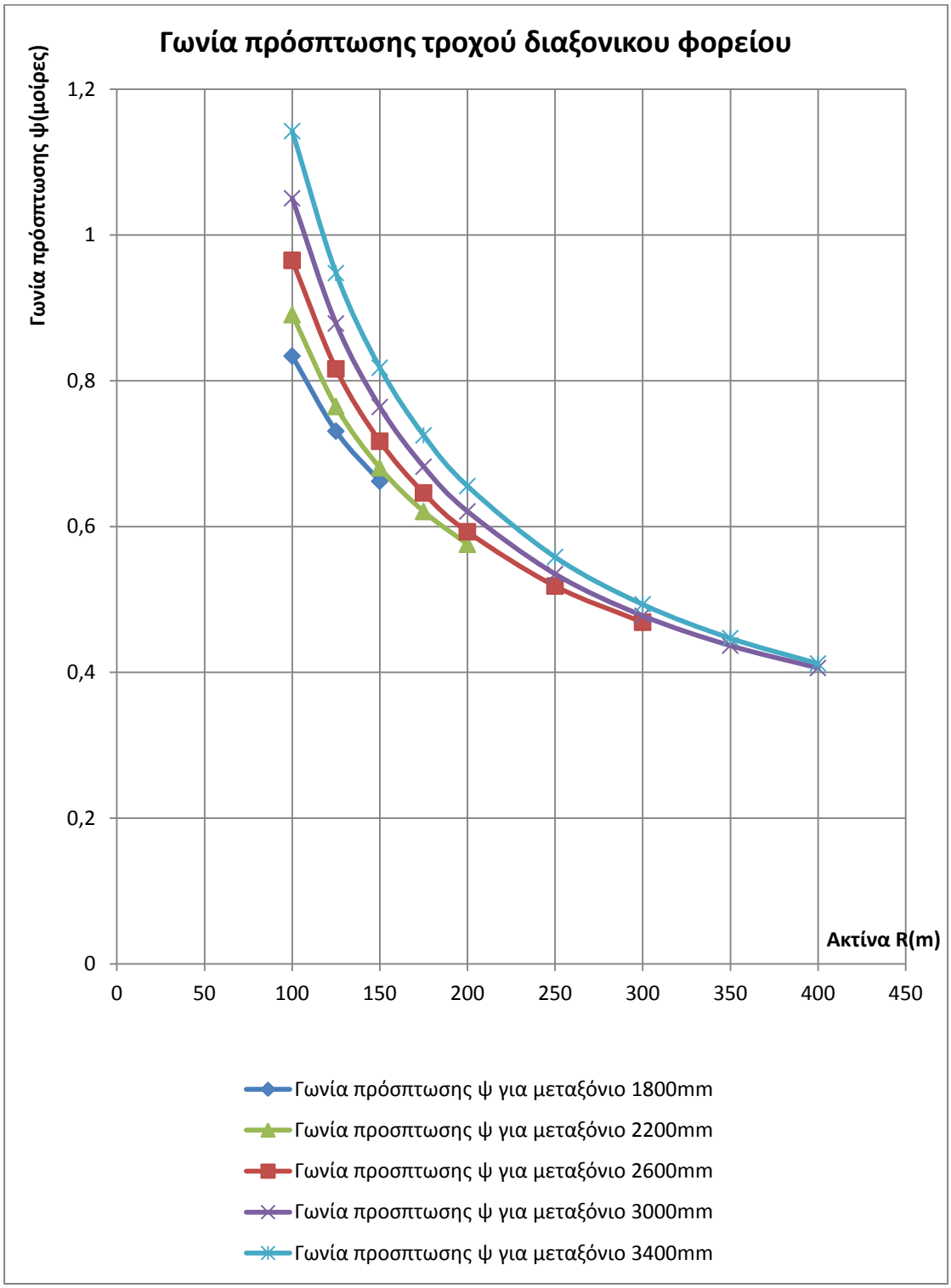
Σχήμα 4.7: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις διαξονικών φορείων



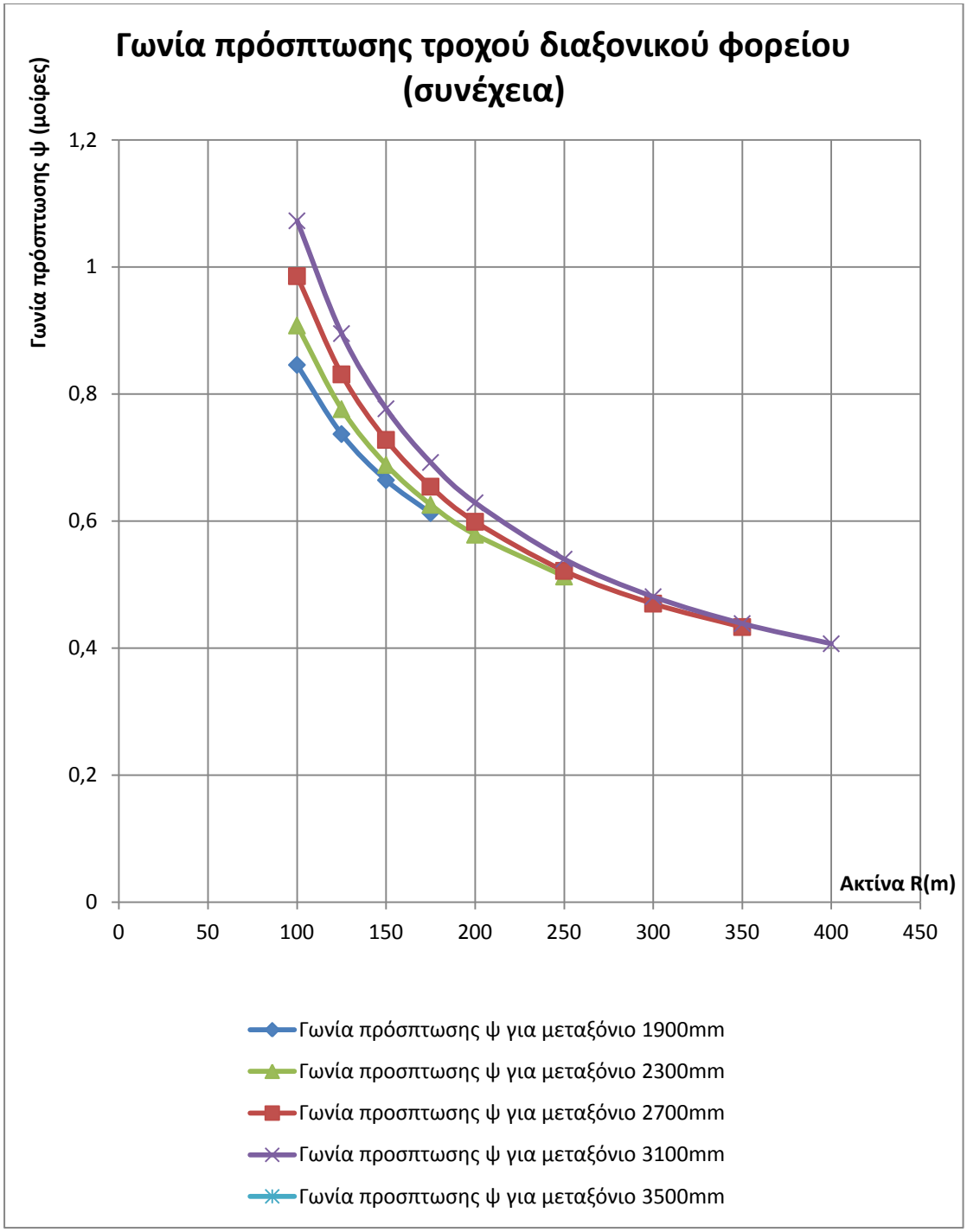
Σχήμα 4.8: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις τριαξονικών φορείων

4.4.2 Αποτελέσματα γωνίας πρόσπτωσης

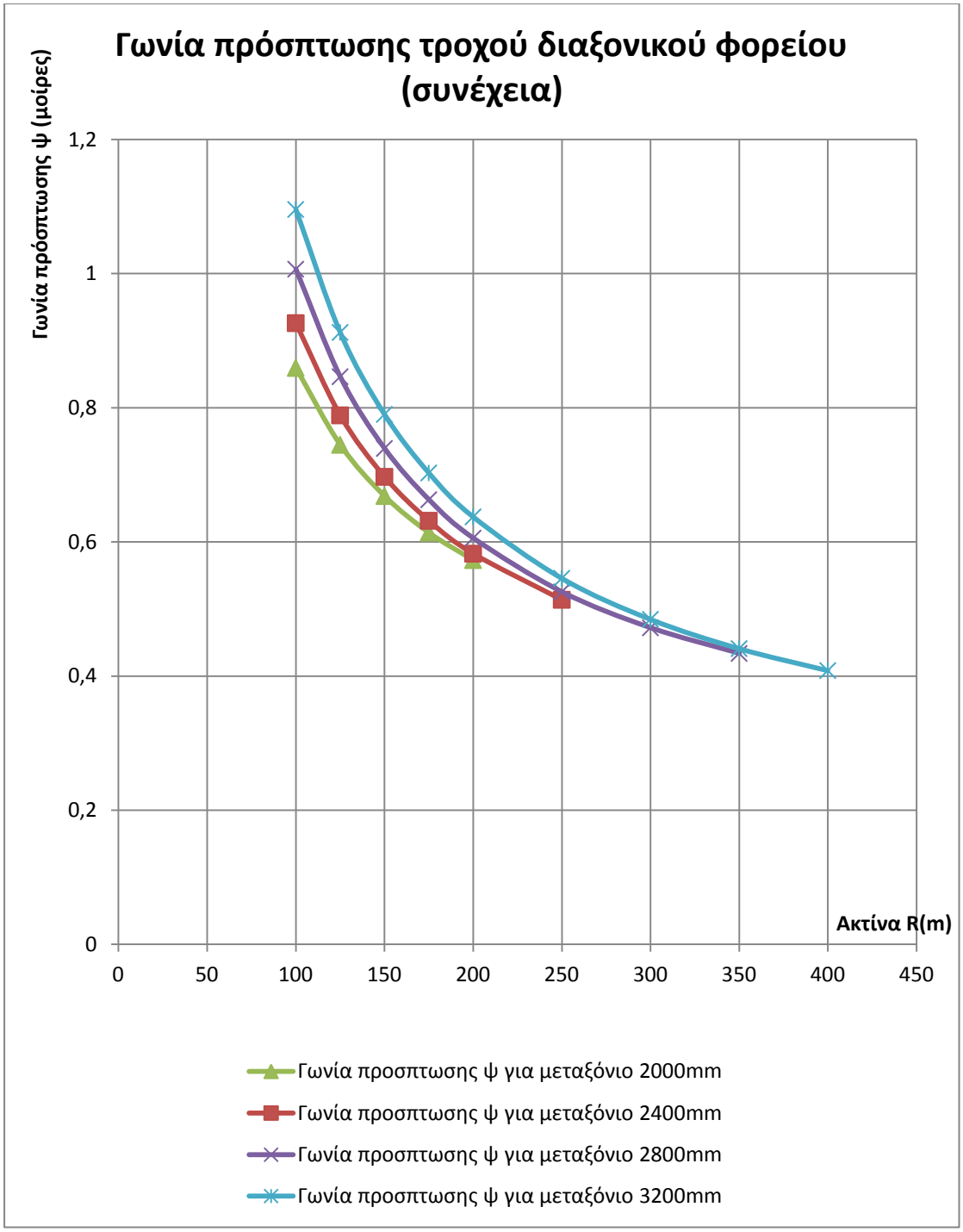
Μετά τον υπολογισμό των απαιτούμενων διαπλατύνσεων έγινε ο υπολογισμός της γωνίας πρόσπτωσης για διαξονικά φορεία με τιμές μεταξονίων: **a=1800mm, a=1900mm, a=2000mm, a=2100mm, a=2200mm, a=2300mm, a=2400mm, a=2500mm, a=2600mm, a=2700mm, a=2800mm, a=2900mm, a=3000mm, a=3100mm, a=3200mm, a=3300mm, a=3400mm και a=3500mm** και για ακτίνες **R=100m, R=125m, R=150m, R=175m, R=200m, R=250m, R=300m, R=350m, R=400m** και για τριαξονικά φορεία για κίνηση προς τα εμπρός και προς τα πίσω. Παρακάτω παρουσιάζονται οι γωνίες πρόσπτωσης που προκύπτουν για το καθένα για τις προαναφερθείσες τιμές ακτίνων.



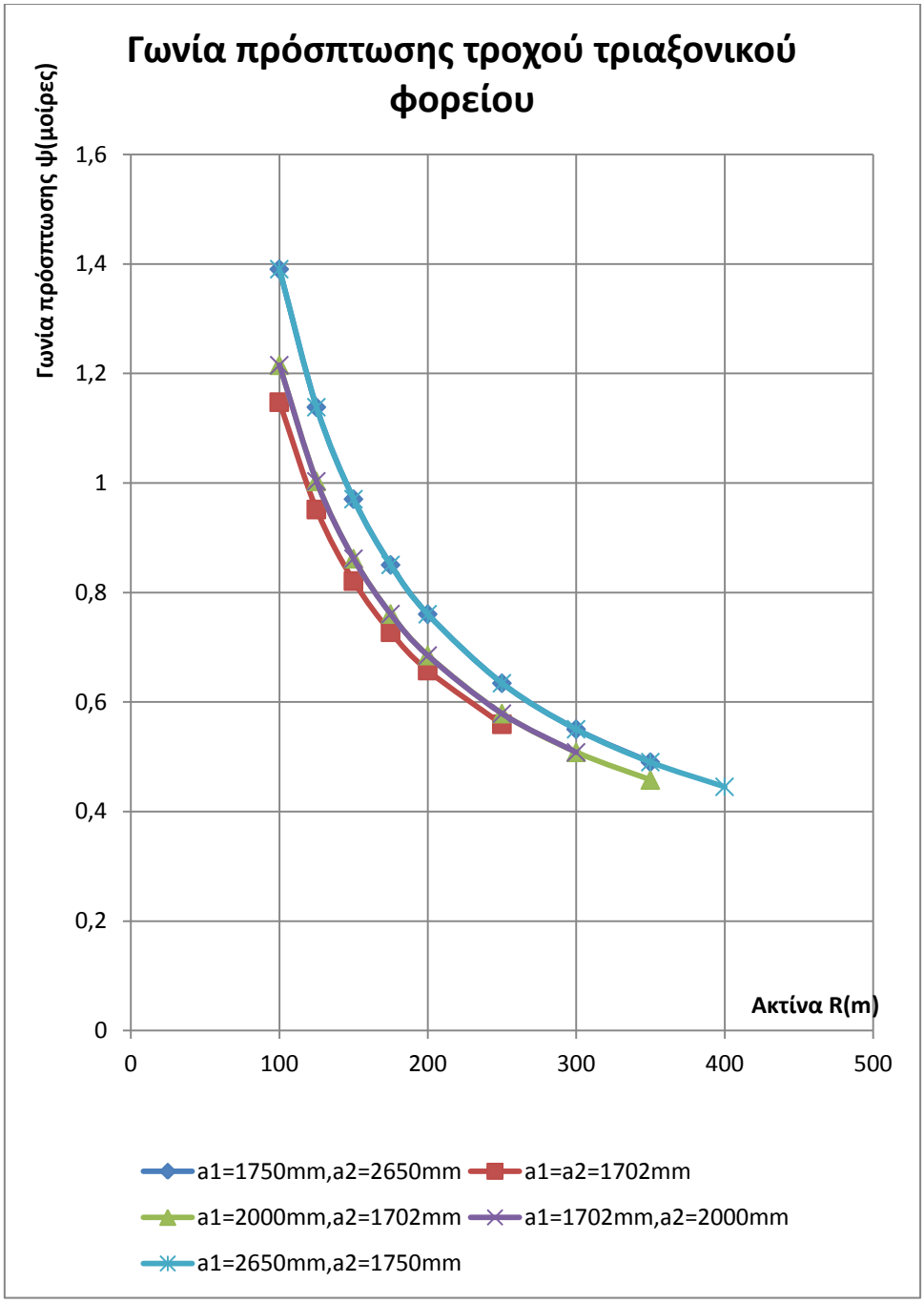
Σχήμα 4.9: Γωνία πρόσπτωσης ψ του τροχού επί της σιδηροτροχιάς (διαξονικά φορεία)



Σχήμα 4.10: Γωνία πρόσπτωσης ψ του τροχού επί της σιδηροτροχιάς (διαξονικά φορεία)



Σχήμα 4.11: Γωνία πρόσπτωσης ψ του τροχού επί της σιδηροτροχιάς (διαξονικά φορεία)



Σχήμα 4.12: Γωνία πρόσπτωσης ψ του τροχού επί της σιδηροτροχιάς (τριαξονικά φορεία)

4.4.3 Αποτελέσματα υπολογισμού δυνάμεων

Έγινε υπολογισμός των δυνάμεων για το διαξονικό φορείο της μηχανής έλξης General Electric και για το τριαξονικό φορείο της μηχανής έλξης MLW A501-510. Ο υπολογισμός έγινε για την περίπτωση της σφηνοειδούς κύλισης.

- MLW A501-510

Μεταξόνιο $a_1=a_2$	1702	mm
Ακτίνα R	250	m
Σημείο τριβής M	2,4	m
Φορτίο τροχού Q	101,37	kN
Κατευθυντήρια P1	93,02188	kN
Κατευθυντήρια P3	-51,8776	KN
cosξ1	0,958101	
cosξ2	0,697299	
cosξ3	-0,8136	
Καθοδήγησης Y11	63,88509	kN
Καθοδήγησης Y12	-29,1368	kN
Καθοδήγησης Y21	-21,2056	kN
Καθοδήγησης Y22	-21,2056	kN
Καθοδήγησης Y31	-24,7423	kN
Καθοδήγησης Y32	27,1353	kN
Συνισταμένη καθοδήγησης 1^{ου} άξονα ΣΥ	93,02188	kN
ΣYprud'homme	93,096	kN

Πίνακας 4.2: Υπολογισμός δυνάμεων σε σφηνοειδή κύλιση MLW

- General Electric

Μεταξόνιο a	2028	mm
Ακτίνα R	100	m
Σημείο τριβής M	1,5	m
Φορτίο τροχού Q	77,25375	kN
Κατευθυντήρια P1	59,42596	kN
Κατευθυντήρια P3	43,42666	KN
cosξ1	0,902109	
cosξ2	-0,5927	
Καθοδήγησης Y11	38,51858	kN
Καθοδήγησης Y12	-20,9074	kN
Καθοδήγησης Y21	13,73652	kN
Καθοδήγησης Y22	-57,1632	kN
Συνισταμένη καθοδήγησης 1^{ου} άξονα ΣΥ	59,42596	kN
ΣYprud'homme	73,803	kN

Πίνακας 4.3: Υπολογισμός δυνάμεων σε σφηνοειδή κύλιση General Electric

4.4.4 Ποσοστό διερχόμενων οχημάτων

R(m)	d(mm)				
	0	5	10	15	20
	%Διερχόμενων οχημάτων				
400	65,22	100,00	100,00	100,00	100,00
350	52,17	100,00	100,00	100,00	100,00
300	47,83	100,00	100,00	100,00	100,00
250	21,74	91,30	100,00	100,00	100,00
200	8,70	69,57	100,00	100,00	100,00
175	4,35	56,52	100,00	100,00	100,00
150	0,00	34,78	95,65	100,00	100,00
125	0,00	30,43	69,57	100,00	100,00
100	0,00	0,00	47,83	69,57	100,00

Πίνακας 4.4: Ποσοστό διερχόμενων οχημάτων

Στον παραπάνω πίνακα παρατίθενται το ποσοστό των διερχόμενων οχημάτων ανά οριζοντιογραφική ακτίνα ανάλογα με την εφαρμοσμένη διαπλάτυνση. Με πράσινο χρώμα φαίνεται η απαιτούμενη διαπλάτυνση για να διέρχονται το 100% των οχημάτων. Ακολουθεί πίνακας με τις προτεινόμενες αλλαγές όπως αυτές προέκυψαν από τα προς διερεύνηση οχήματα (βλ.Πιν.4.5)

R(m)	Διαπλάτυνση Κανονισμού (mm)	Διαπλάτυνση Διερεύνησης (mm)
R>400	0	0
R=400	0	5
400>R≥350	5	5
350>R≥300	10	5
300>R≥250	15	10
250>R≥175	20	10
175<R<125	20	15
R<125	20	20

Πίνακας 4.5: Σύγκριση αποτελεσμάτων και κανονισμού

Κεφάλαιο 5ο: Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της διερεύνησης , όπως αυτά προκύπτουν από τα διαγράμματα του προηγούμενου κεφαλαίου (Βλ.Κεφ.4) είναι οι εξής:

1. Η αύξηση του μήκους του μεταξονίου στα διαξονικά φορεία συνεπάγεται αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης, ενώ στα τριαξονικά φορεία η αύξηση του μήκους του πρώτου μεταξονίου συνεπάγεται αύξηση της γωνίας πρόσπτωσης. (Βλ. Σχ.4.9, Σχ.4.10, Σχ.4.11 και Σχ.4.12)

2. Στα διαξονικά φορεία η αύξηση του μήκους του μεταξονίου και στα τριαξονικά φορεία η αύξηση του μήκους του πρώτου μεταξονίου συνεπάγεται αύξηση της απαιτούμενης διαπλάτυνσης. (βλ. Σχ.4.6, Σχ.4.7 και Σχ.4.8)

3. Σε κάθε περίπτωση διαξονικού και τριαξονικού φορείου η υπολογιζόμενη γωνία πρόσπτωσης είναι πάντα μικρότερη από την οριακή τιμή ($ψ \leq 3^o$), οπότε οι φθορές που θα συμβούν είναι οι αναμενόμενες. (βλ.Σχ.4.9, Σχ.4.10, Σχ.4.11 και Σχ.4.12)

4. Τα οχήματα που χρησιμοποιούνται εντός αστικών περιοχών (μετρό, προαστιακός) έχουν φορεία με μικρότερο μεταξόνιο ($a \leq 2100mm$), για να έχουν τη δυνατότητα να εγγραφής σε μικρές οριζοντιογραφικές ακτίνες, που δεν μπορούν να αποφθεχθούν στις αστικές περιοχές και στα αμαξοστάσια.

5. Οι προκύπτουσες κατευθυντήριες δυνάμεις είναι πάντα μικρότερες από τις αντίστοιχες οριακές τιμές κατά Prud'homme, οπότε εξ' αυτού δεν υπάρχει κίνδυνος εγκάρσιας μετατόπισης της εσχάρας. (βλ.Πιν.4.2 και Πιν.4.3)

Κεφάλαιο 6ο: Εισηγήσεις για περαιτέρω έρευνα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε διερεύνηση εγγραφής οχημάτων σε καμπύλες με μικρές οριζοντιογραφική ακτίνα με τη μέθοδο Vogel για 24 διαφορετικά οχήματα του ΟΣΕ, εκ των οποίων τα 21 έχουν διαξονικά φορεία, ενώ τα 3 τριαξονικά φορεία. Στα οχήματα περιλαμβάνονται τόσο μηχανές έλξης, όσο και επιβατικά και εμπορευματικά βαγόνια, καθώς και τα 3 βασικά μηχανήματα συντήρησης γραμμής. Με την παρούσα εργασία καλύφθηκε ένα μεγάλο μέρος του διατιθέμενου από τον ΟΣΕ τροχαίου υλικού.

Επειδή, η μέθοδος Vogel έχει γεωμετρικό χαρακτήρα, προτείνεται σε επόμενες εργασίες:

- Η διερεύνηση του περιτυπώματος των οχημάτων με τη μέθοδο Vogel, και
- Η διερεύνηση των μέγιστων εμφανιζόμενων δυνάμεων με τη μέθοδο ελαχίστου του Heumann, αλλά να συμπεριληφθεί και η δυναμική των οχημάτων στις συγκεκριμένες καμπύλες, ανάλογα με την ταχύτητα.

Βιβλιογραφία

[1]: Λυμπέρης Κ. (2009). *Σιδηροδρομική Θεωρία και Εφαρμογές* Εκδόσεις: Συμμετρία

[2]: Πυργίδης Χ. (2006). *Εγκάρσια συμπεριφορά σιδηροδρομικού οχήματος*

[3]: Orlova A. And Boronenko Y. *The anatomy of railway vehicle running gear*

[4]: Isao Okamoto (2008). *How bogies work*

[5]: portal.survey.ntua.gr

[6]: Αμπακούμκιν Κ. και Λυμπέρης Κ. (2001). *Ειδικά Θέματα Σιδηροδρομικής*

[7]: Hauss-Ludwig Krugmann (1982). *Lauf der Schienarfahrzeuge im Gleis*

ΠΑΡΑΡΤΗΤΜΑ Α (ΤΡΟΧΑΙΟ ΥΛΙΚΟ ΤΟΥ ΟΣΕ-ΔΙΑΠΛΑΤΥΝΣΕΙΣ-ΓΩΝΙΕΣ ΠΡΟΣΠΩΤΣΗΣ)

Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται τα διαγράμματα Vogel για όλα τα εξεταζόμενα οχήματα. Παράλληλα, παρατίθενται πίνακες με τα χαρακτηριστικά του κάθε οχήματος:

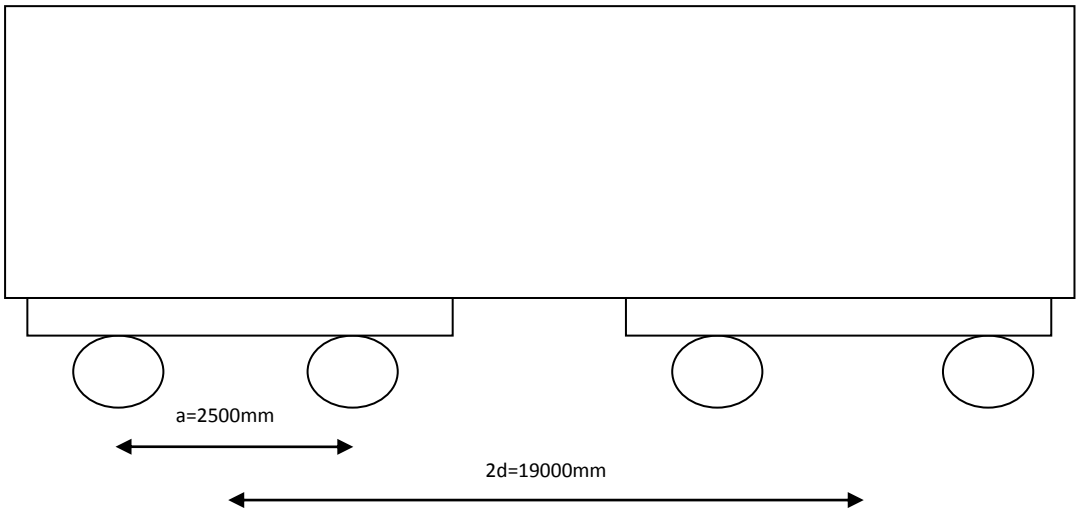
- Αριθμός φορείων
- Αριθμός τροχοφόρων αξόνων
- Τύπος φορείου
- Μεταξόνιο
- Απόσταση ομφαλών φορείων

Παράλληλα, παρατίθενται πίνακες με τις μέγιστες διαπλατύνσεις ανά όχημα, καθώς και τις απαιτούμενες προκύπτουσες διαπλατύνσεις για τις ακτίνες που μελετήθηκαν (R=400m, R=350m, R=300m, R=250m, R=200m, R=175m, R=150m, R=125m, R=100m).

Επίσης, για κάθε όχημα παρατίθενται ένα διάγραμμα Vogel με το όχημα σε ακτίνα R=400m, και ακολουθούν διαγράμματα με ένα απομονωμένο φορείο για μεγαλύτερη ευκρίνεια για κάθε μια από τις περιπτώσεις απαιτούμενης διαπλάτυνσης. Κάτω από τα διαγράμματα αναγράφεται και η γωνία πρόσπτωσης του τροχού επί της σιδηροτροχιάς (ψ).

Για όλα τα οχήματα δίνεται και ένα σκαρίφημα που παρουσιάζει τη θέση των φορείων, την απόσταση των ομφαλών των φορείων (2d) και το μεταξόνιο (a).

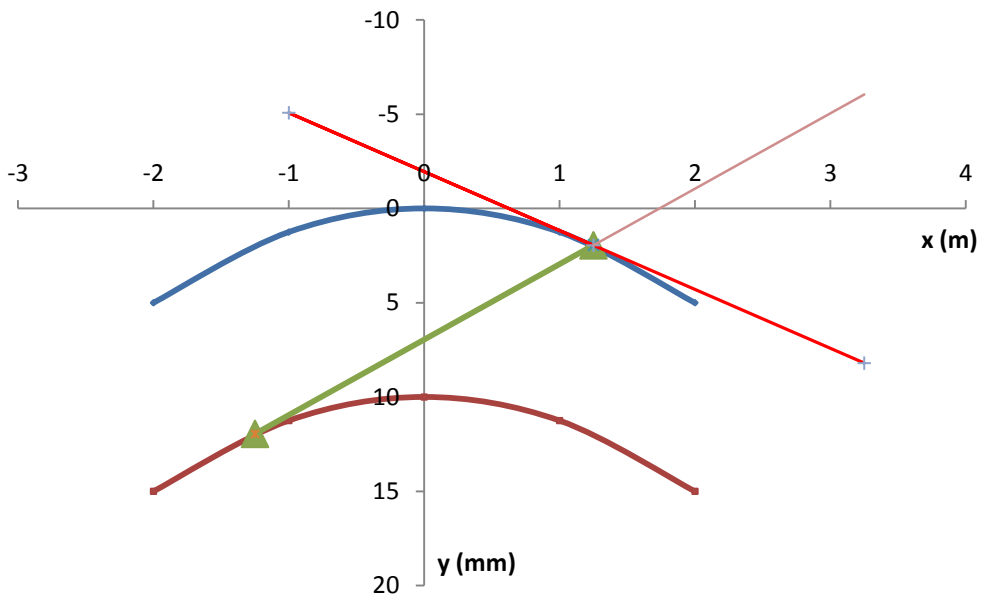
I. Διδάπεδη κλειστή φορτάμαξα μεταφοράς αυτοκινήτων τύπου MDDm ή N12



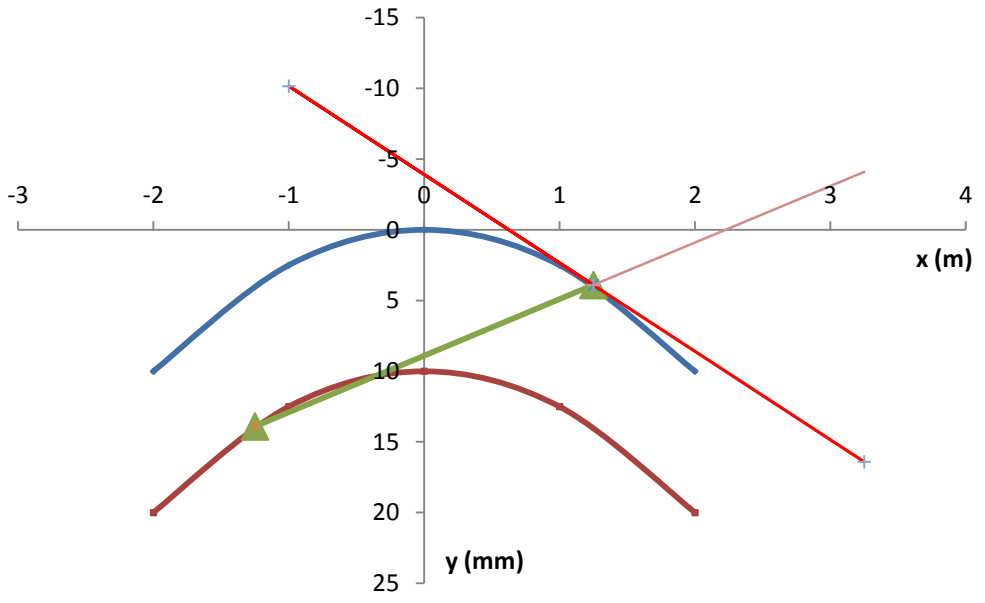
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	2500
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	19000
Είδος οχήματος	Εμπορευματικό Βαγόνι

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
175-100	10

Πίνακας Π1: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

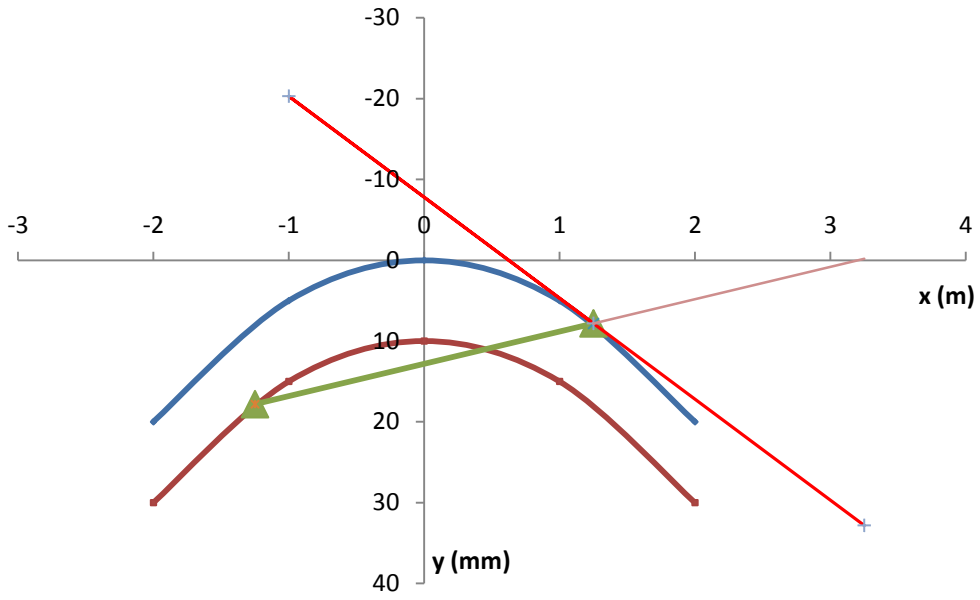


Σχήμα Π1: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π2: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

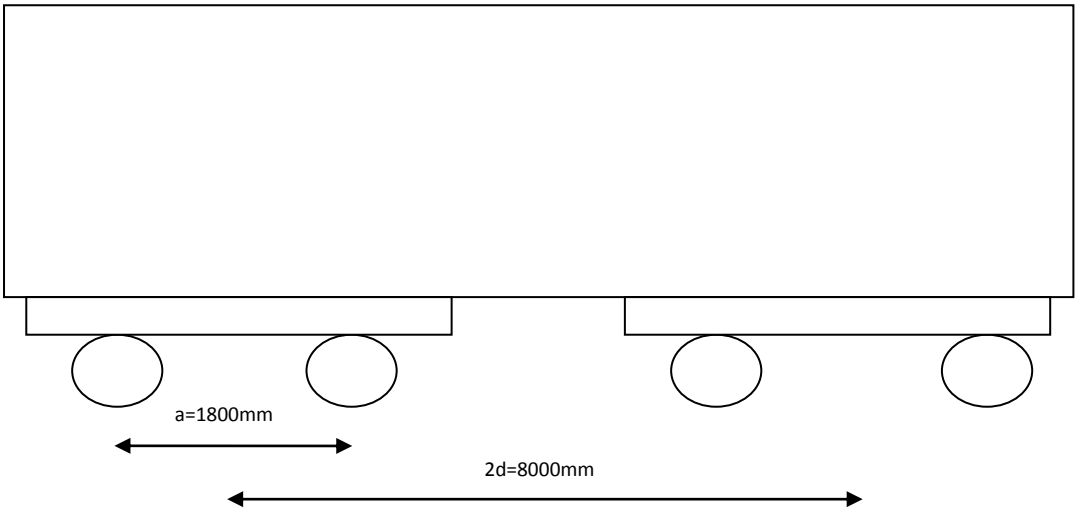
Ψ=0,58^{o}



Σχήμα Π3: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,95^{o}

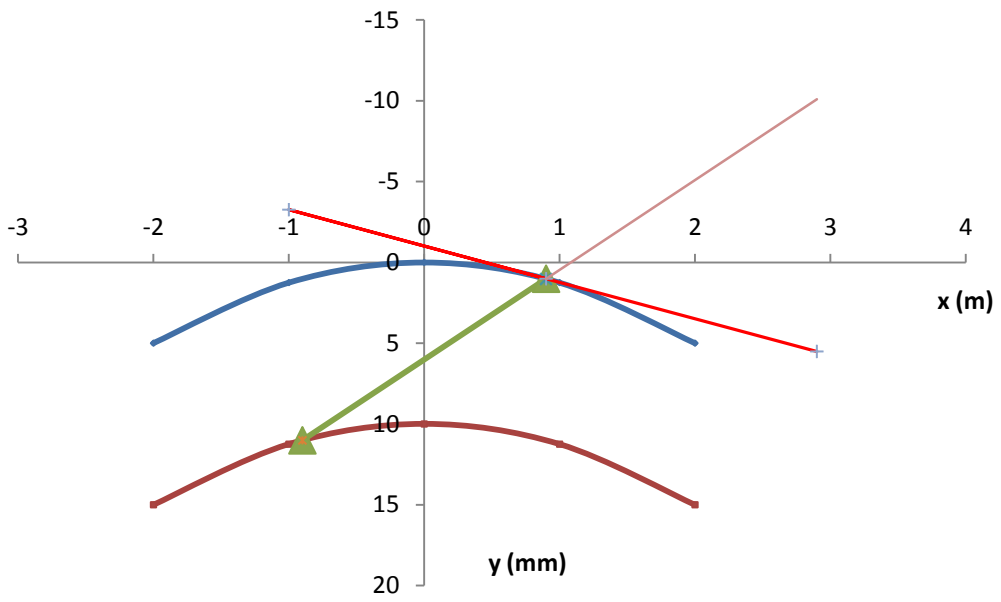
II. Βυτιοφόρα φορτάμαξα τύπου Zaces ή P9



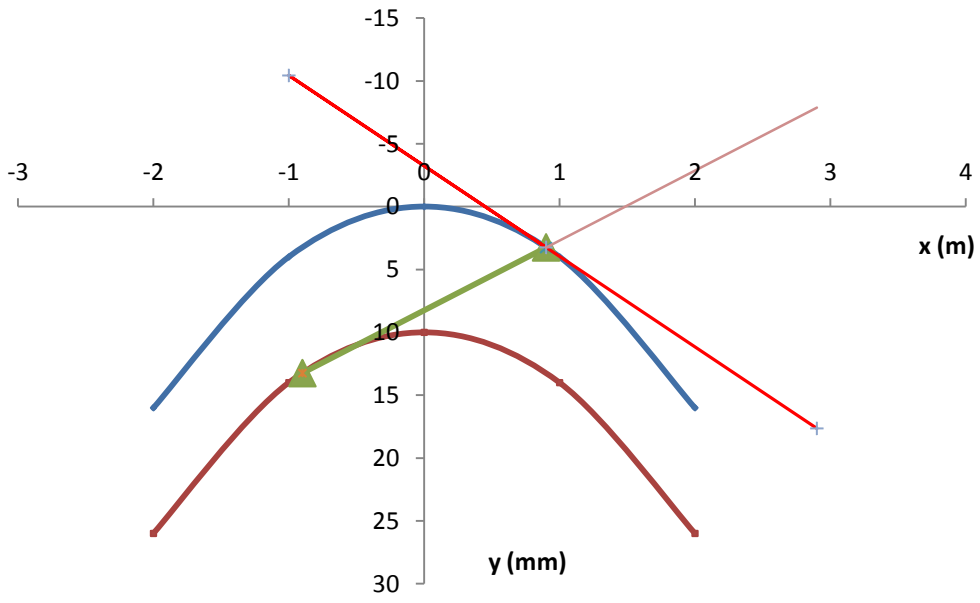
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	1800
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	8000
Είδος οχήματος	Εμπορευματικό Βαγόνι

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-175	0
175-125	5
100	10

Πίνακας Π2: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

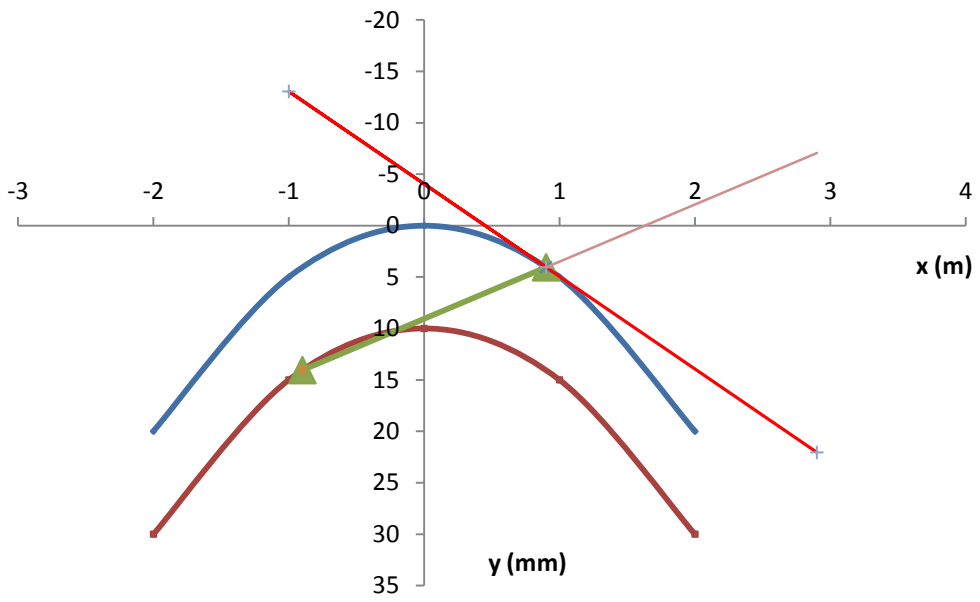


Σχήμα Π4: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π5: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

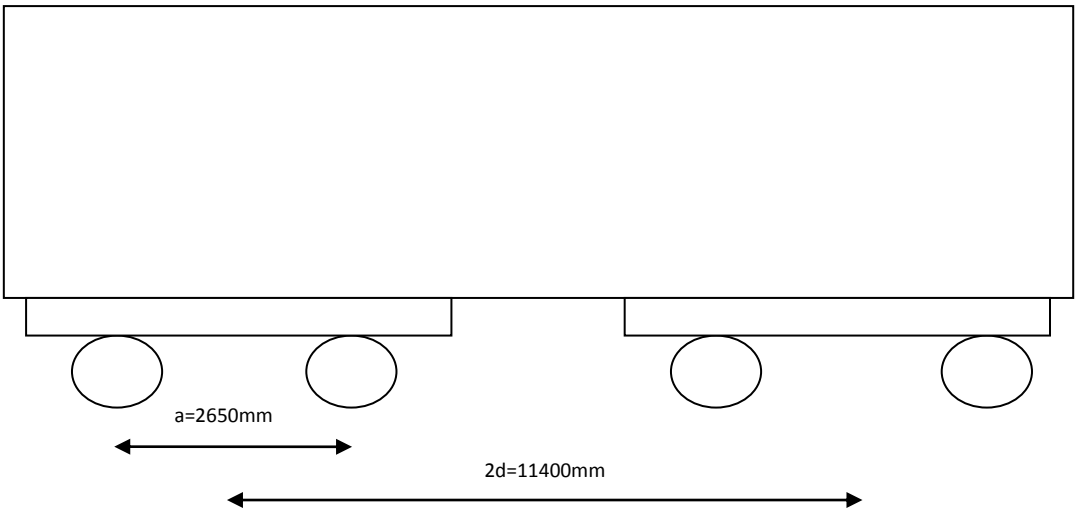
Ψ=0,57°



Σχήμα Π6: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,83^{o}

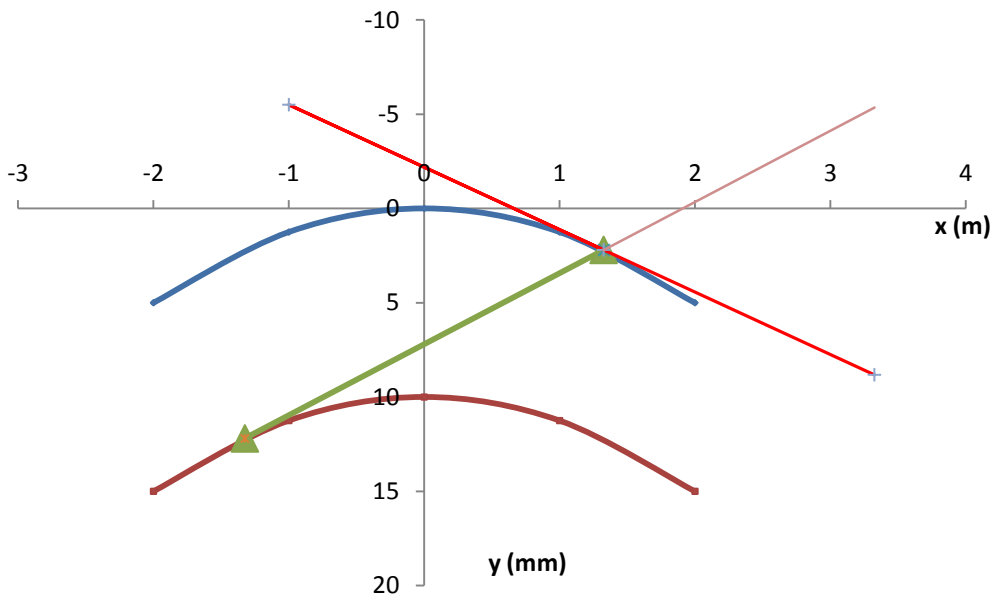
III. Δηζελακτράμαξα DE2000



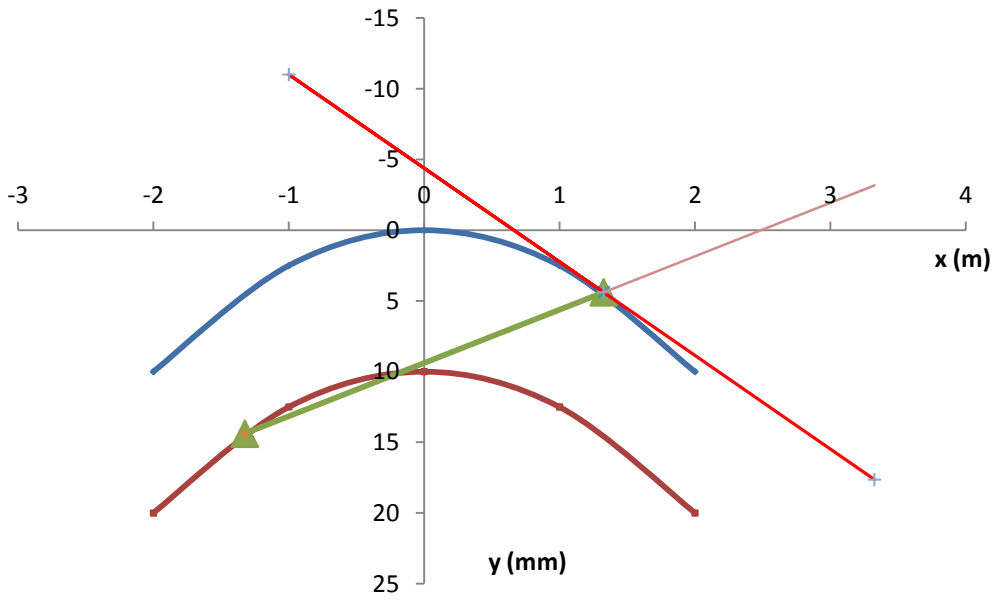
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	2650
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	11400
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
175-100	10

Πίνακας Π3: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

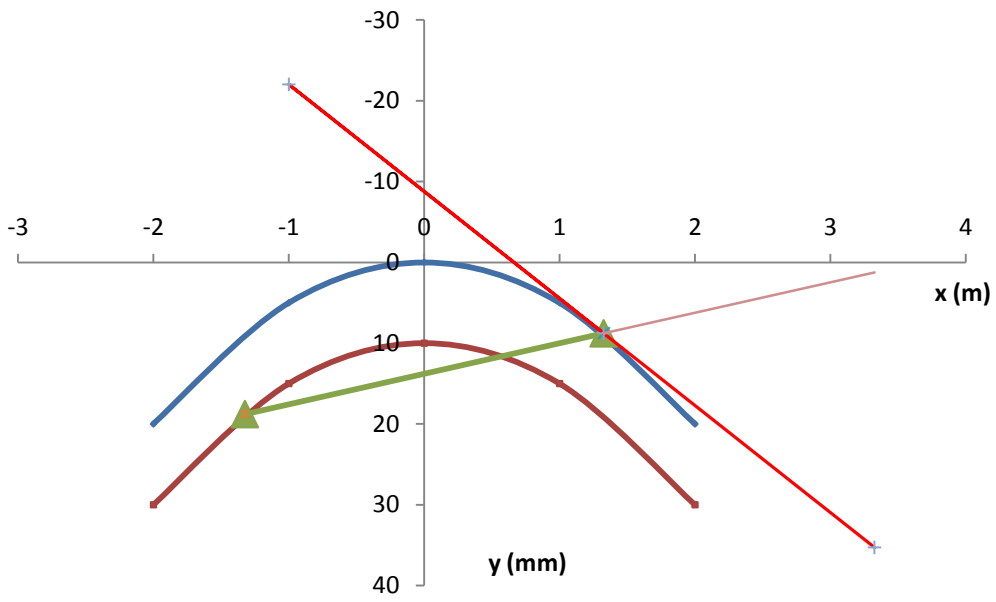


Σχήμα Π7: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π8: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

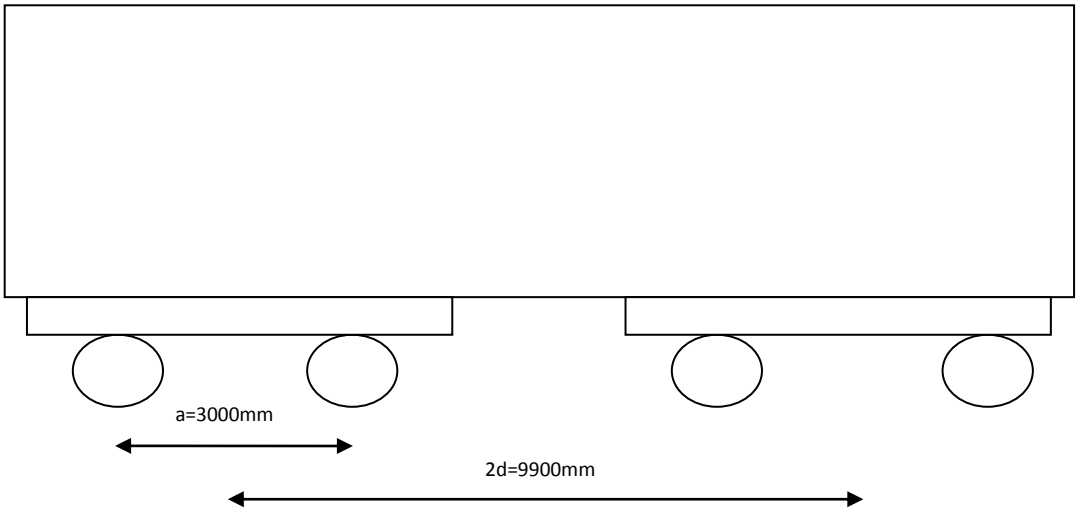
Ψ=0,60°



Σχήμα Π9: Vogelplan για R=1000m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,98°

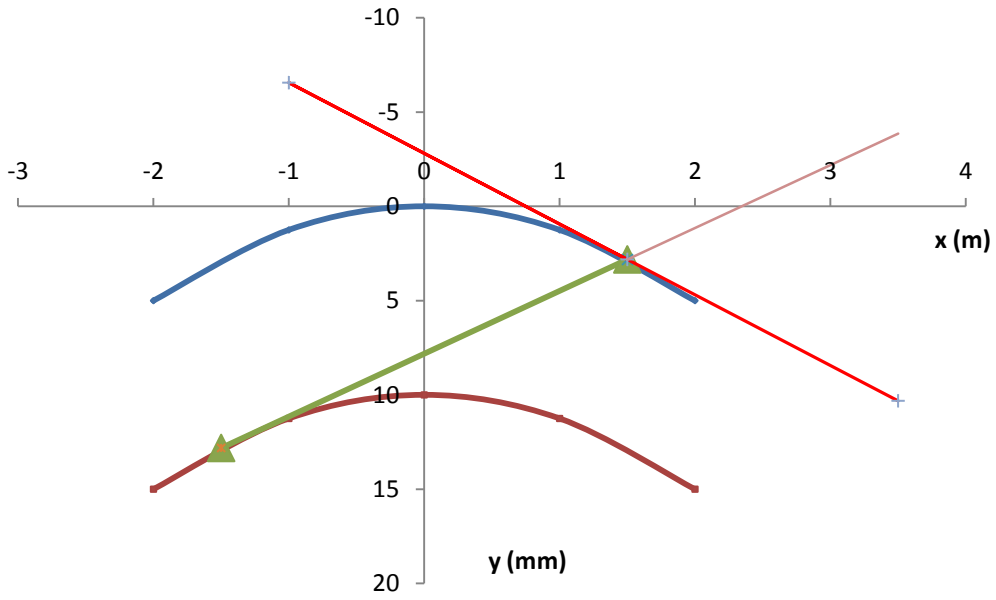
IV. Hellas Sprinter



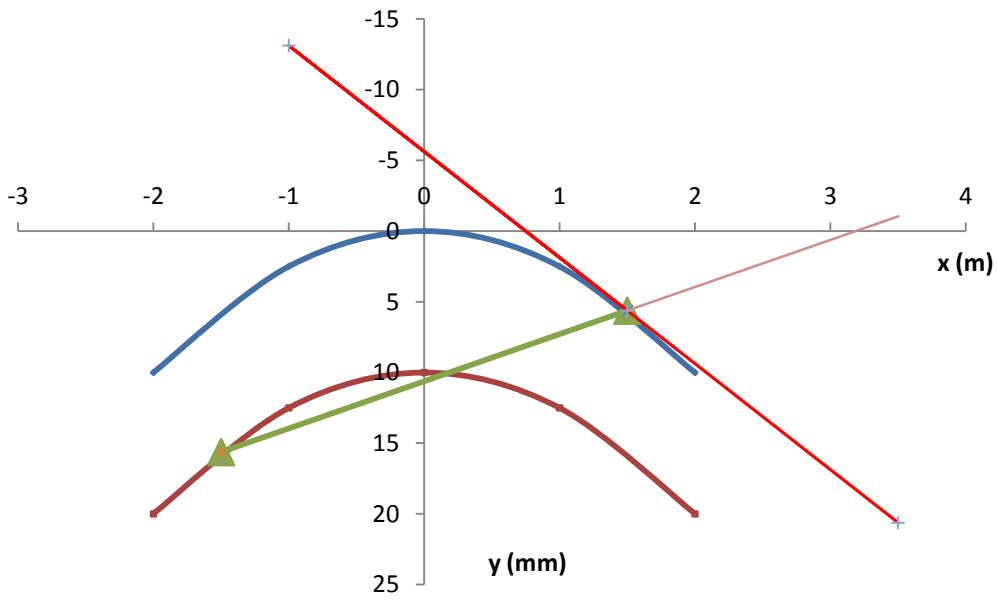
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	3000
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	9900
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	15
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-200	5
200-125	10
125-100	15

Πίνακας Π4: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

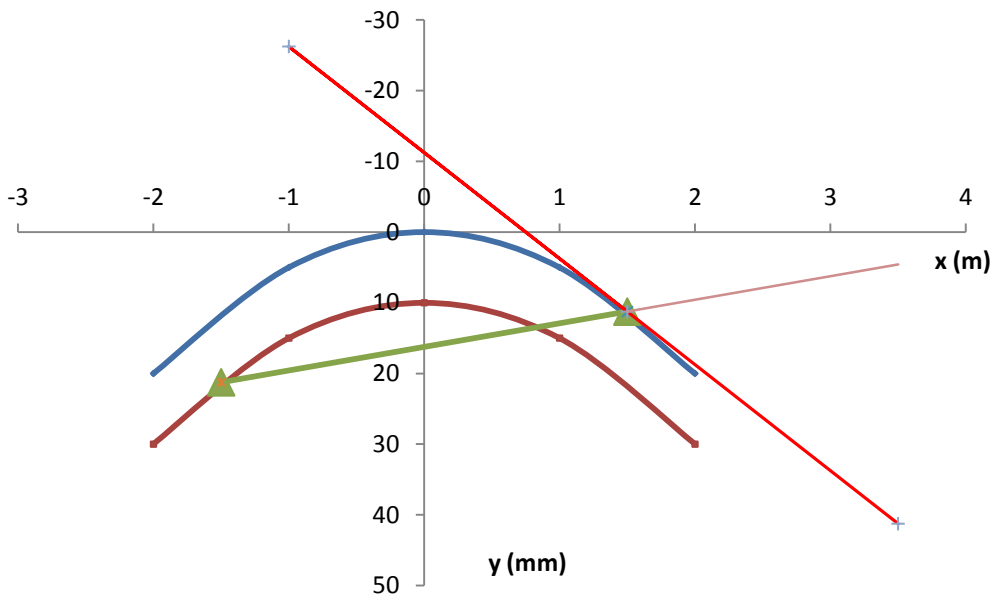


Σχήμα Π10: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π11: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

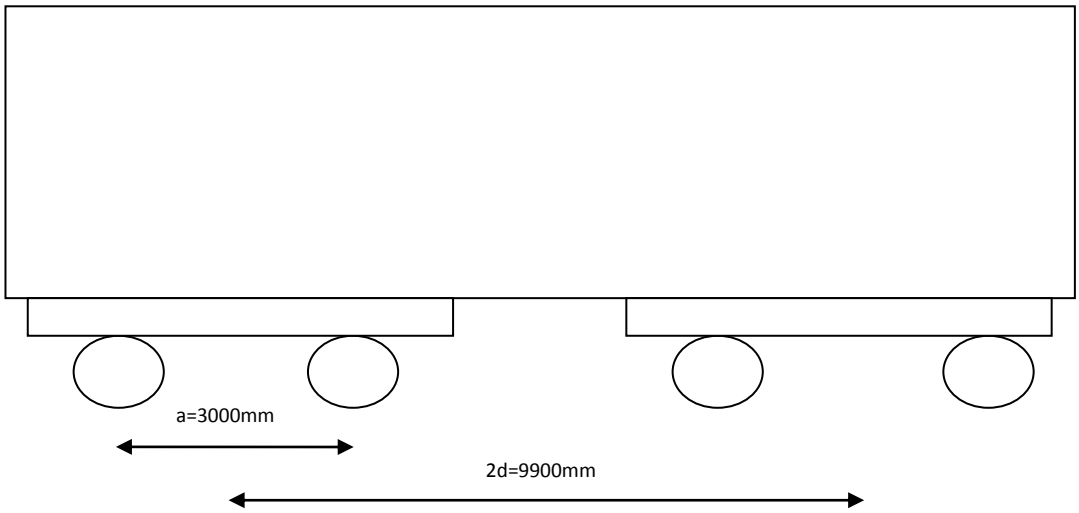
Ψ=0,62°



Σχήμα Π12: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=1,05^{o}

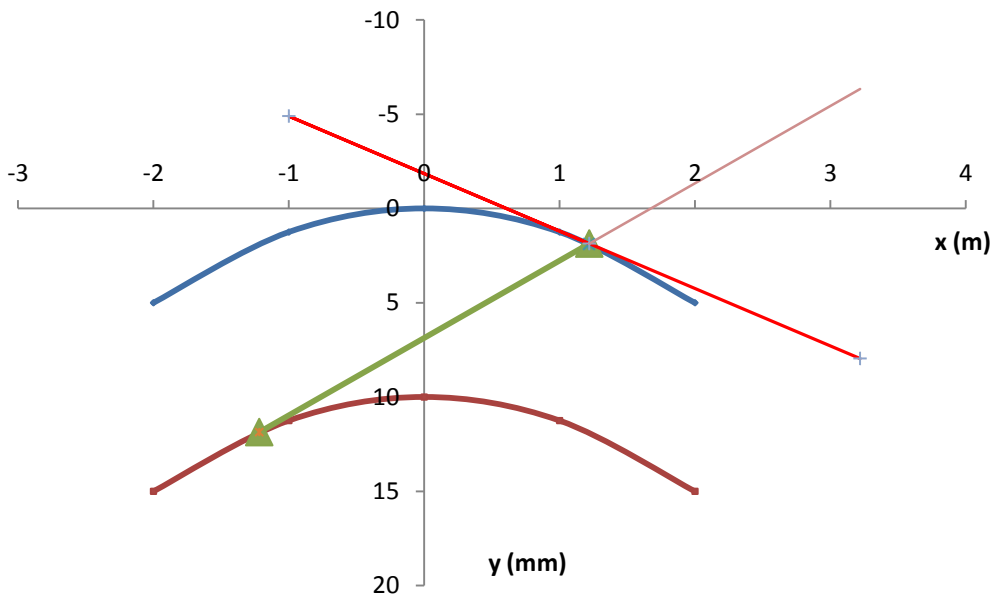
V. **Alco A201-210**



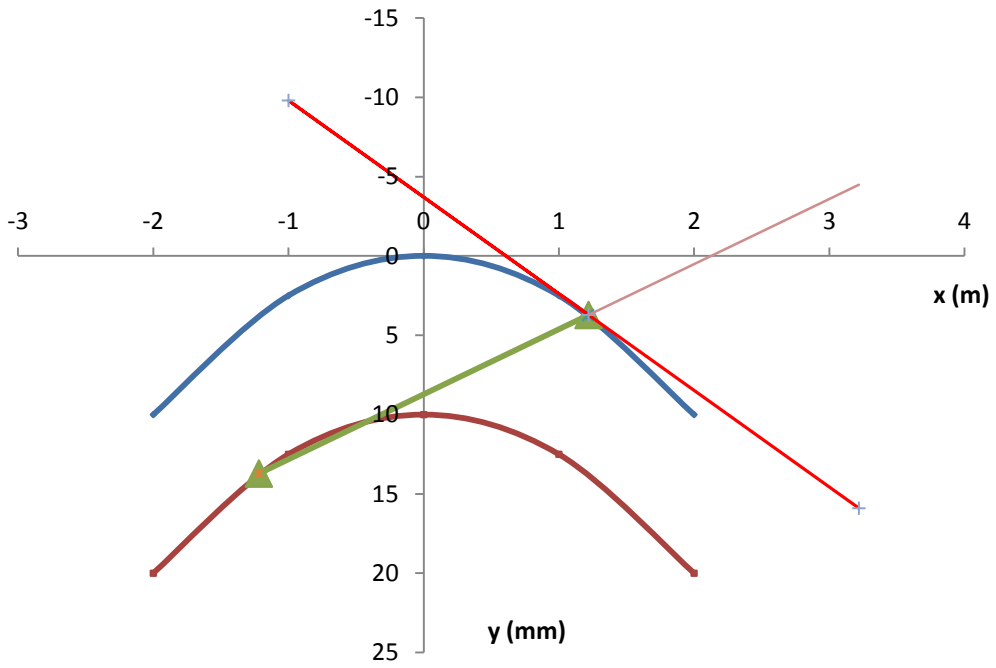
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	2438
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	7010
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
175-100	10

Πίνακας Π5: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

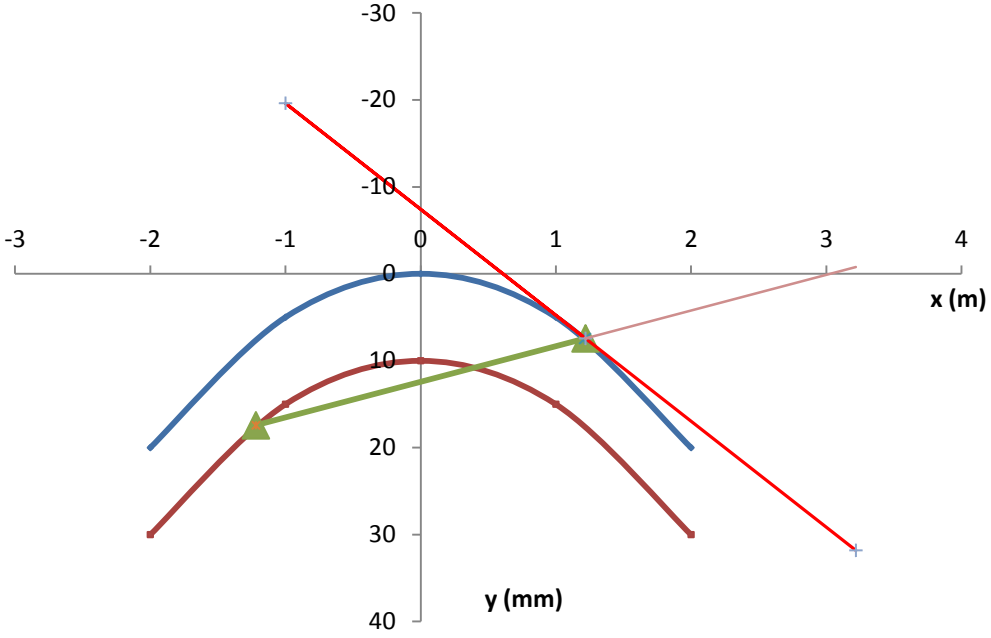


Σχήμα Π13: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π14: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

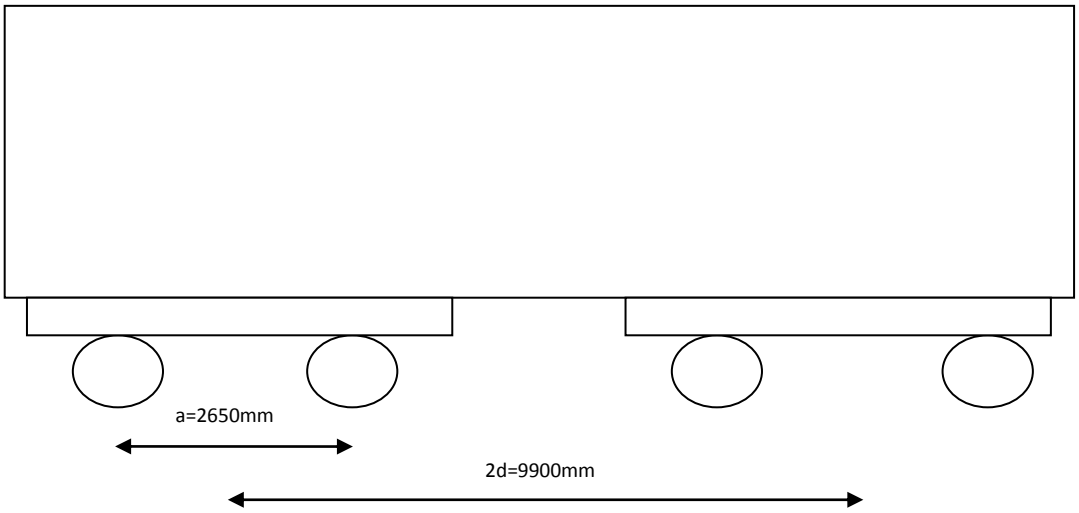
Ψ=0,58^{o}



Σχήμα Π15: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,93°

VI. **Adrtranz**



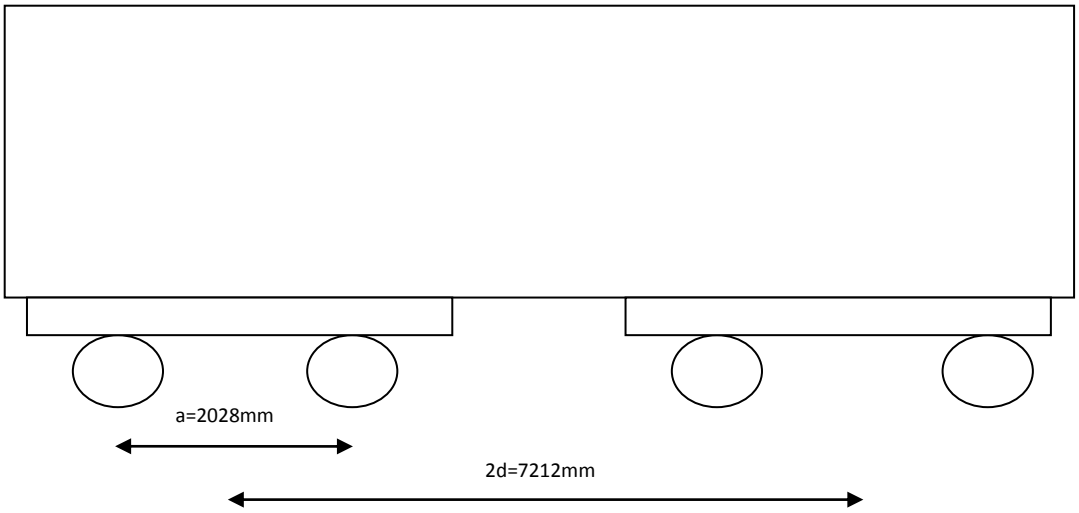
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	2650
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	11400
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
175-100	10

Πίνακας Π6: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

Επειδή το φορείο του οχήματος έχει μεταξόνιο a=2650mm οι λεπτομέρειες του ενός φορείου είναι όμοιες με την περίπτωση (III).

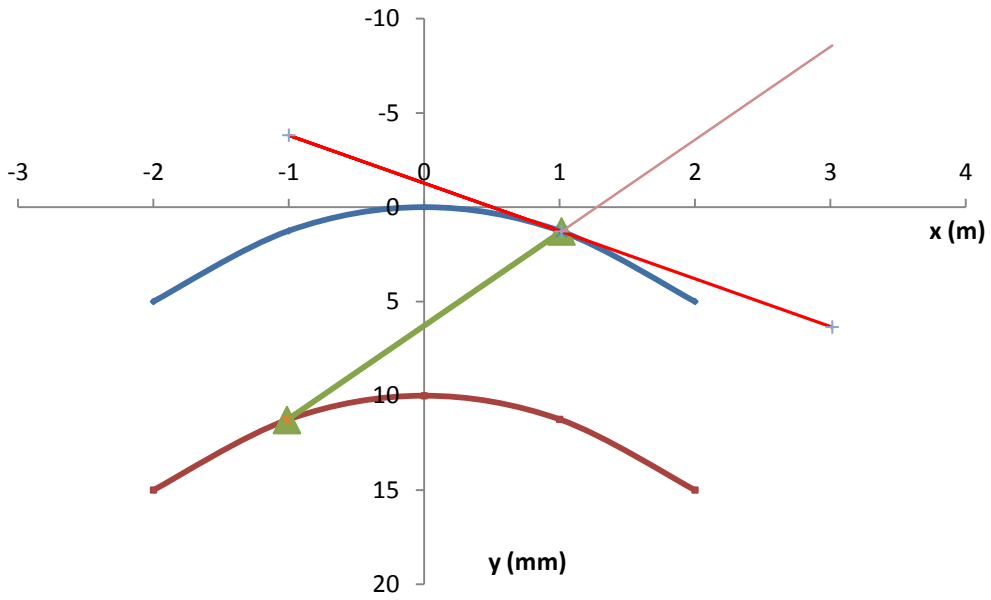
VII. General Electric



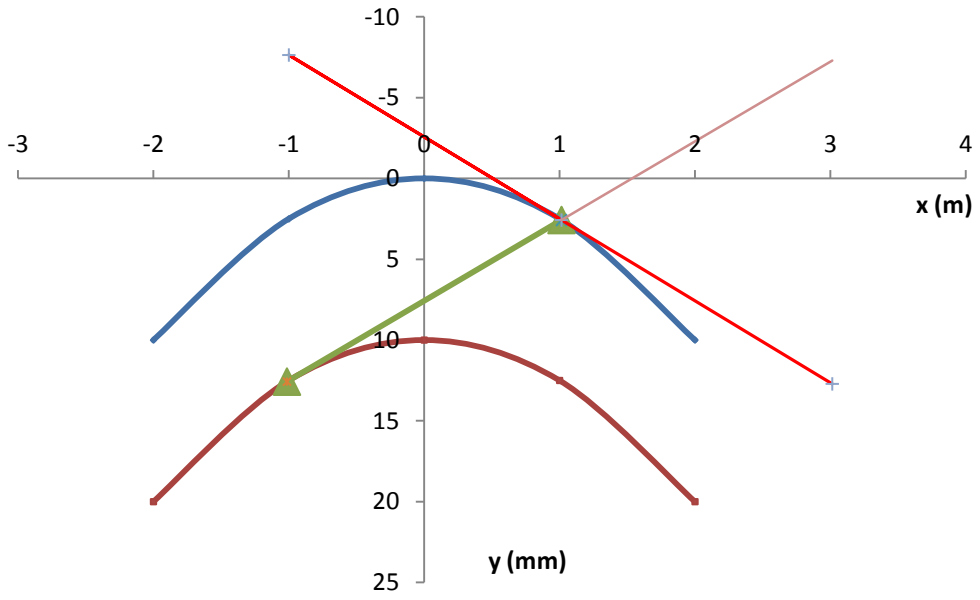
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	2028
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	7212
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-250	0
250-125	5
100	10

Πίνακας Π7: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

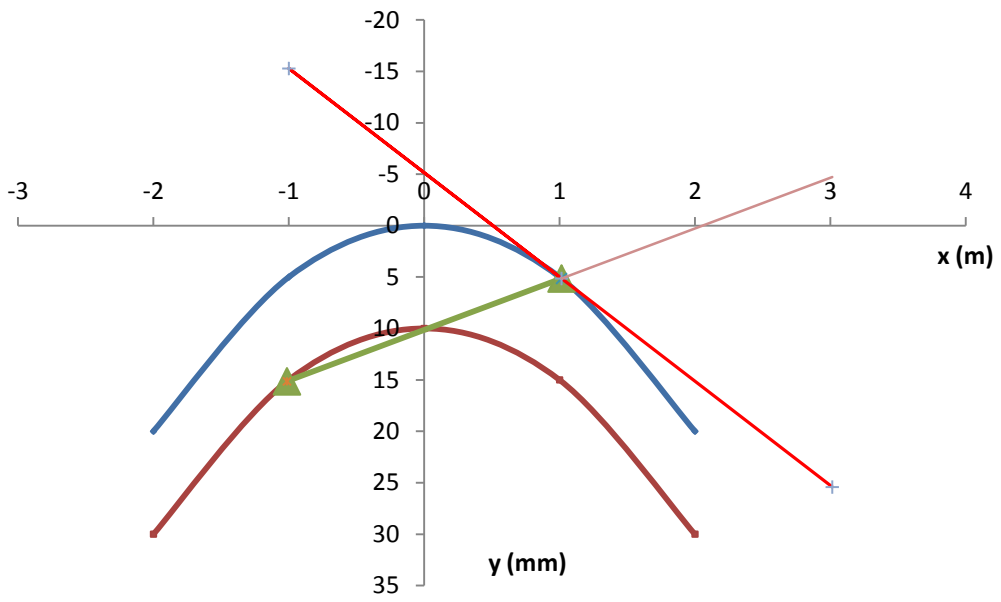


Σχήμα Π16: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π17: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

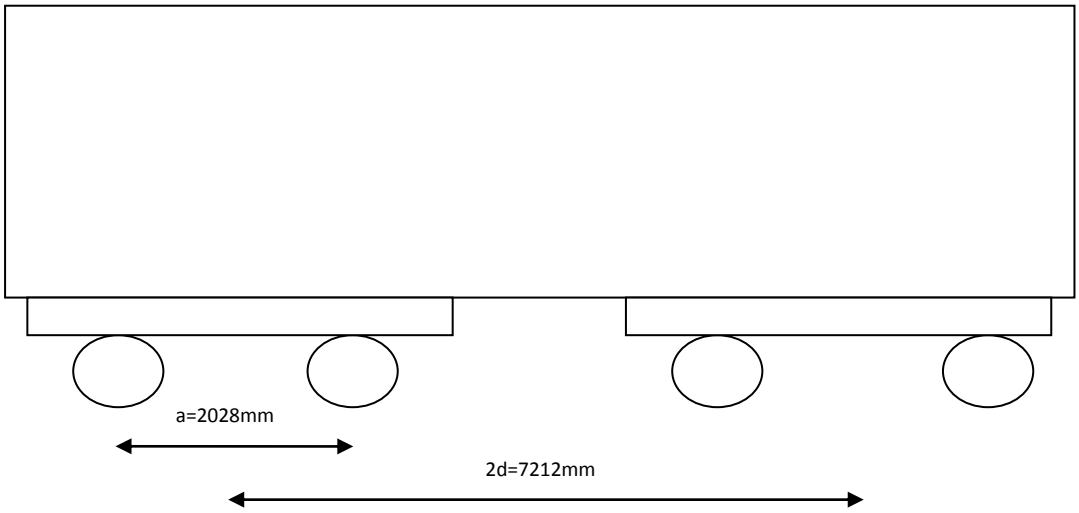
Ψ=0,57°



Σχήμα Π18: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,86^{o}

VIII. **Faur A172-177 και Faur A151-163**



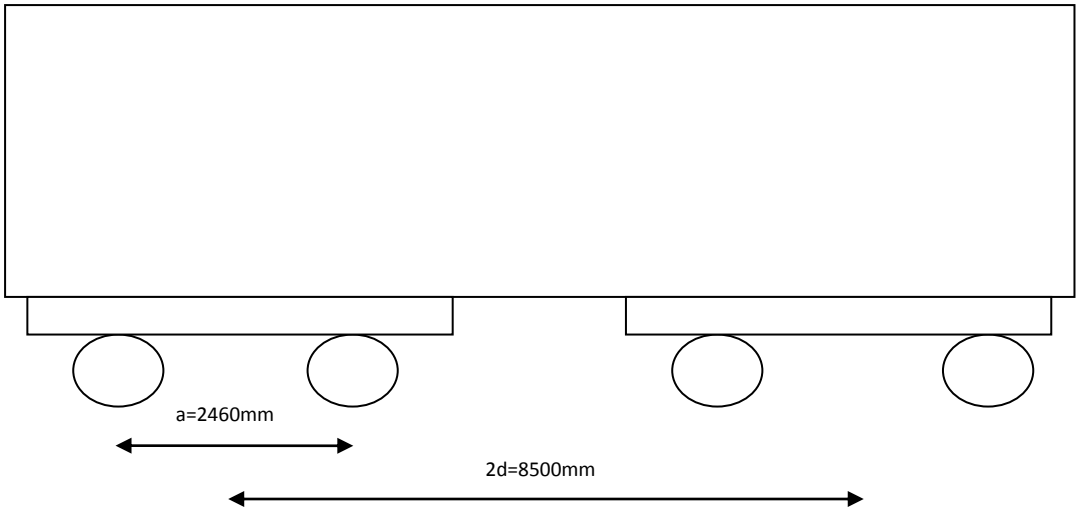
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	2500
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	5640
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
175-100	10

Πίνακας Π8: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

Επειδή το φορείο του οχήματος έχει μεταξόνιο a=2500mm οι λεπτομέρειες του ενός φορείου είναι όμοιες με την περίπτωση (Ι).

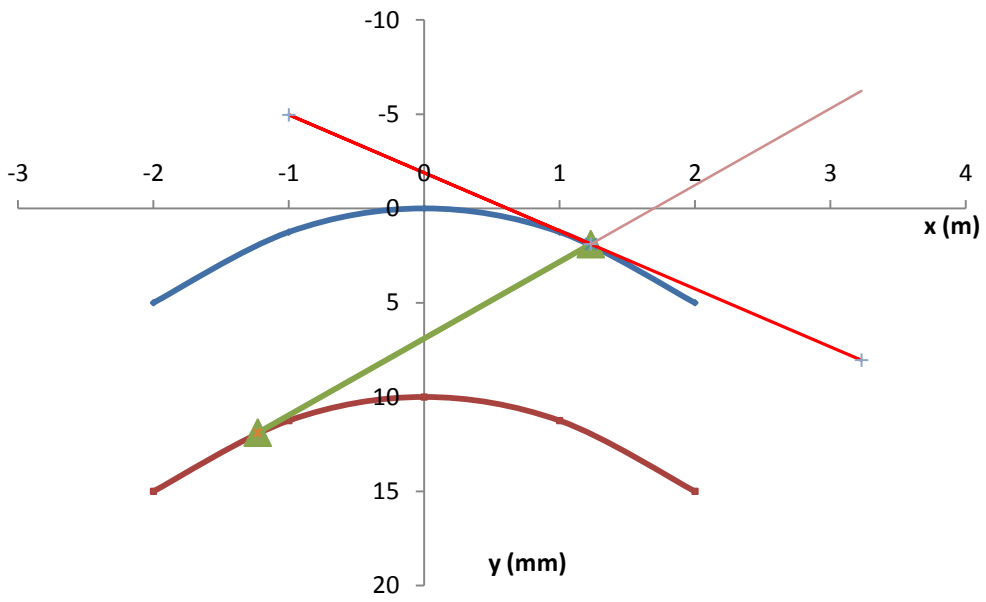
IX. **Eoass-x**



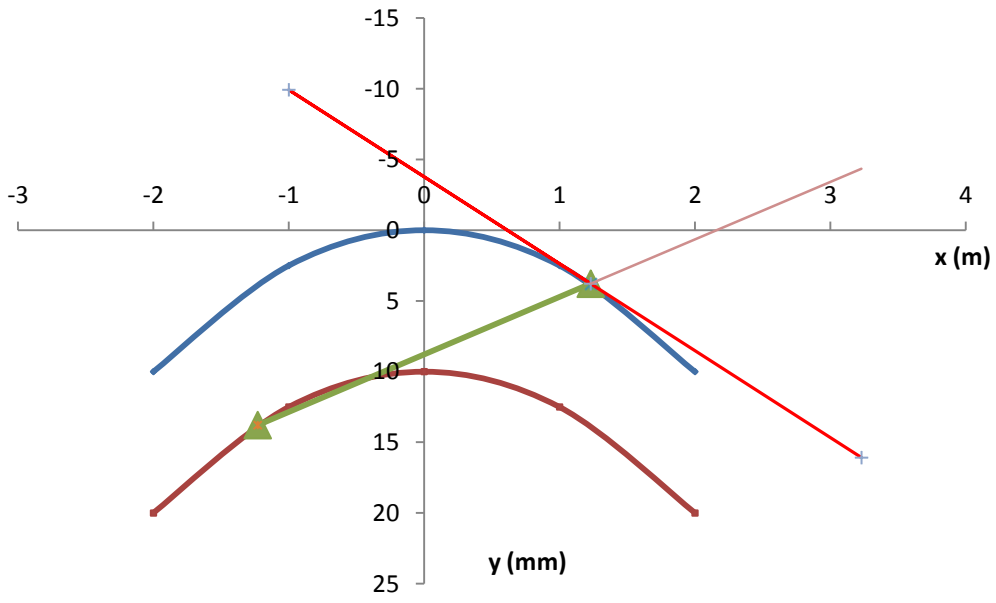
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	2460
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	8500
Είδος οχήματος	Εμπορευματικό Βαγόνι

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
175-100	10

Πίνακας Π9: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

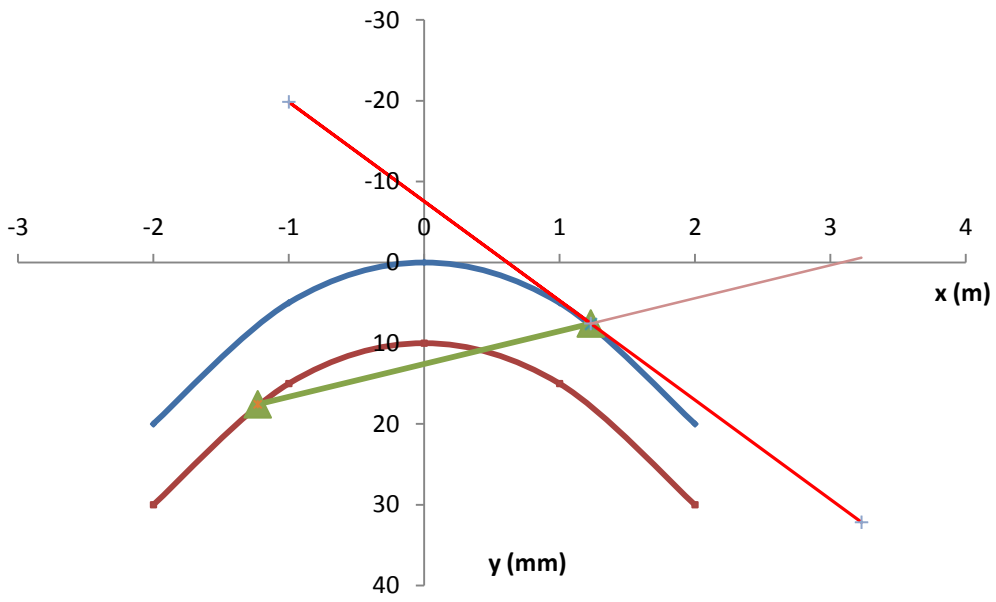


Σχήμα Π19: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π20: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

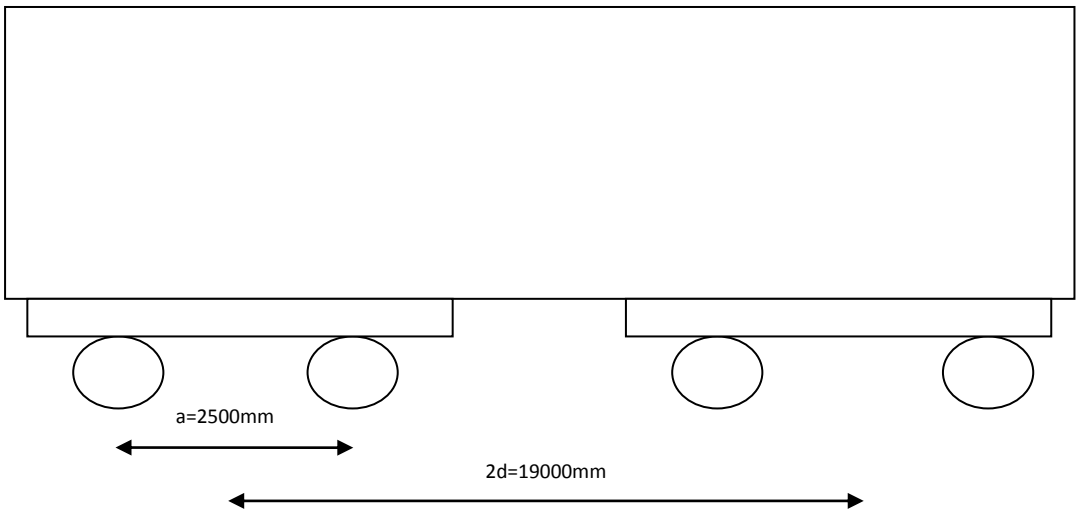
Ψ=0,58^{o}



Σχήμα Π21: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,94^{o}

X. Admz



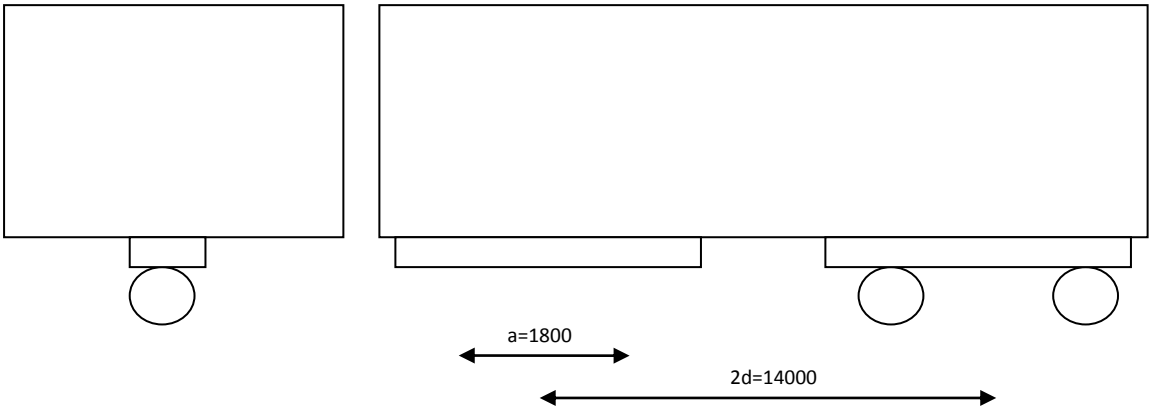
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	2500
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	19000
Είδος οχήματος	Επιβατικό Βαγόνι

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
175-100	10

Πίνακας Π10: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

Επειδή το φορείο του οχήματος έχει μεταξόνιο a=1800mm οι λεπτομέρειες του ενός φορείου είναι όμοιες με την περίπτωση (ΙΙ).

XI. Μηχάνημα υπογόμωσης αλλαγών τροχιάς (Μπουρέζα αλλαγών) και Μηχάνημα υπογόμωσης στρωτήρων και γεωμετρικής τακτοποίησης γραμμής (Μπουρέζα ανοιχτής γραμμής)



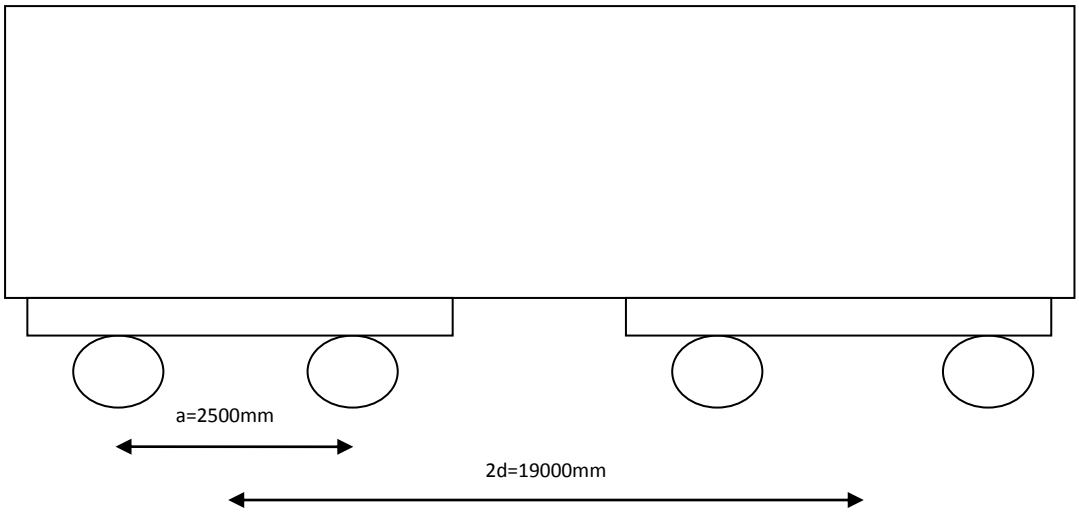
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	1800
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	14000
Είδος οχήματος	Μηχάνημα Συντήρησης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-175	0
175-125	5
125-100	10

Πίνακας Π11: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

Επειδή το φορείο του οχήματος έχει μεταξόνιο a=1800mm οι λεπτομέρειες του ενός φορείου είναι όμοιες με την περίπτωση (ΙΙ).

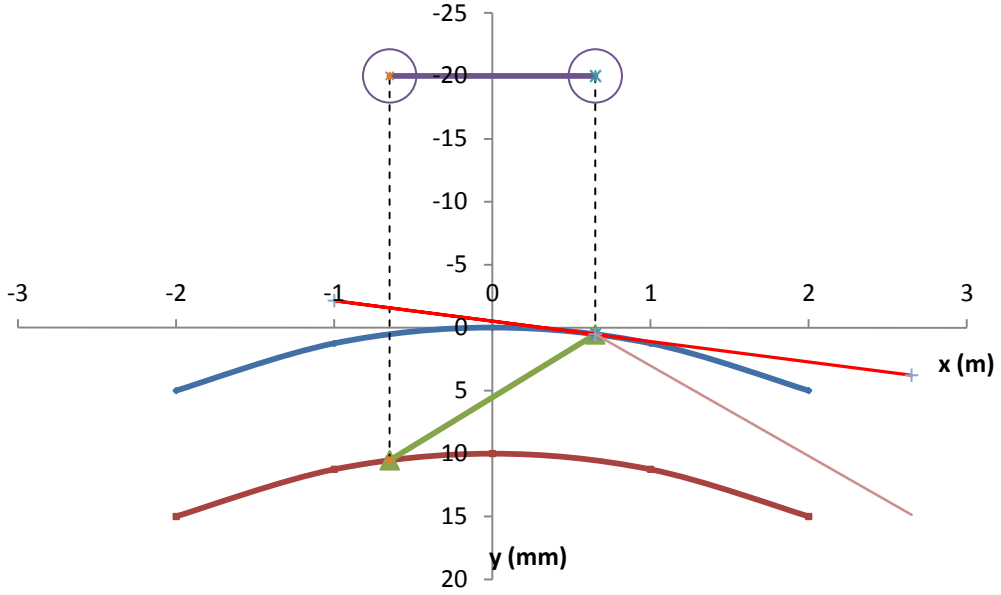
XII. Μηχάνημα σταθεροποίησης έρματος (Σταμπιλιζάτορας)



Αριθμός φορείων στο όχημα	1
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο (mm)	1300
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	-
Είδος οχήματος	Μηχάνημα Συντήρησης

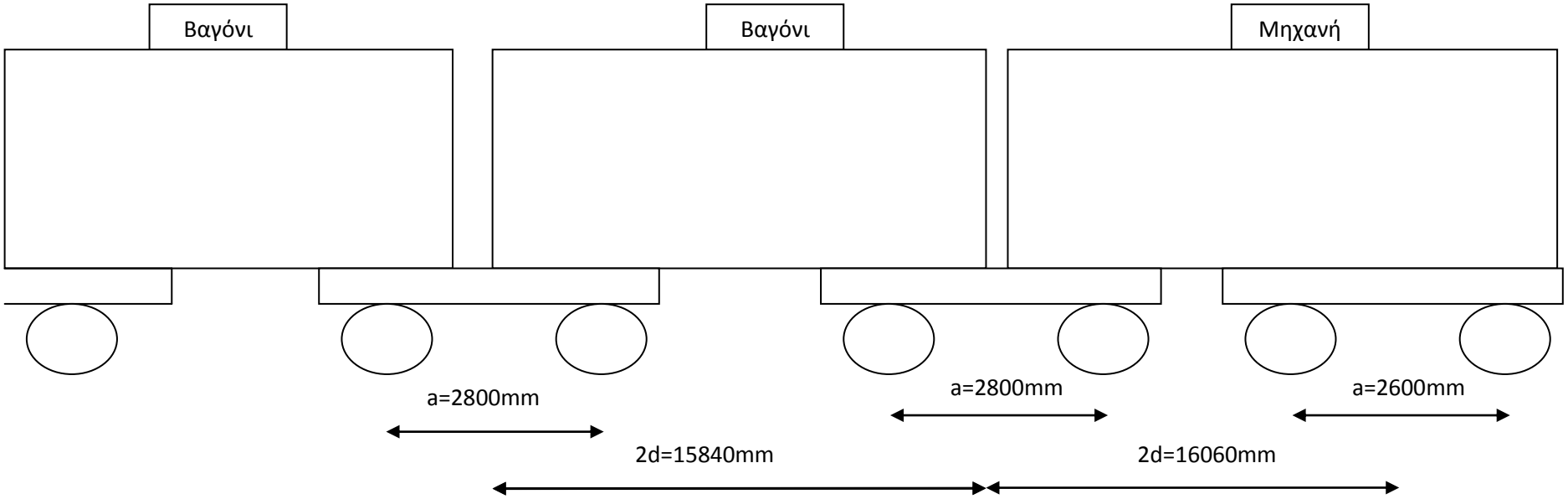
Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	0
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-100	0

Πίνακας Π12: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος



Σχήμα Π22: Vogelplan για R=400m

XIII. Ηλεκτροκίνητη αυτοκινητάμαξα Desiro



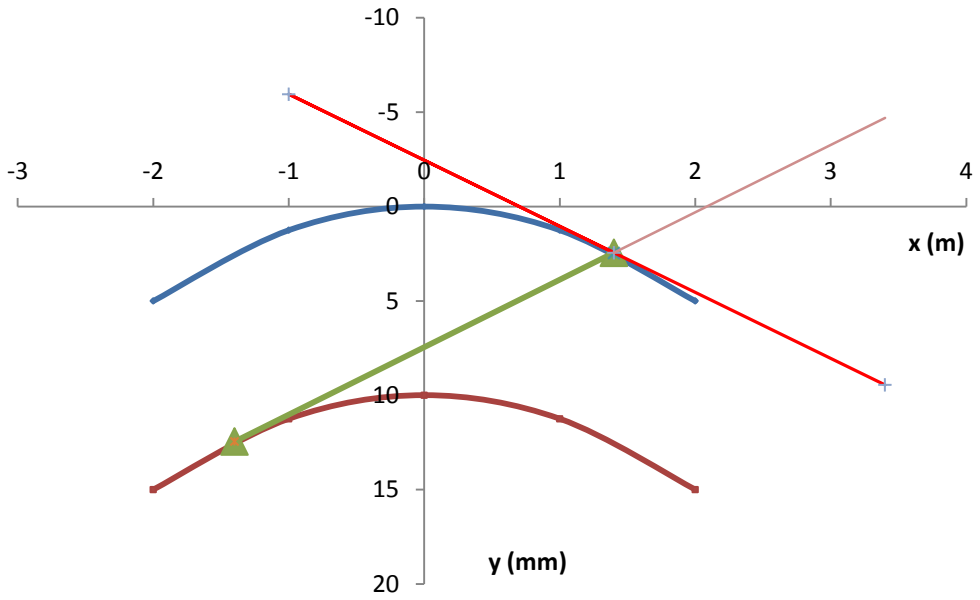
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Jacob
Μεταξόνιο (mm)	2600
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	16060
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	15
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
200-175	10
175-100	15

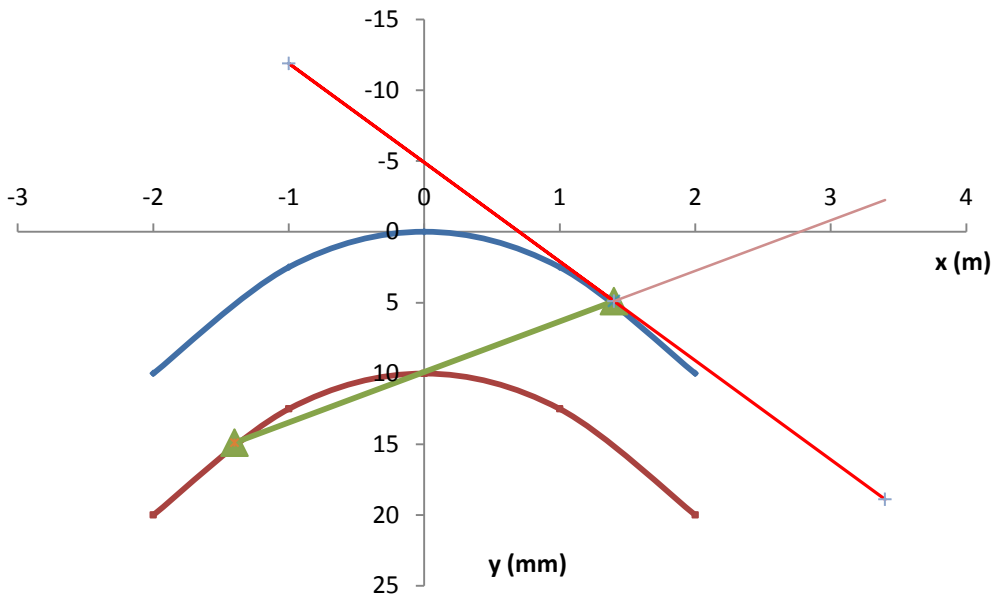
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Jacob
Μεταξόνιο (mm)	2800
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	15840
Είδος οχήματος	Επιβατικό Βαγόνι

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	15
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400	0
350-175	5
175-125	10
100	15

Πίνακας Π13: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

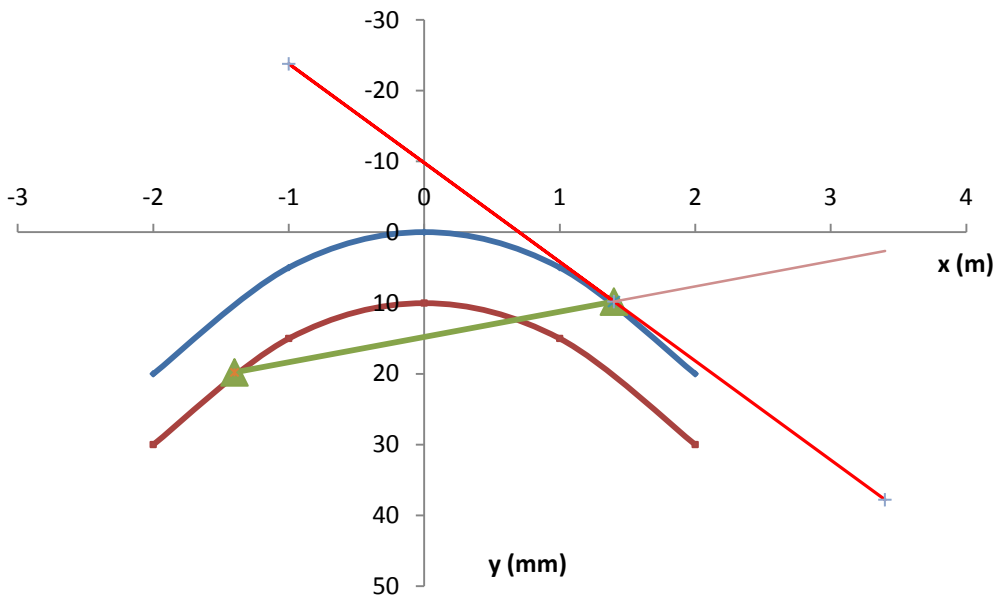


Σχήμα Π23: Vogelplan για R=400m, Επιβατικό βαγόνι (λεπτομέρεια ενός φορείου)



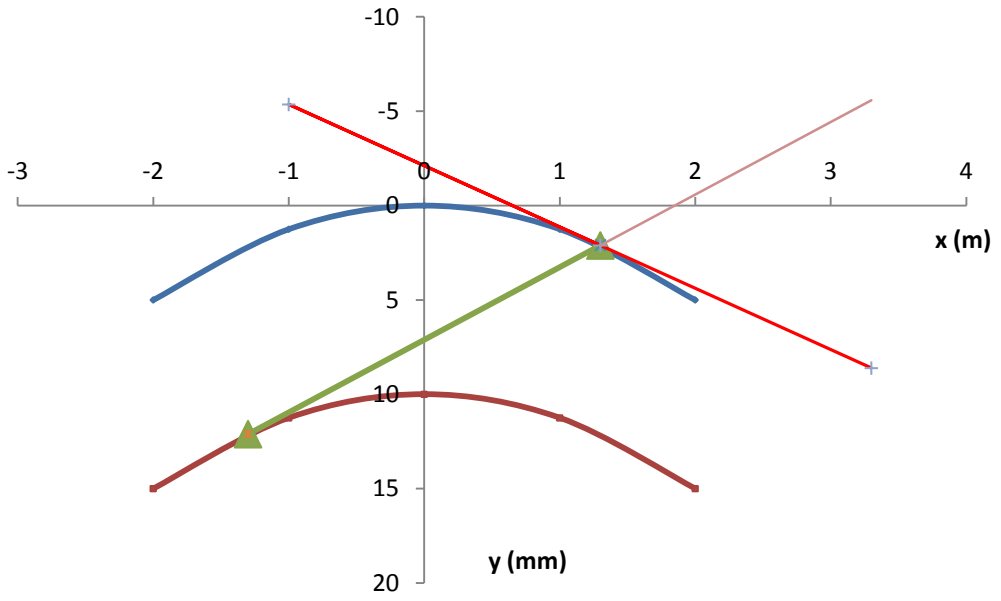
Σχήμα Π24: Vogelplan για R=200m, Επιβατικό βαγόνι (λεπτομέρεια ενός φορείου)

$\Psi=0,61^{o}$

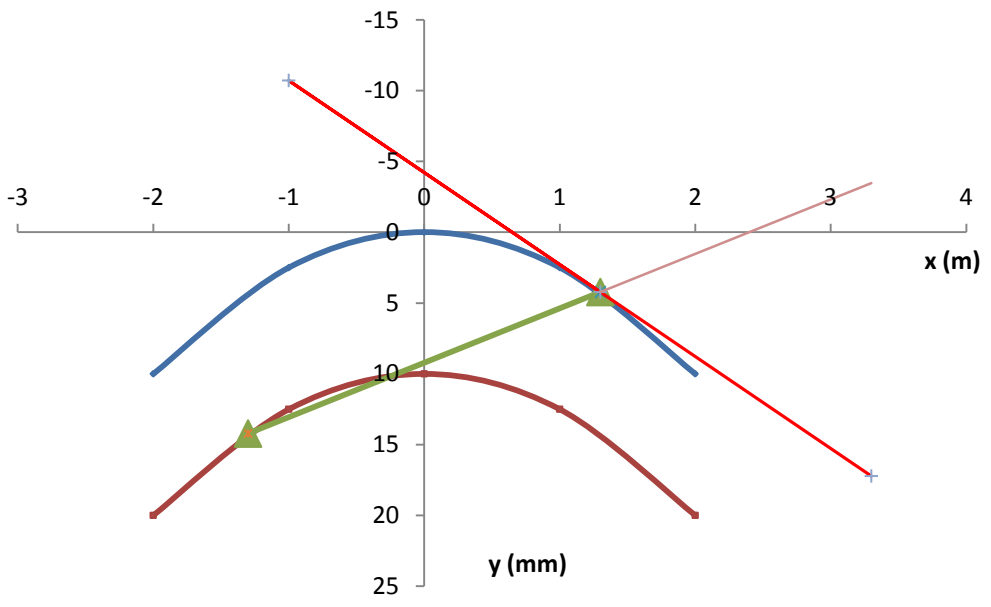


Σχήμα Π25: Vogelplan για R=100m, Επιβατικό βαγόνι (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=1,00^{o}

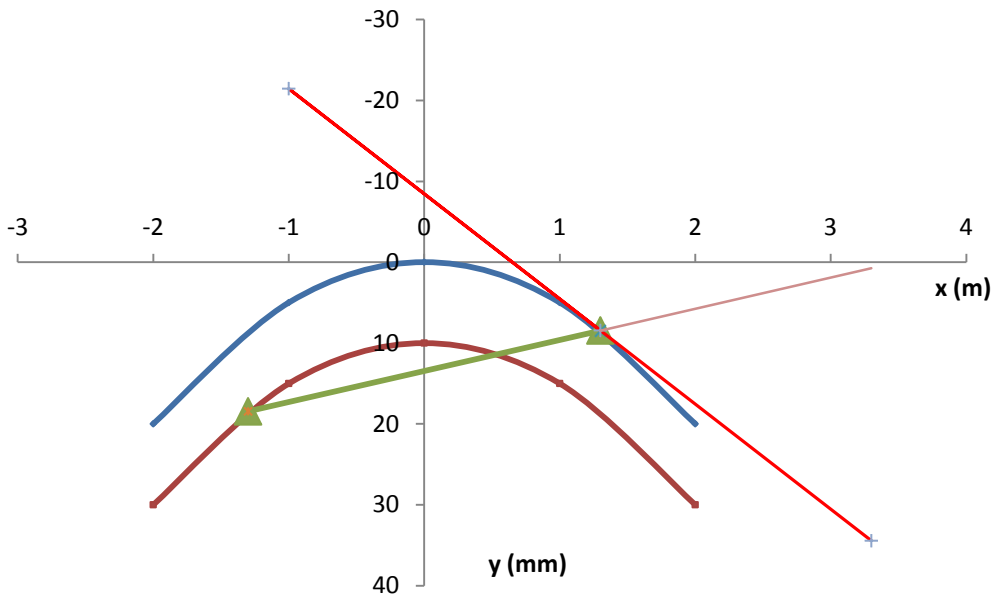


Σχήμα Π26: Vogelplan για R=400m, Μηχανή Έλξης (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π27: Vogelplan για R=200m, Μηχανή Έλξης (λεπτομέρεια ενός φορείου)

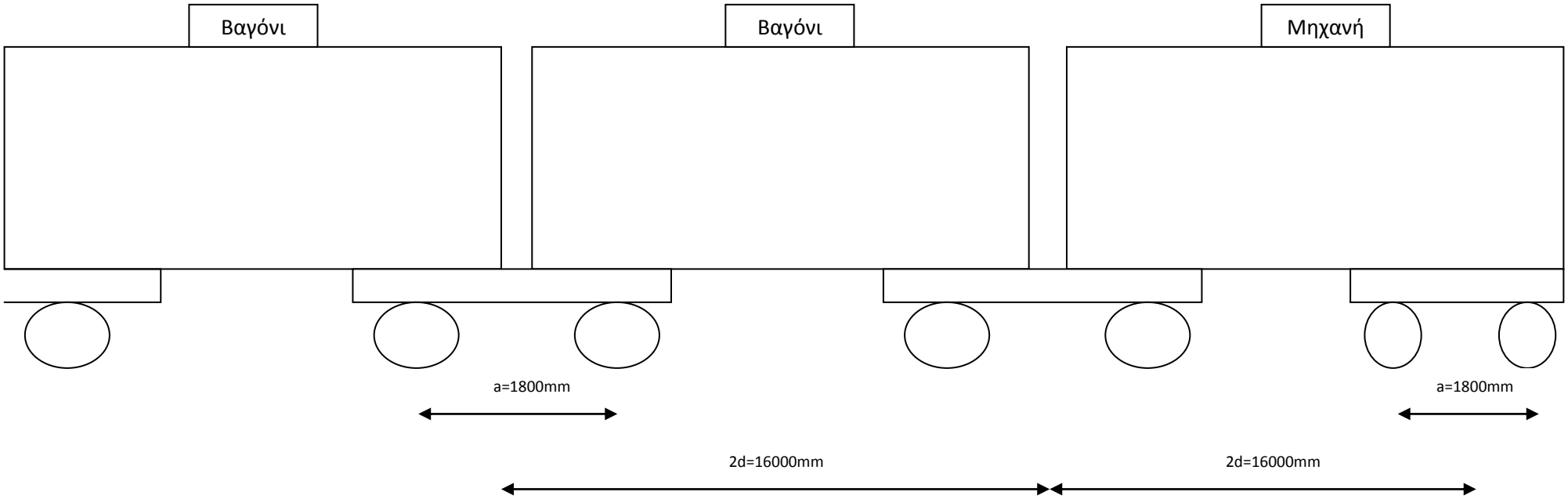
Ψ=0,59^{o}



Σχήμα Π28: Vogelplan για R=100m, Μηχανή Έλξης (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,97^{o}

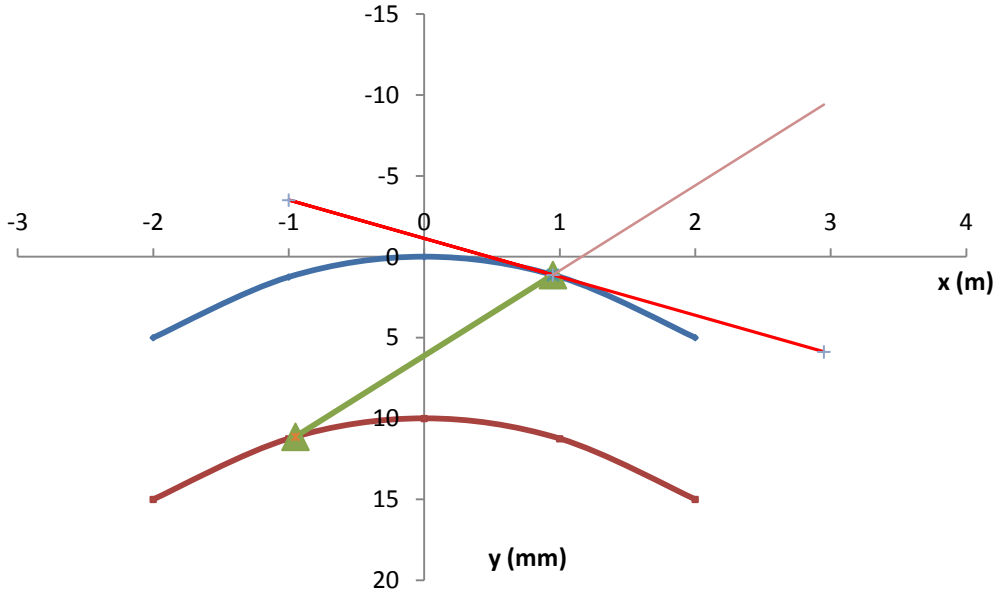
XIV. Δηζελοκίνητη αυτοκινητάμαξα Class VT642



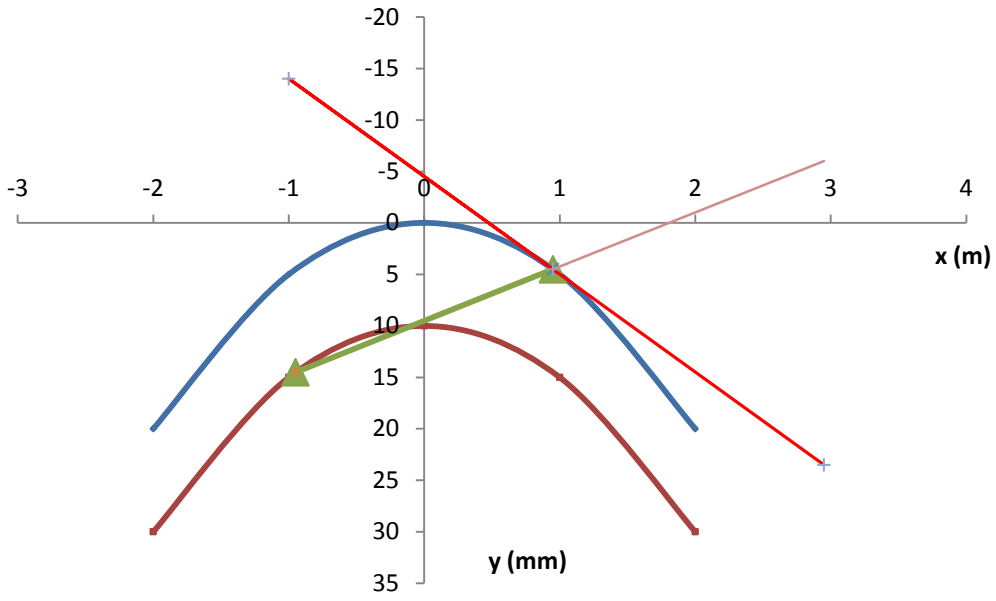
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Jacob
Μεταξόνιο 1ου (mm)	1900
Μεταξόνιο 2ου (mm)	2650
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	16000
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
175-100	10

Πίνακας Π14: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος



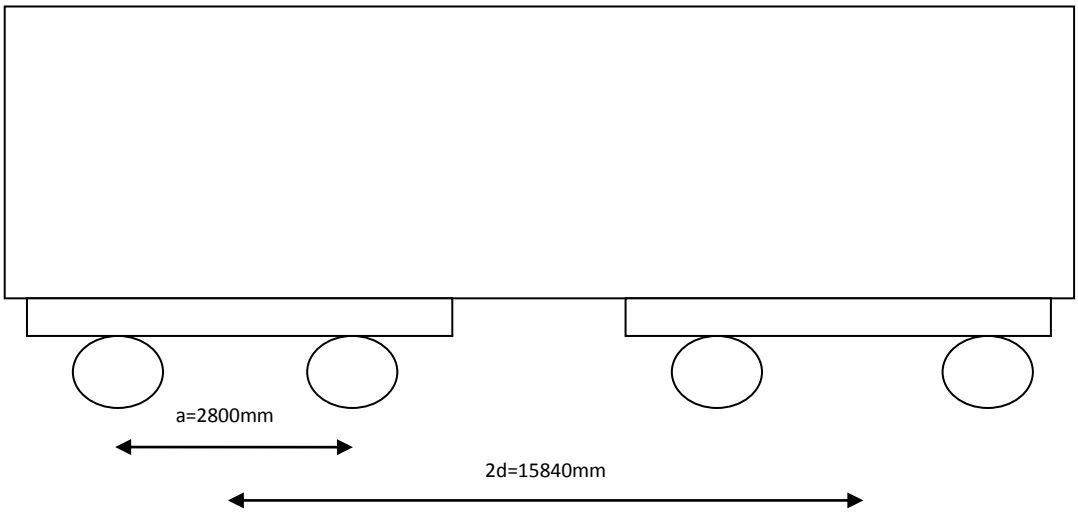
Σχήμα Π29: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου a=1900mm)



Σχήμα Π30: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου a=1900mm)

Ψ=0,85°

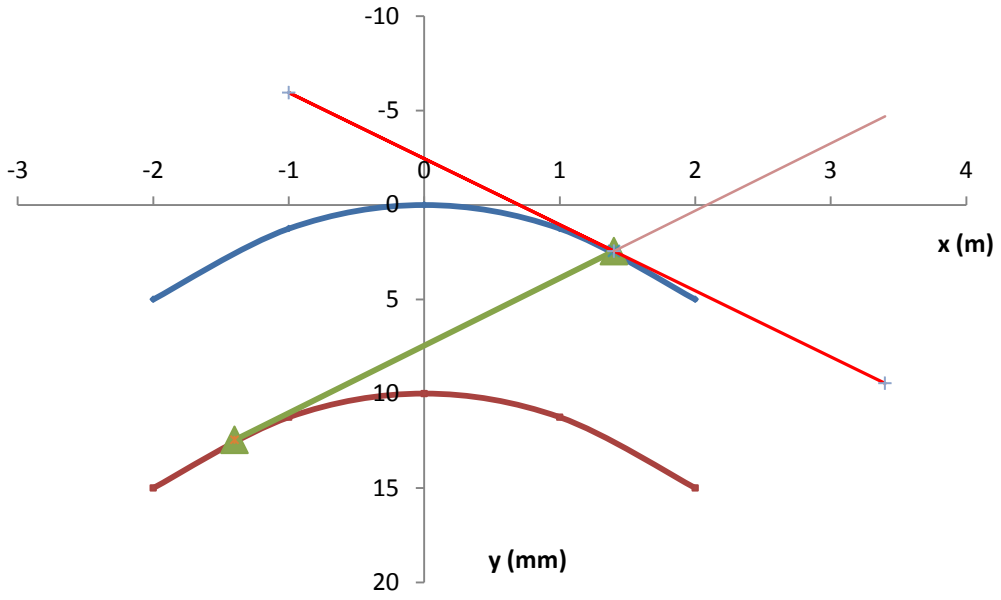
XV. Intercity Πεντάδυμοι (Βαγόνια)



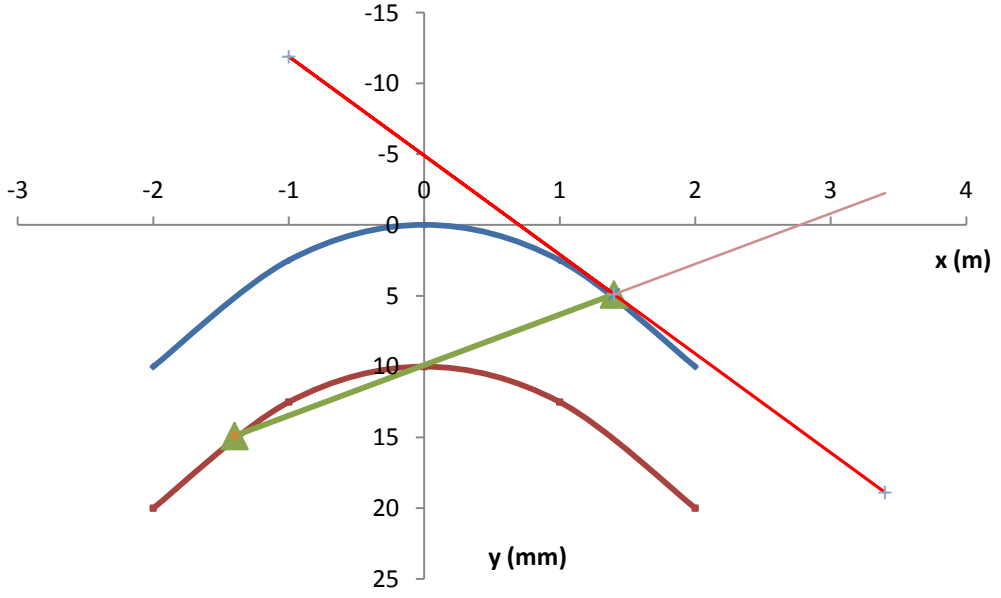
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Jacob
Μεταξόνιο (mm)	2800
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	15840
Είδος οχήματος	Επιβατικό Βαγόνι

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	15
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400	0
400-175	5
175-125	10
100	15

Πίνακας Π15: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

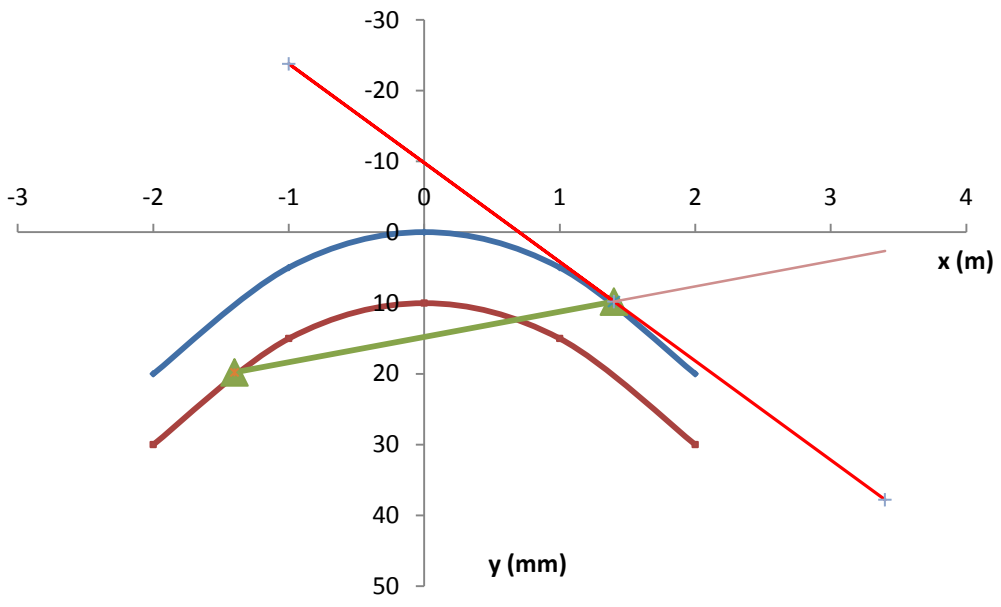


Σχήμα Π31: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π32: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

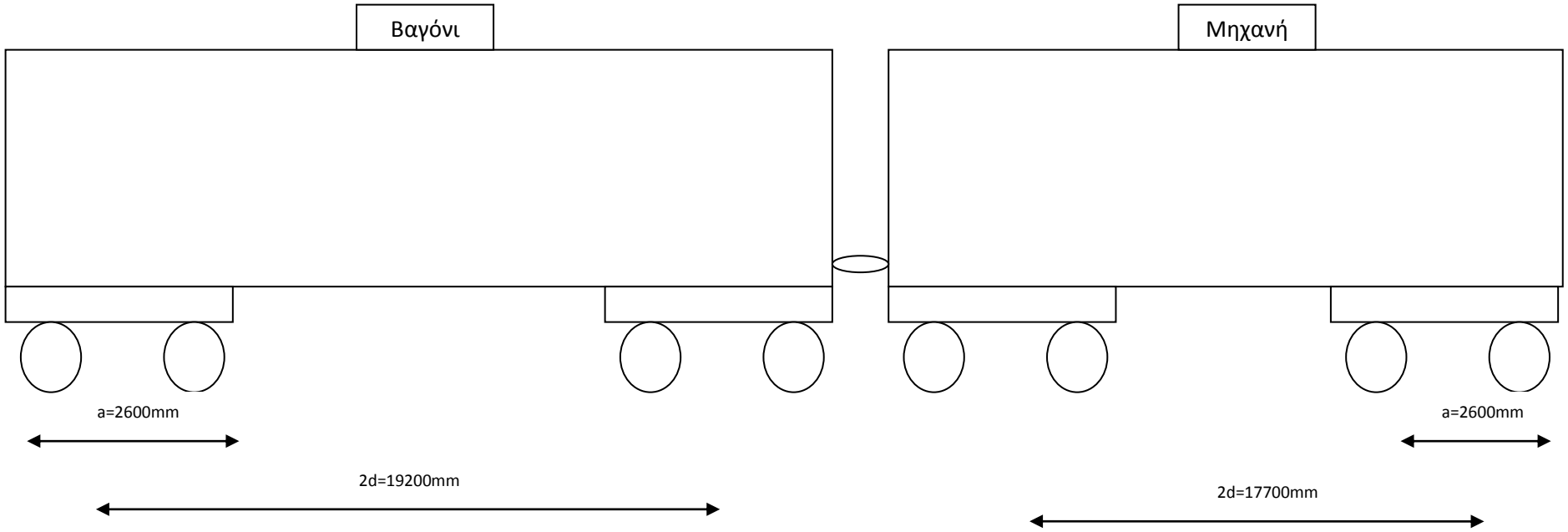
Ψ=0,59^{o}



Σχήμα Π33: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,97^{o}

XVI. Intercity Τετράδυμοι



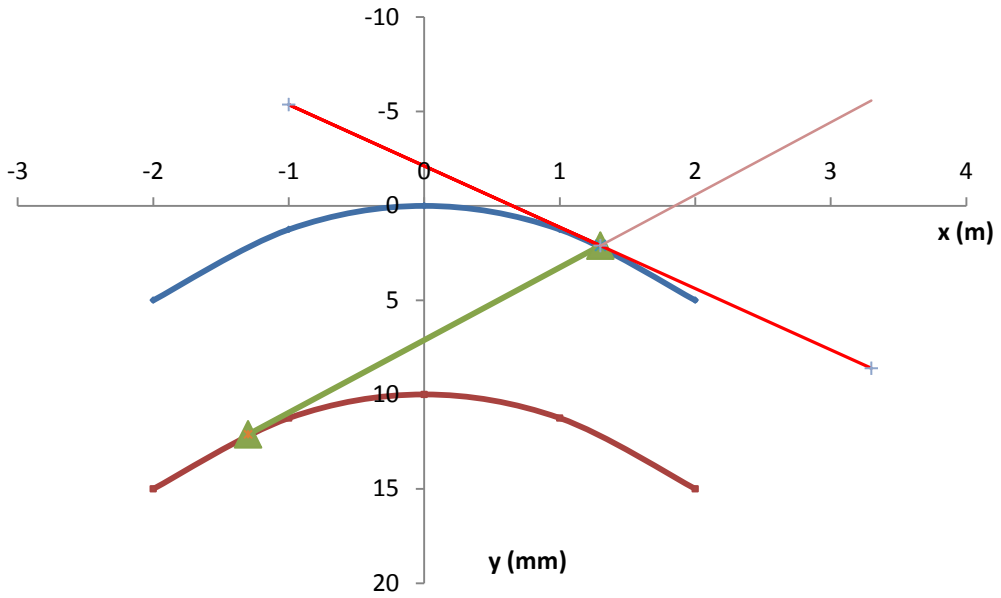
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Jacob
Μεταξόνιο (mm)	2600
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	17700
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	15
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
200-175	10
175-100	15

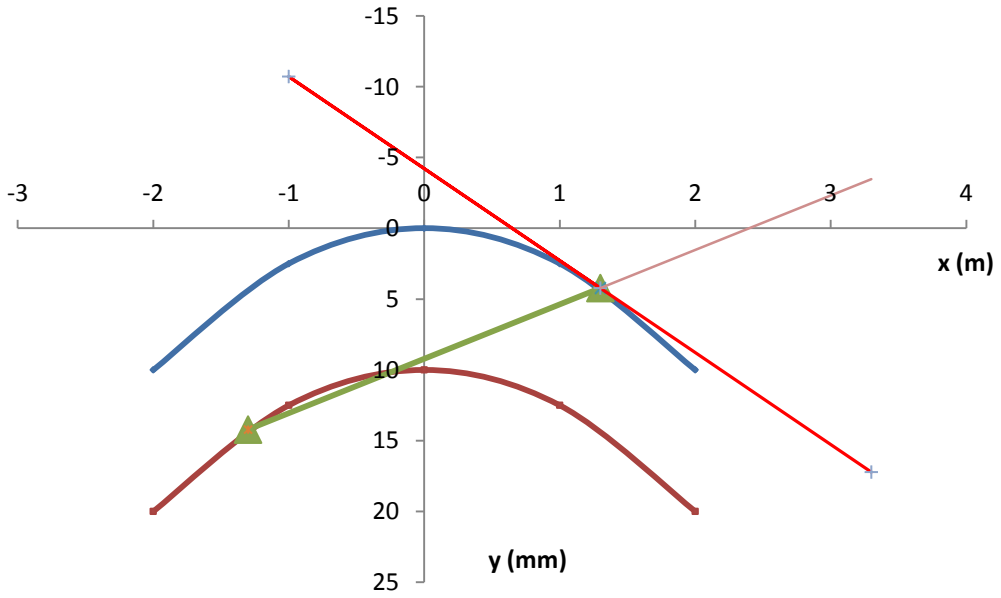
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Jacob
Μεταξόνιο (mm)	2600
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	19200
Είδος οχήματος	Επιβατικό Βαγόνι

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	15
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-350	0
350-175	5
200-175	10
175-100	15

Πίνακας Π16: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

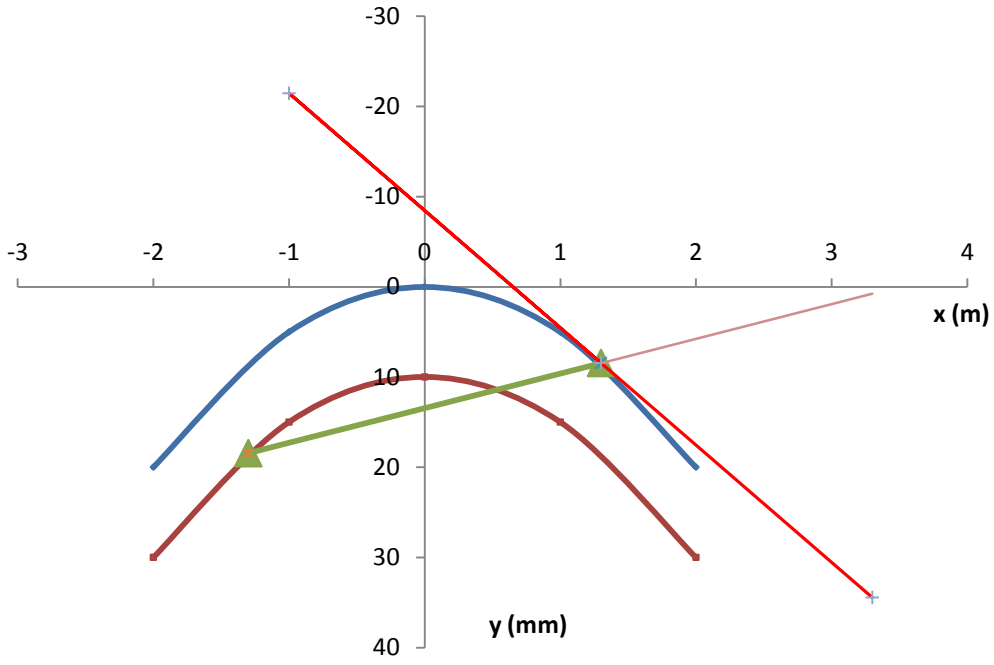


Σχήμα Π34: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π35: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

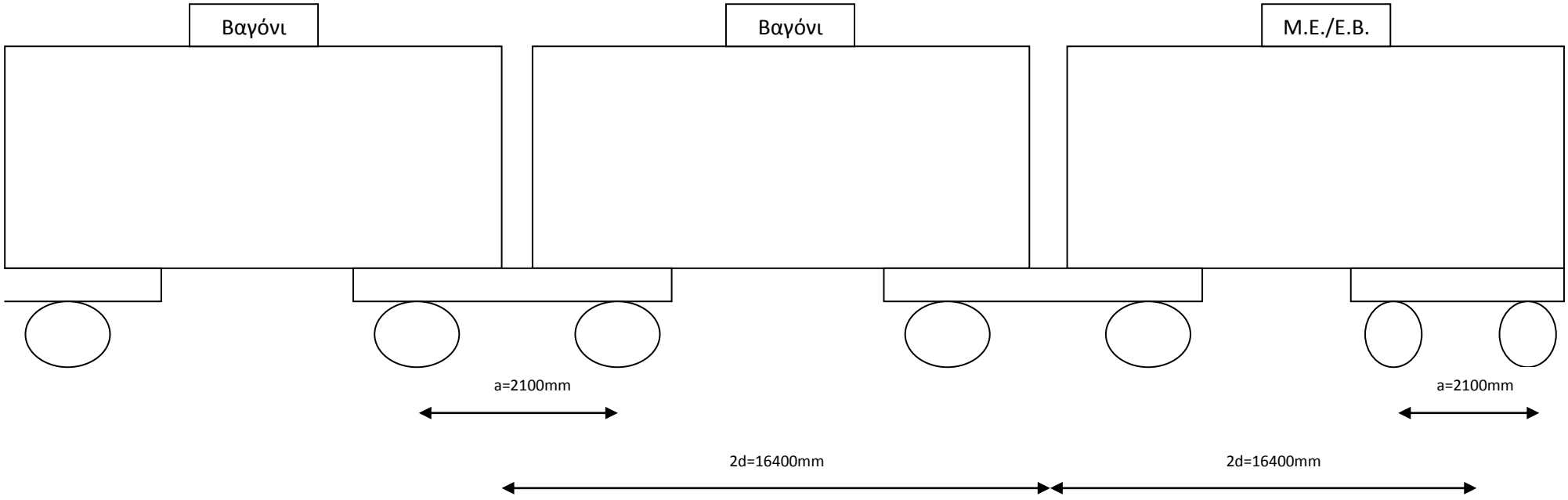
Ψ=0,59^{o}



Σχήμα Π36: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,97^{o}

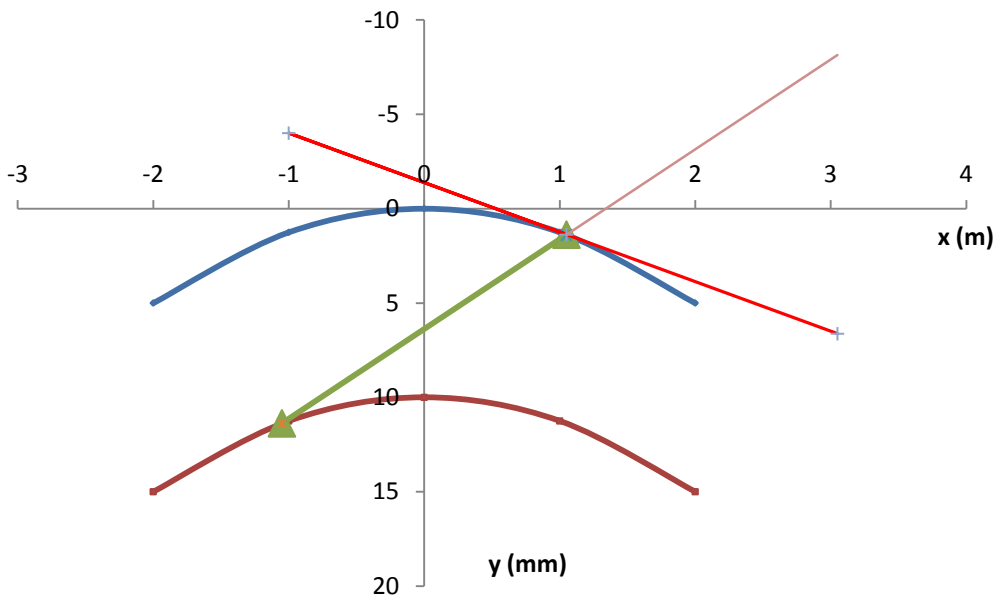
XVII. **Προαστιακές ΥΜ294**



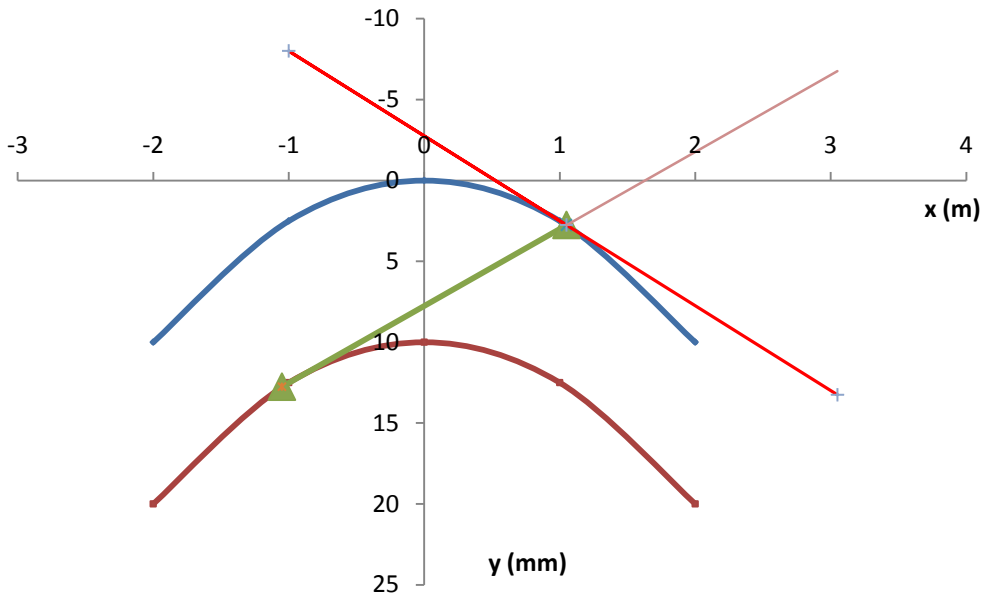
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	2
Τύπος φορείου	Jacob
Μεταξόνιο (mm)	2100
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	16400
Είδος οχήματος	Μ.Ε./Ε.Α

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	15
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-250	0
250-125	5
125-100	10

Πίνακας Π17: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

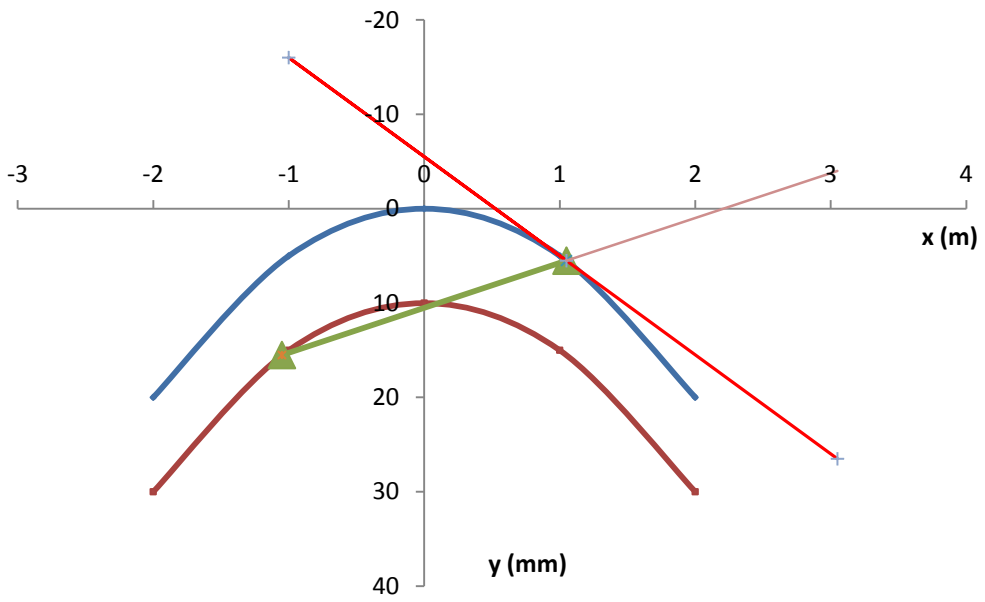


Σχήμα Π37: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π38: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

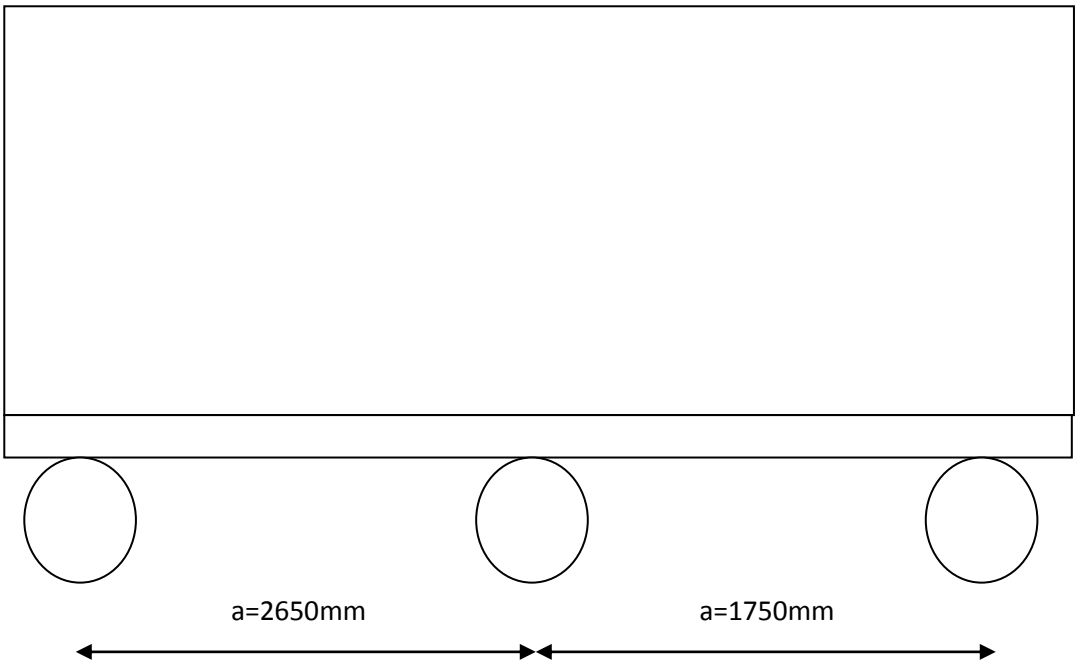
Ψ=0,57°



Σχήμα Π39: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=0,87^{o}

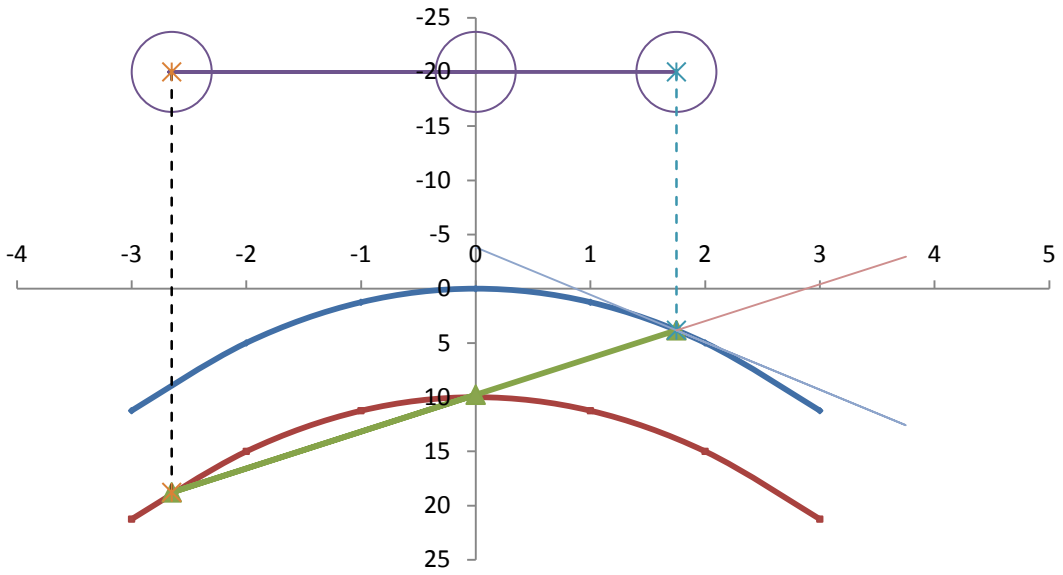
XVIII. **Krupp A101-130**



Αριθμός φορείων στο όχημα	1
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	3
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο 1ου φορείου (mm)	1750
Μεταξόνιο 2ου φορείου (mm)	2650
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	-
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

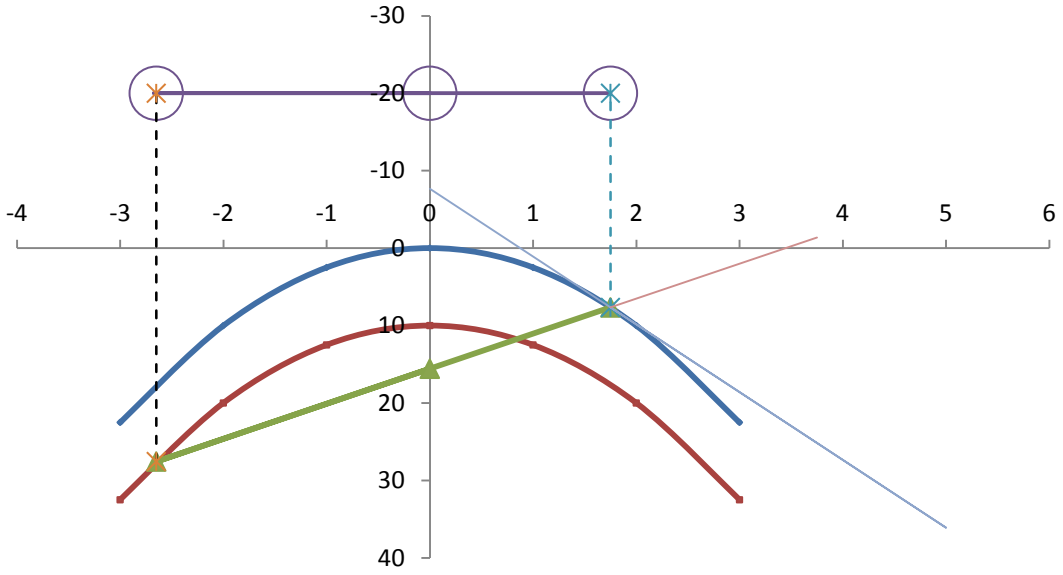
Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	20
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-300	5
250-175	10
150-125	15
100	20

Πίνακας Π18: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος



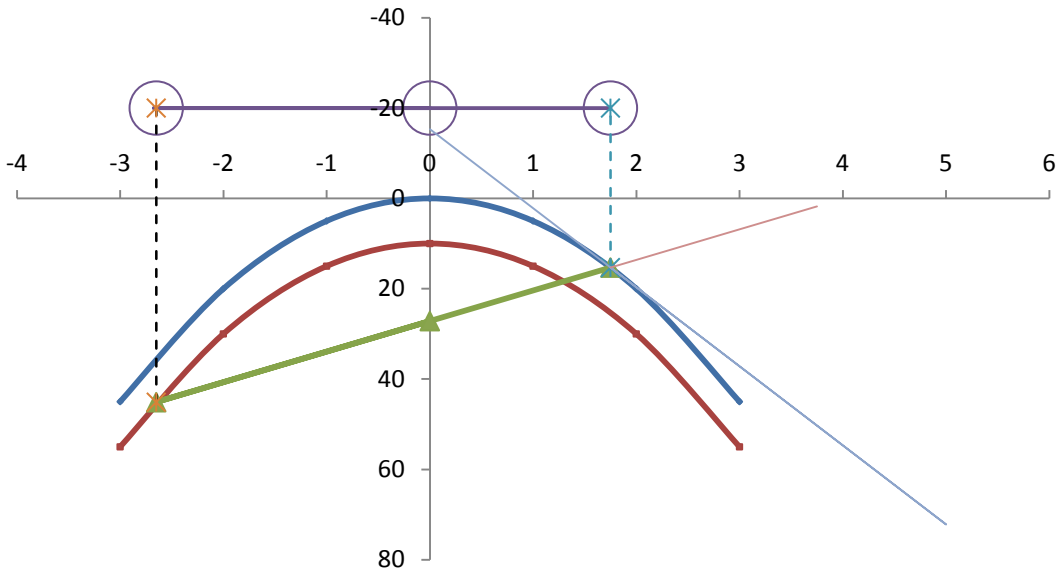
Σχήμα Π40: Vogelplan για R=400m (κίνηση προς τα εμπρός)

Ψ=0,45^{o}



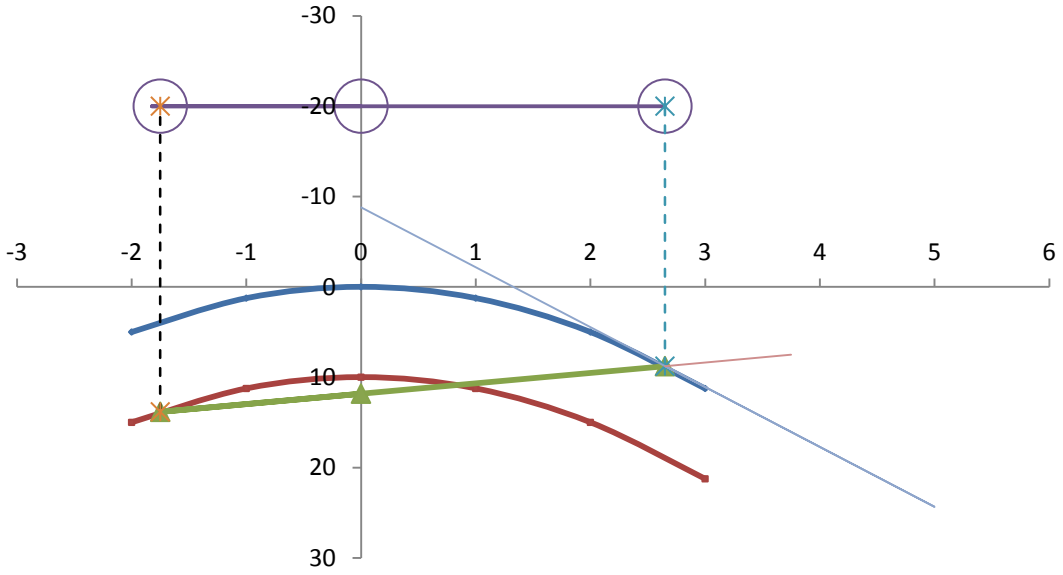
Σχήμα Π41: Vogelplan για R=200m (κίνηση προς τα εμπρός)

Ψ=0,76^{o}



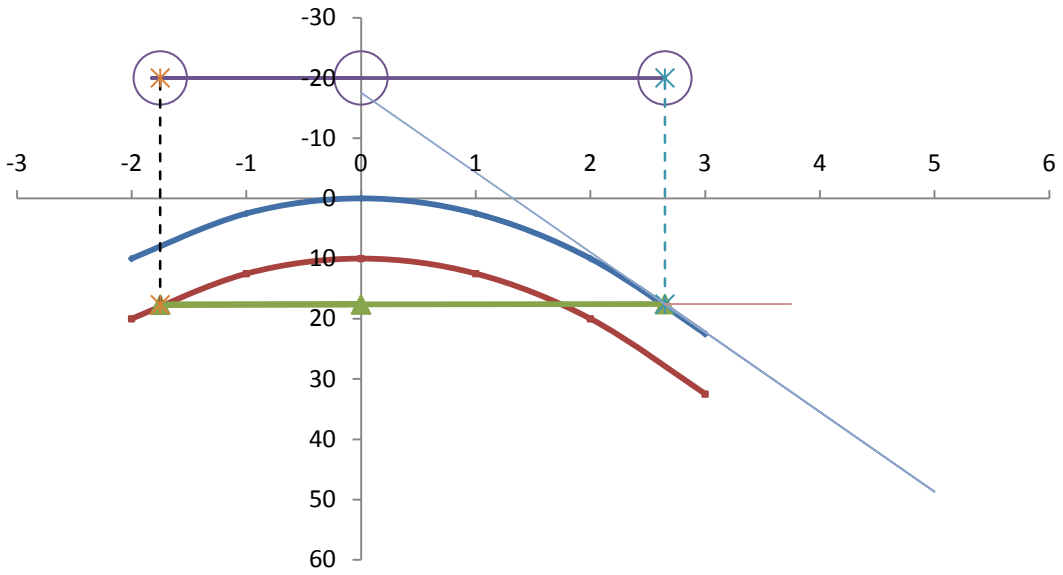
Σχήμα Π42: Vogelplan για R=100m (κίνηση προς τα εμπρός)

Ψ=1,39^{o}



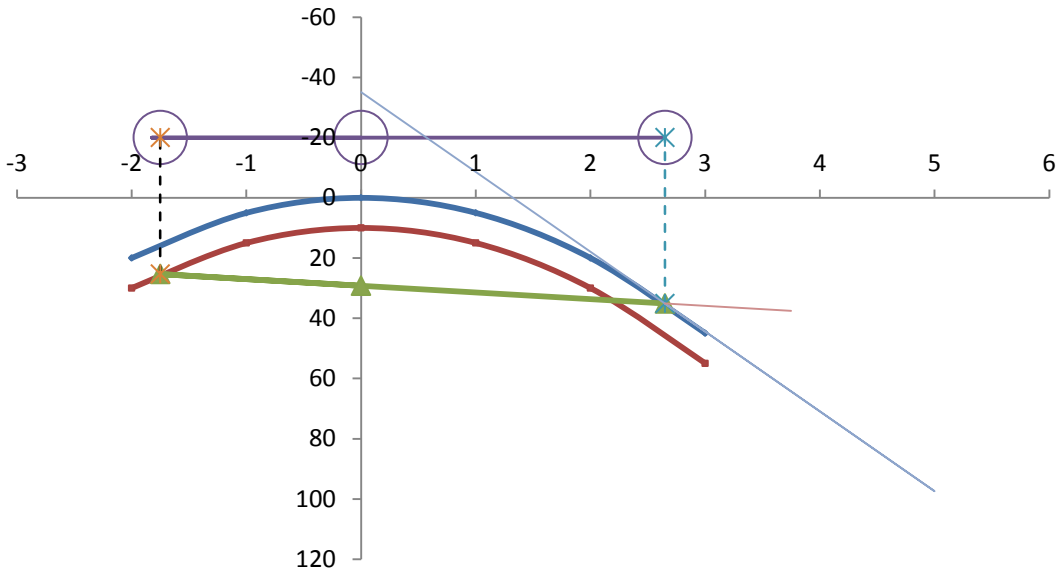
Σχήμα Π43: Vogelplan για R=400m (κίνηση προς τα πίσω)

Ψ=0,45^{o}



Σχήμα Π44: Vogelplan για R=200m (κίνηση προς τα πίσω)

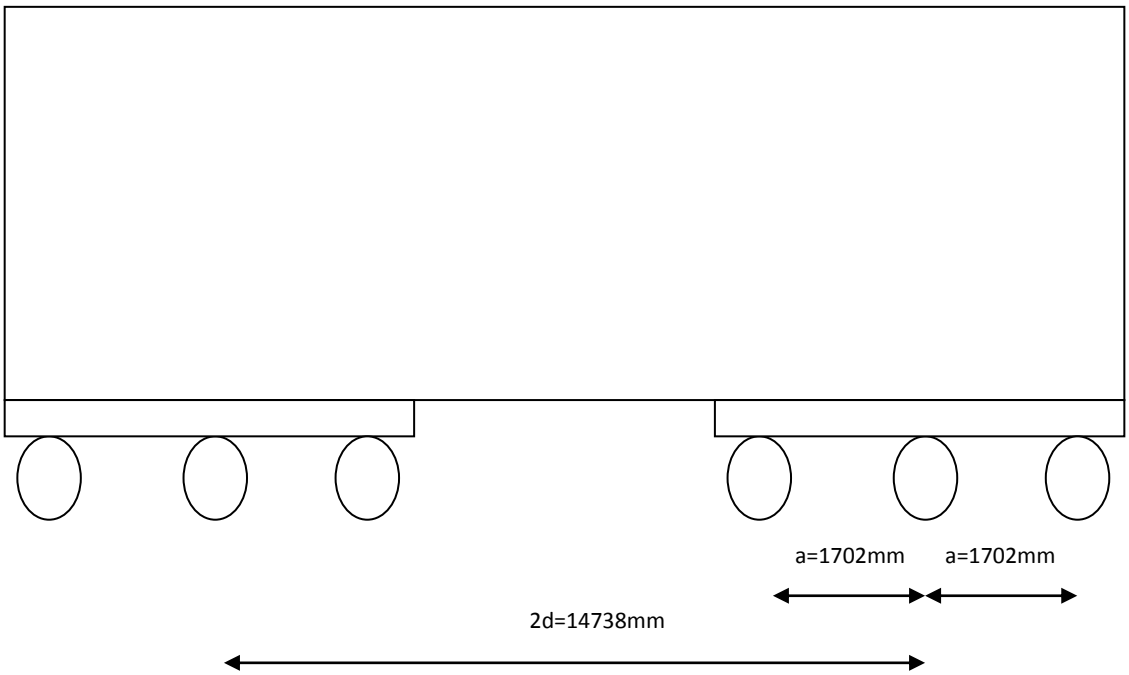
Ψ=0,76^{o}



Σχήμα Π45: Vogelplan για R=100m (κίνηση προς τα πίσω)

Ψ=1,39^{o}

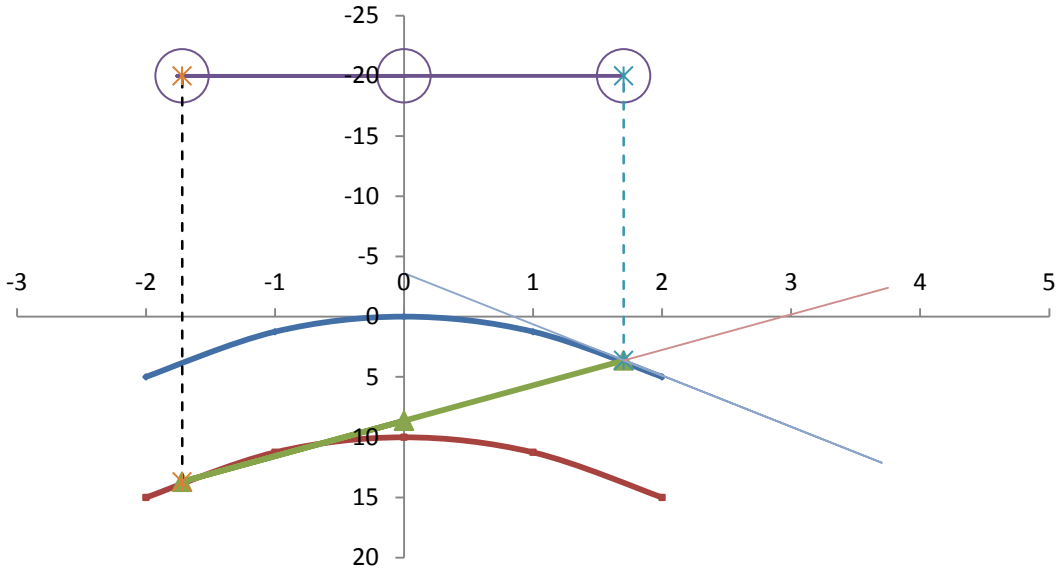
XIX. **MLW A501-510**



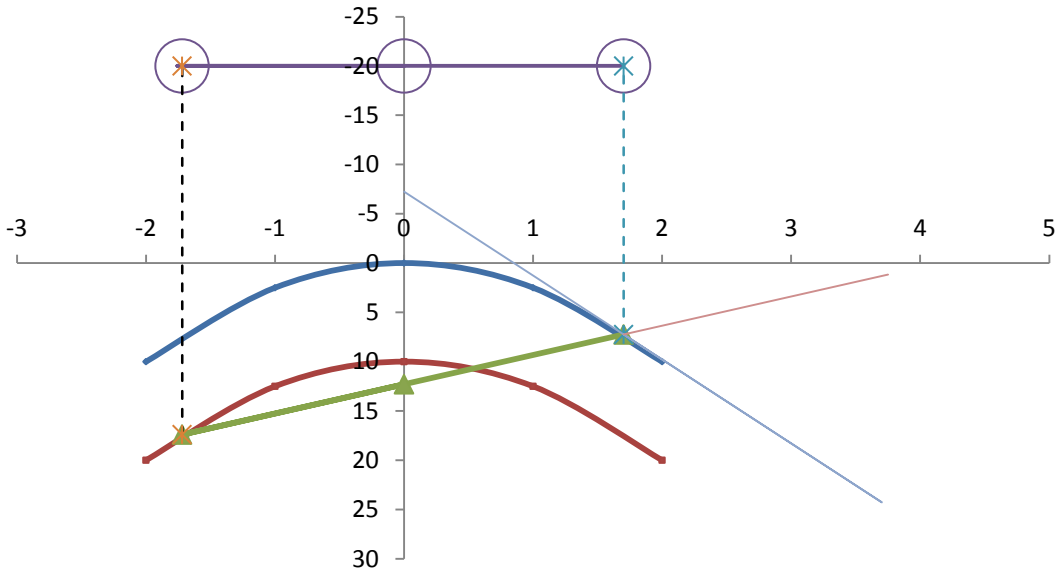
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	3
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο 1ου φορείου (mm)	1702
Μεταξόνιο 2ου φορείου (mm)	1702
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	14738
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	10
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400-300	0
250-150	5
125-100	10

Πίνακας Π19: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

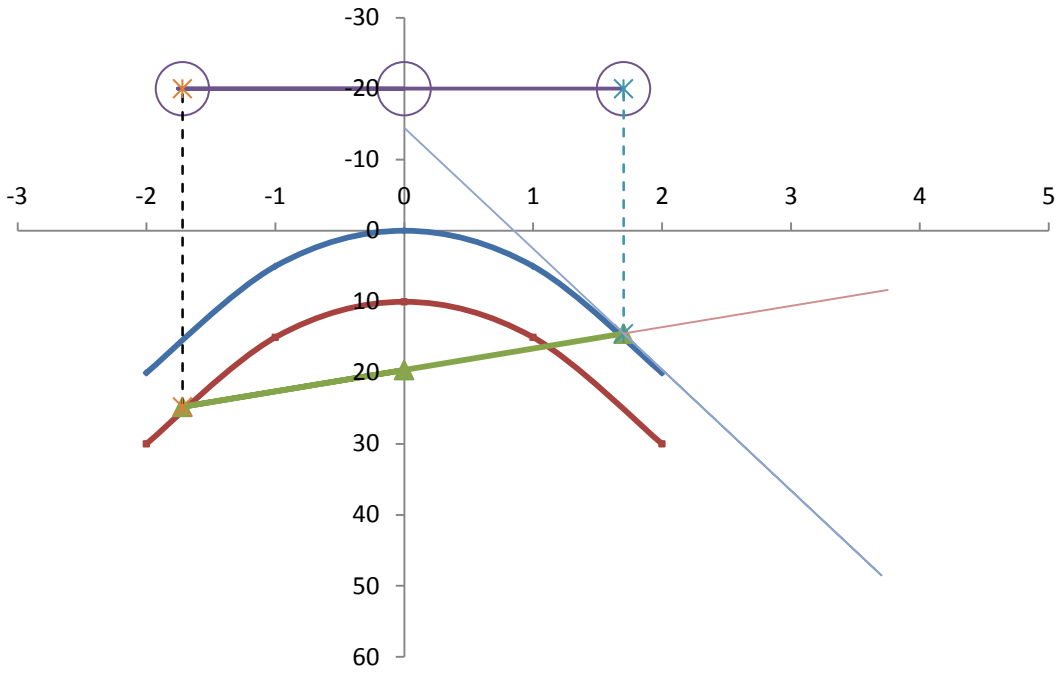


Σχήμα Π46: Vogelplan για R=400m (λεπτομέρεια ενός φορείου)



Σχήμα Π47: Vogelplan για R=200m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

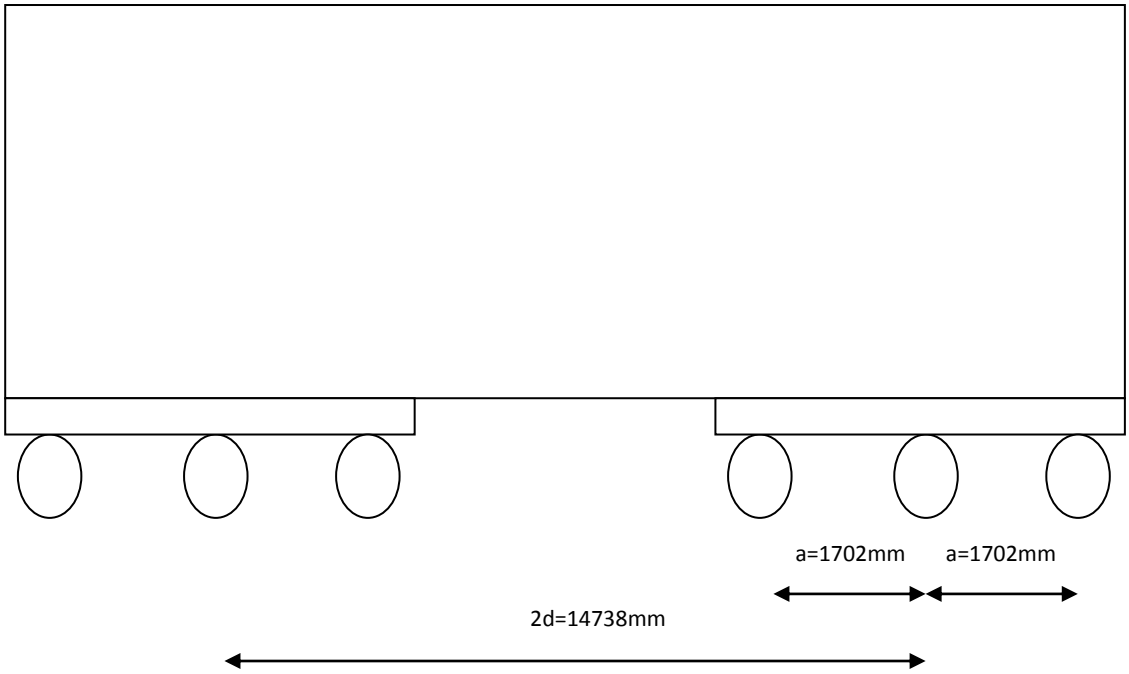
Ψ=0,66^{o}



Σχήμα Π48: Vogelplan για R=100m (λεπτομέρεια ενός φορείου)

Ψ=1,15^{o}

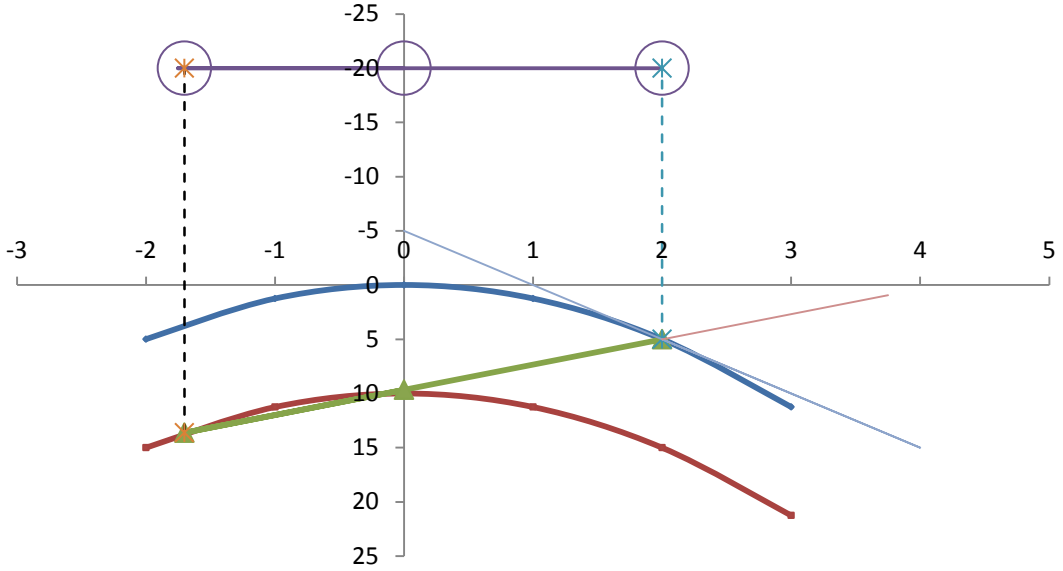
XX. MLW A451-470



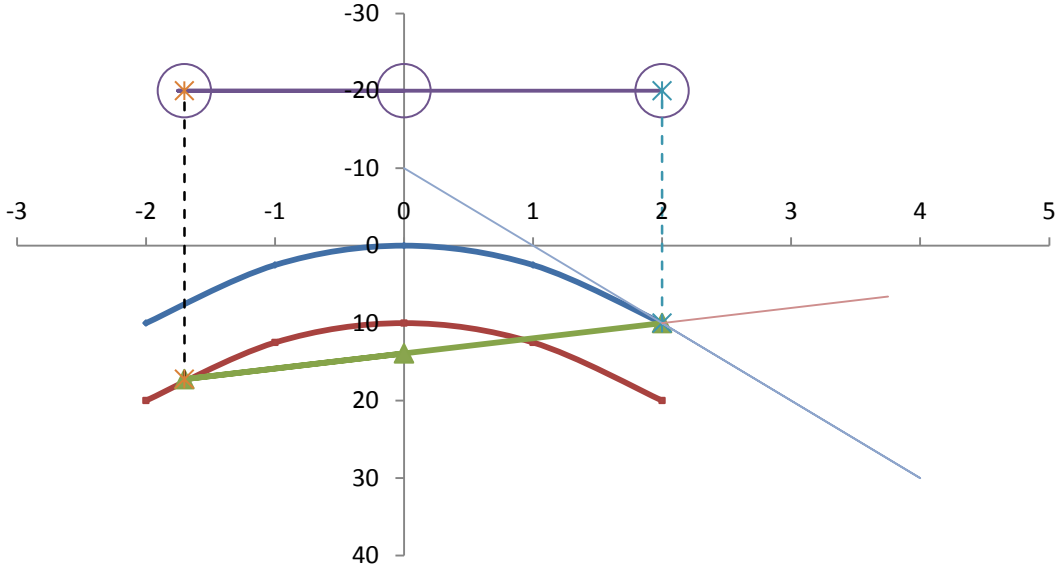
Αριθμός φορείων στο όχημα	2
Αριθμός τροχοφόρων αξόνων ανά φορείο	3
Τύπος φορείου	Κλασικό
Μεταξόνιο 1ου φορείου (mm)	2000
Μεταξόνιο 2ου φορείου (mm)	1702
Απόσταση ομφαλών φορείων (mm)	10770
Είδος οχήματος	Μηχανή έλξης

Μέγιστη απαιτούμενη διαπλάτυνση (mm)	20
R(m)	**Διαπλάτυνση (mm)**
400	0
350-200	5
150	10
125	15
100	20

Πίνακας Π20: Στοιχεία οχήματος και Απαιτούμενες διαπλατύνσεις οχήματος

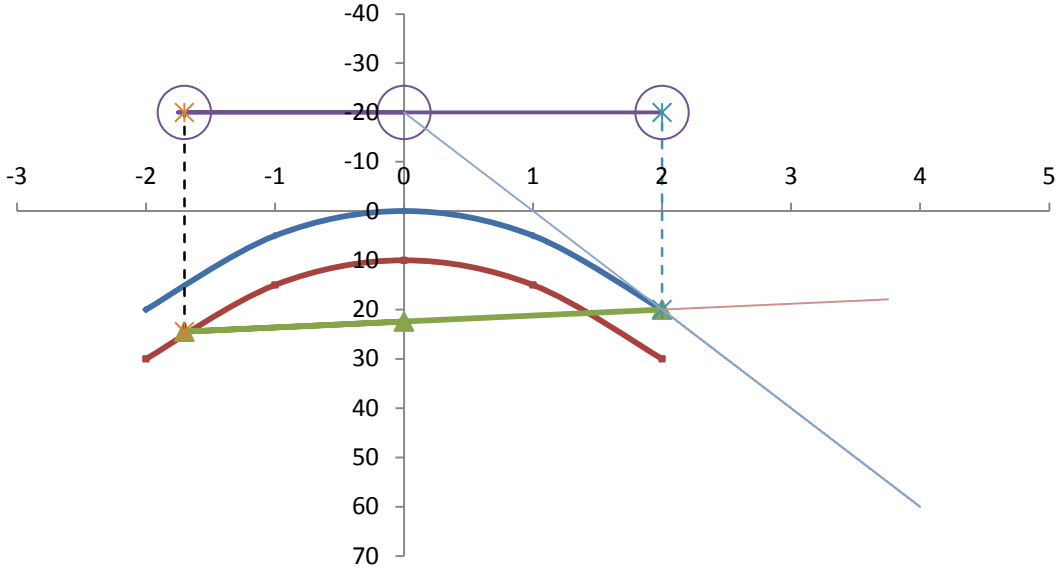


Σχήμα Π49: Vogelplan για R=400m (κίνηση προς τα εμπρός)



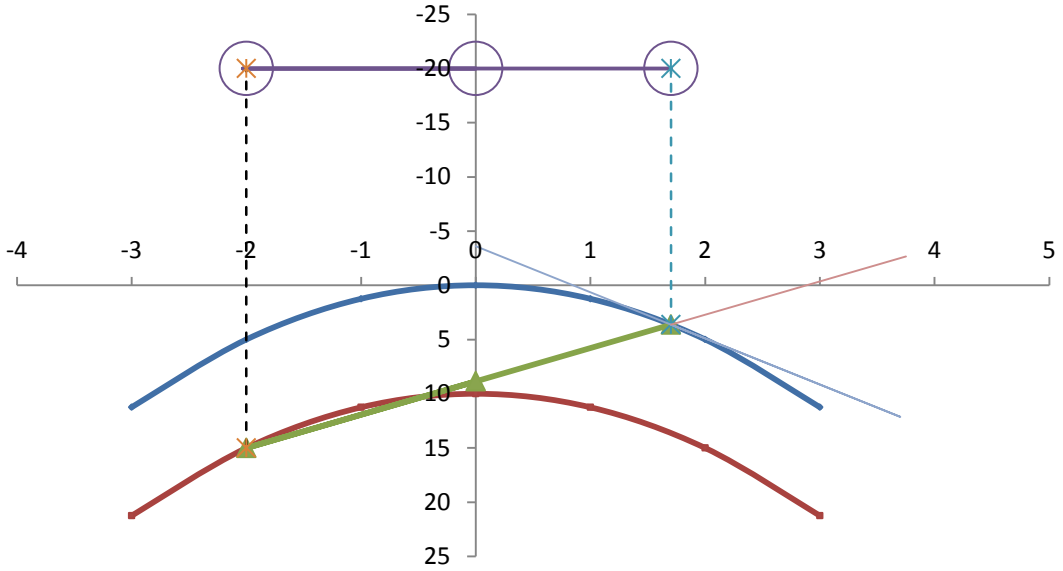
Σχήμα Π50: Vogelplan για R=200m (κίνηση προς τα εμπρός)

Ψ=0,68^{o}

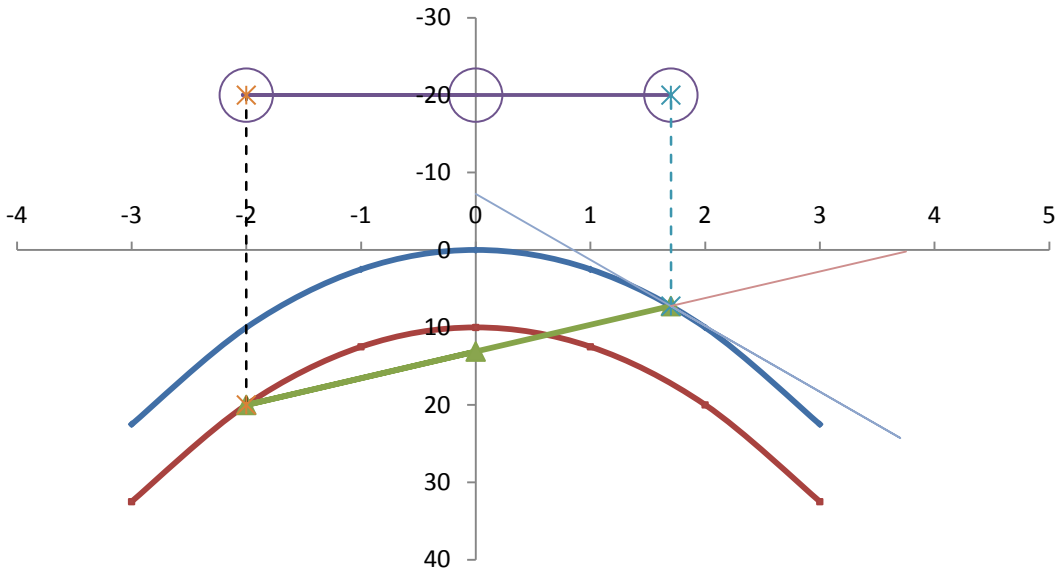


Σχήμα Π51: Vogelplan για R=100m (κίνηση προς τα εμπρός)

Ψ=1,22°

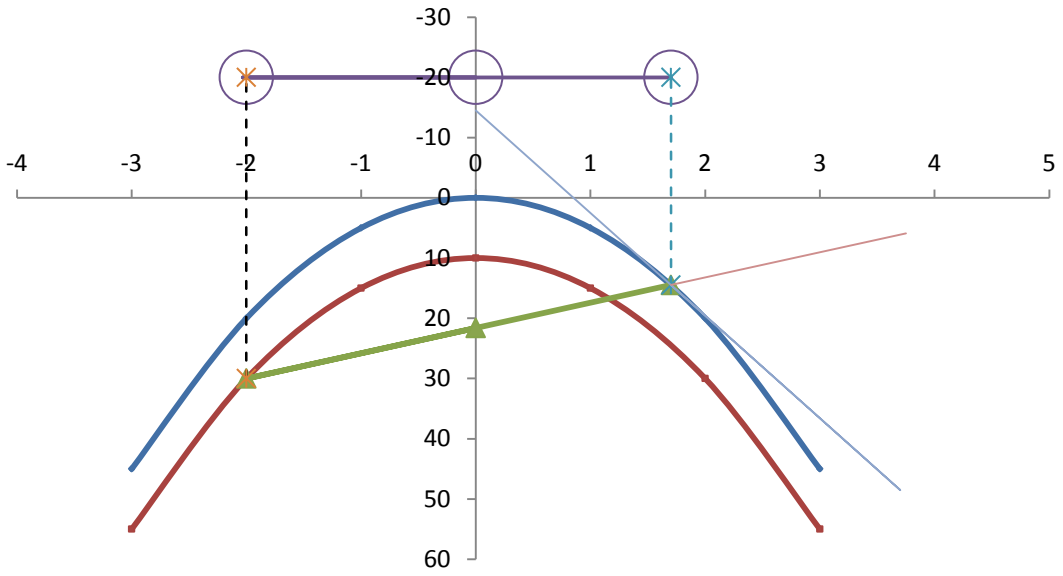


Σχήμα Π52: Vogelplan για R=400m (κίνηση προς τα πίσω)



Σχήμα Π53: Vogelplan για R=200m (κίνηση προς τα πίσω)

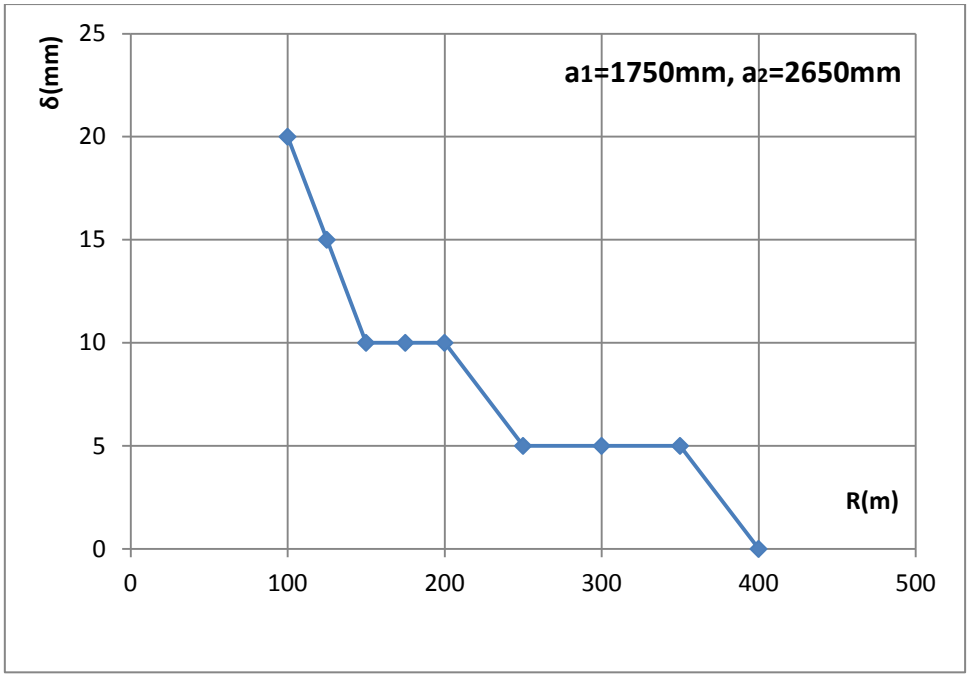
Ψ=0,69°



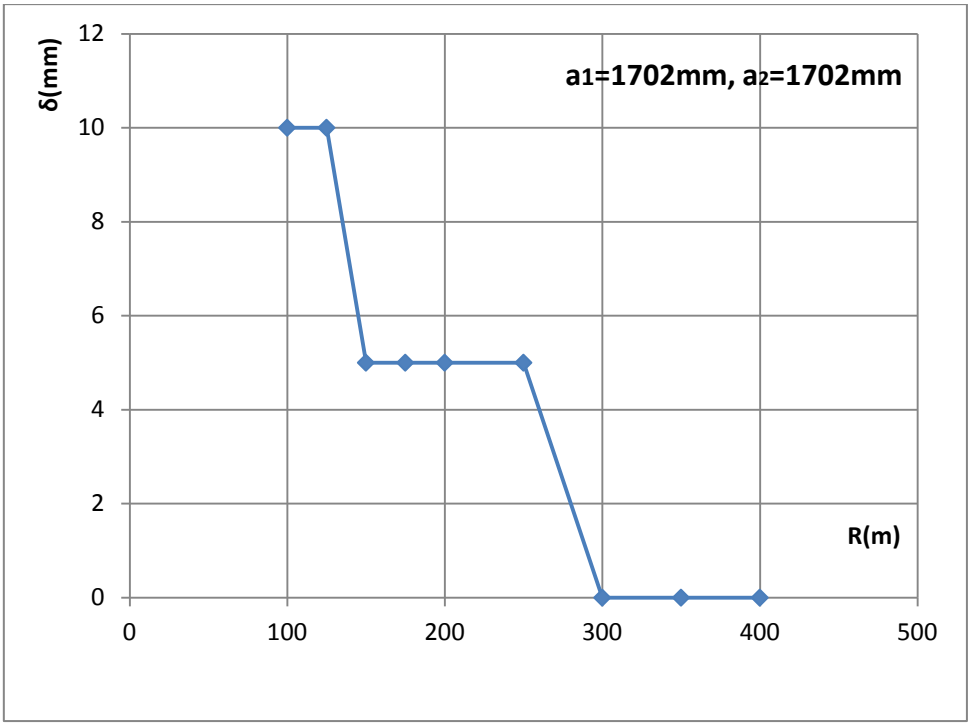
Σχήμα Π54: Vogelplan για R=100m (κίνηση προς τα πίσω)

Ψ=1,21°

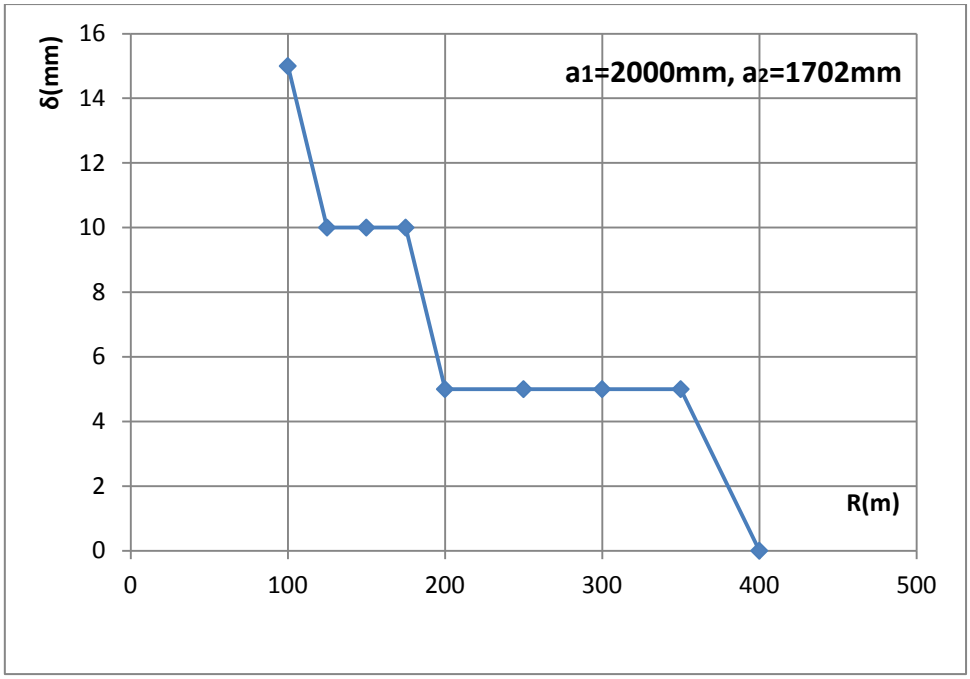
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β (ΔΙΑΠΛΑΤΥΝΣΕΙΣ)



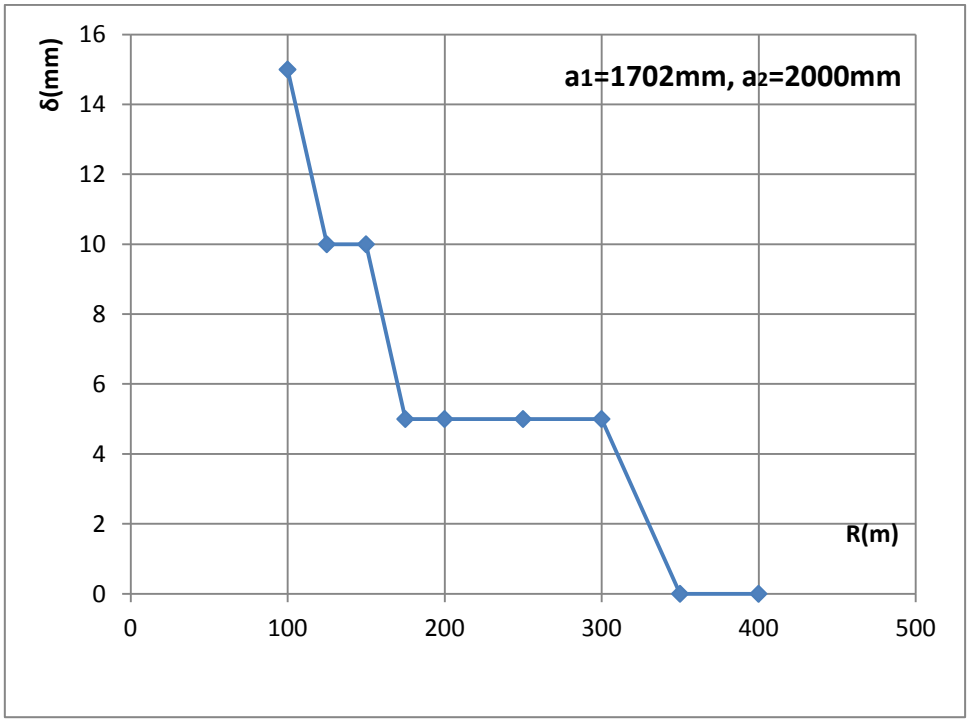
Σχήμα ΠΒ.1: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για τριαξονικό φορείο με a1=1750mm,a2=2650mm



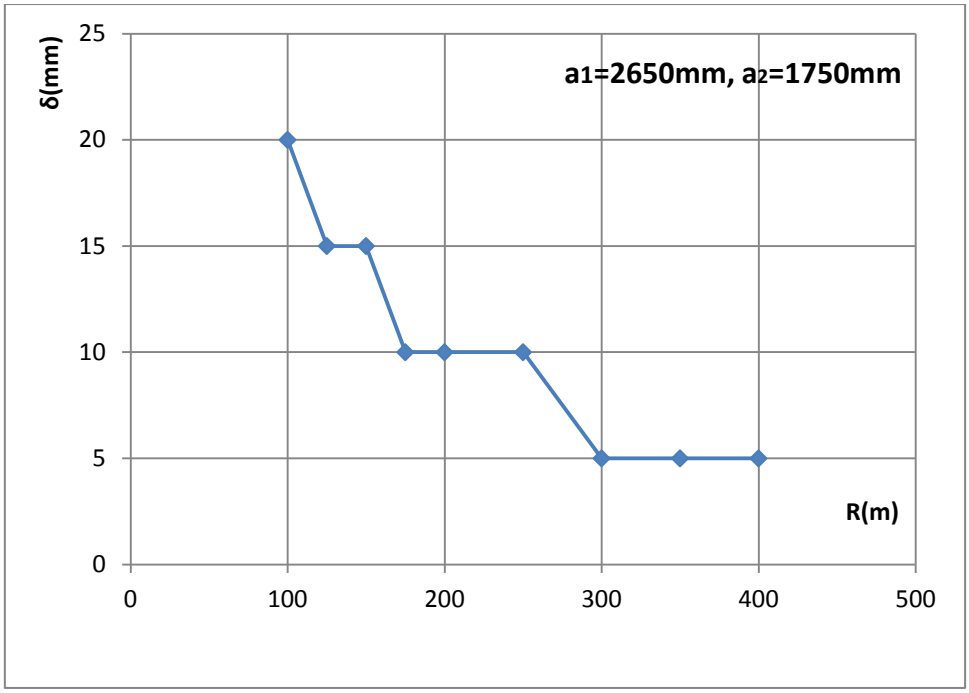
Σχήμα ΠΒ.2: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για τριαξονικό φορείο με a1=a2=1702mm



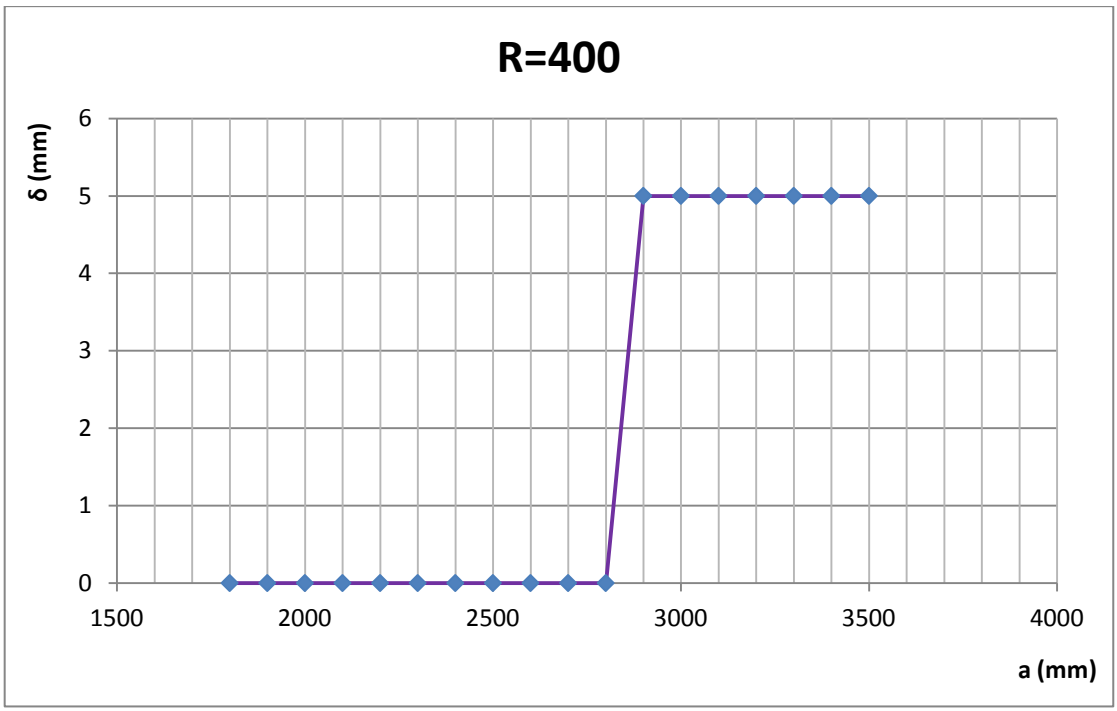
Σχήμα ΠΒ.3: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για τριαξονικό φορείο με a1=2000mm,a2=1702mm



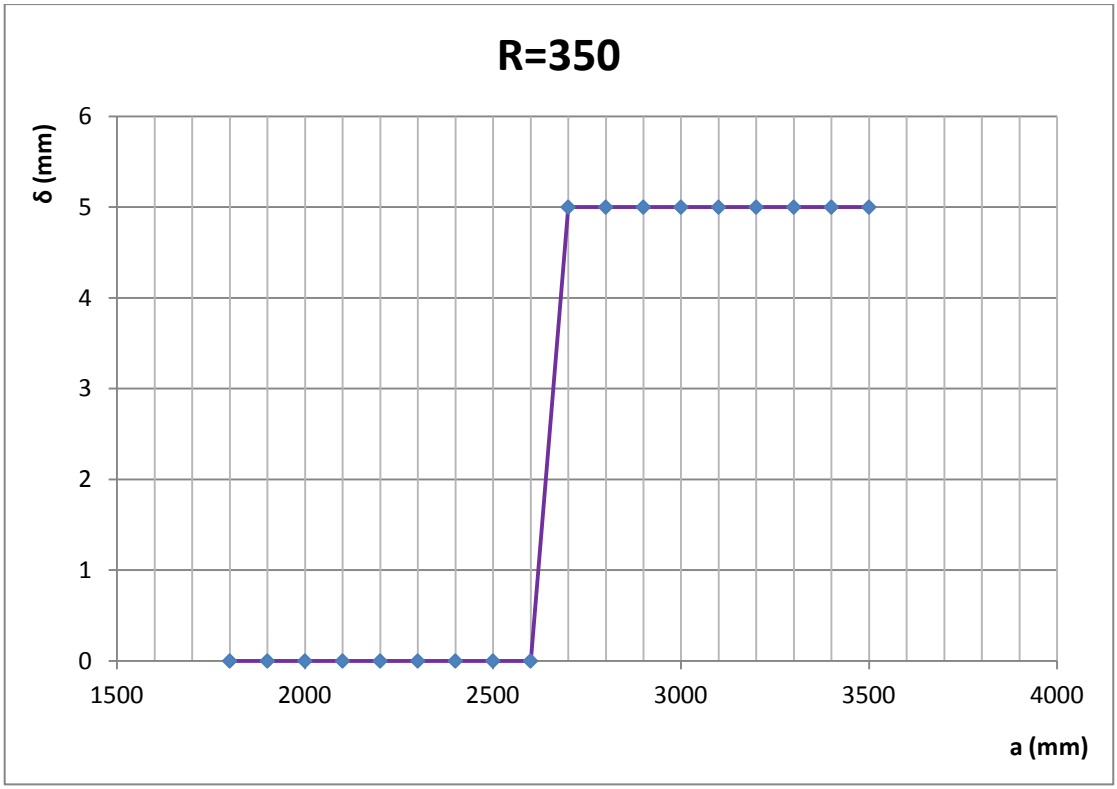
Σχήμα ΠΒ.4: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για τριαξονικό φορείο με a1=1702mm,a2=2000mm



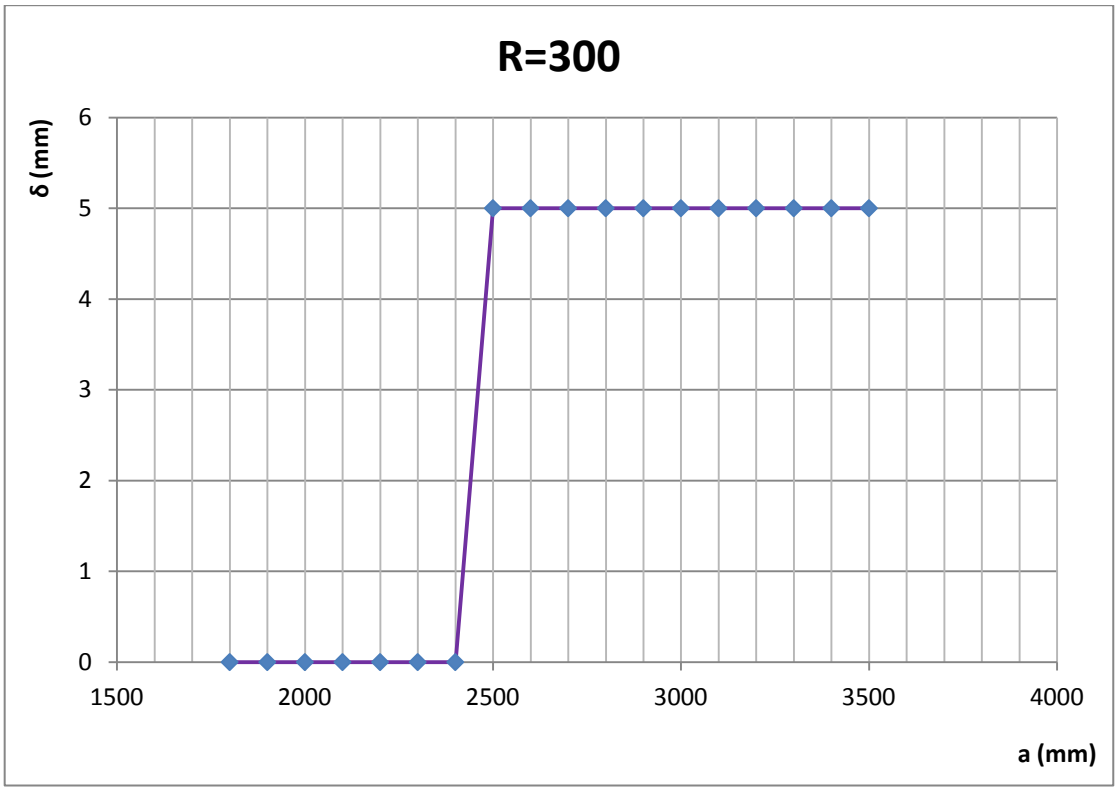
Σχήμα ΠΒ.5: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για τριαξονικό φορείο με a1=2650mm,a2=1750mmmm



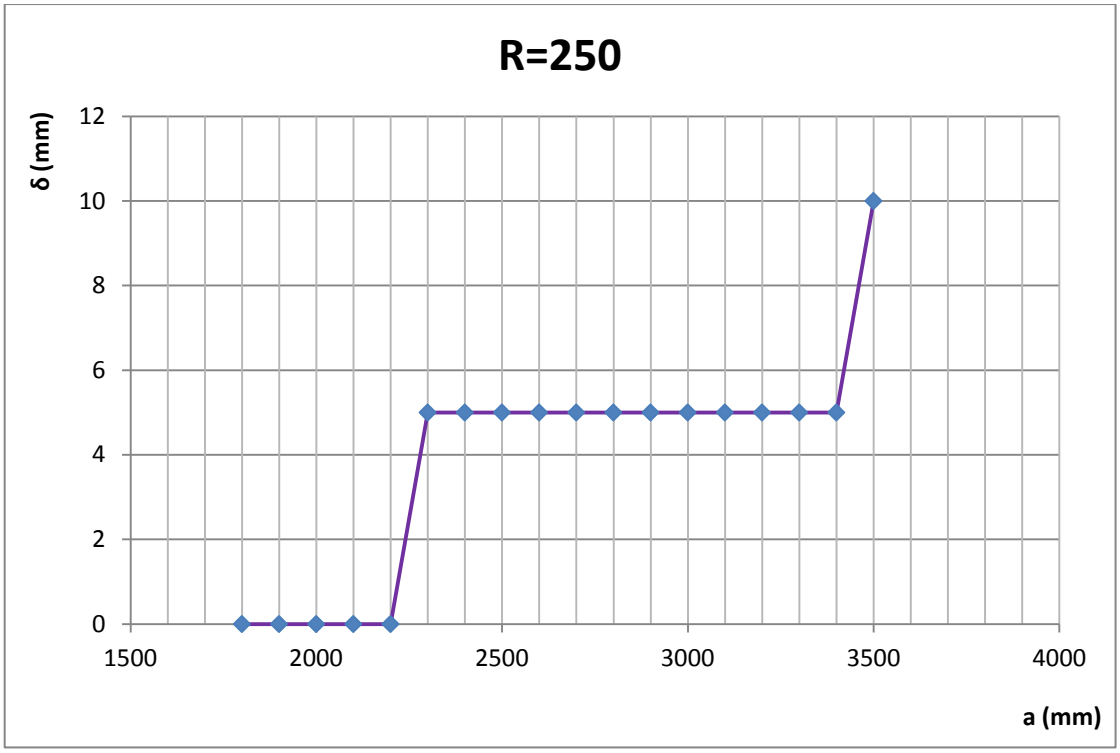
Σχήμα ΠΒ.6: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία R=400m



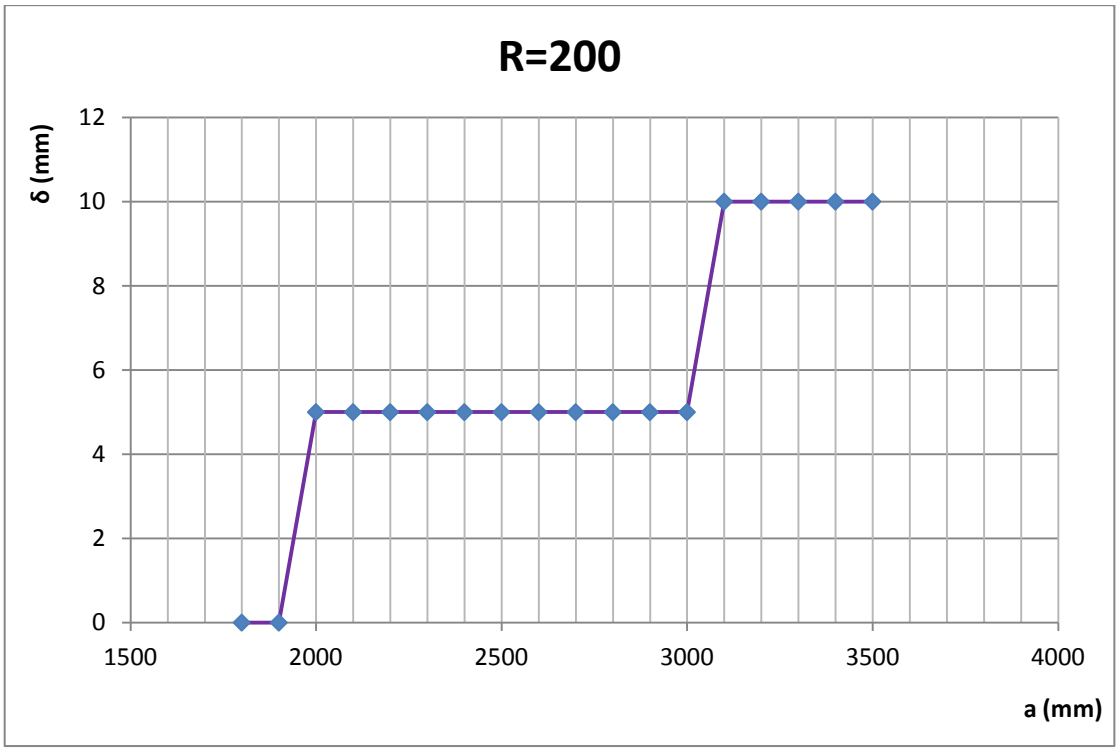
Σχήμα ΠΒ.7: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία R=350m



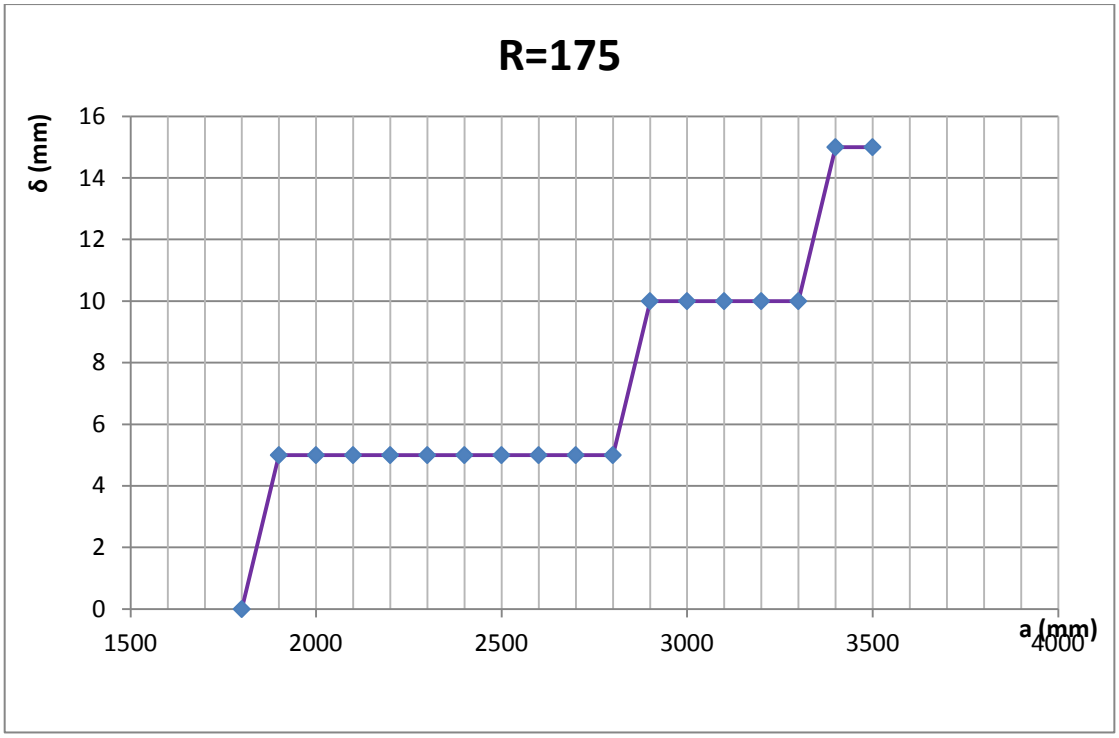
Σχήμα ΠΒ.8: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία R=300m



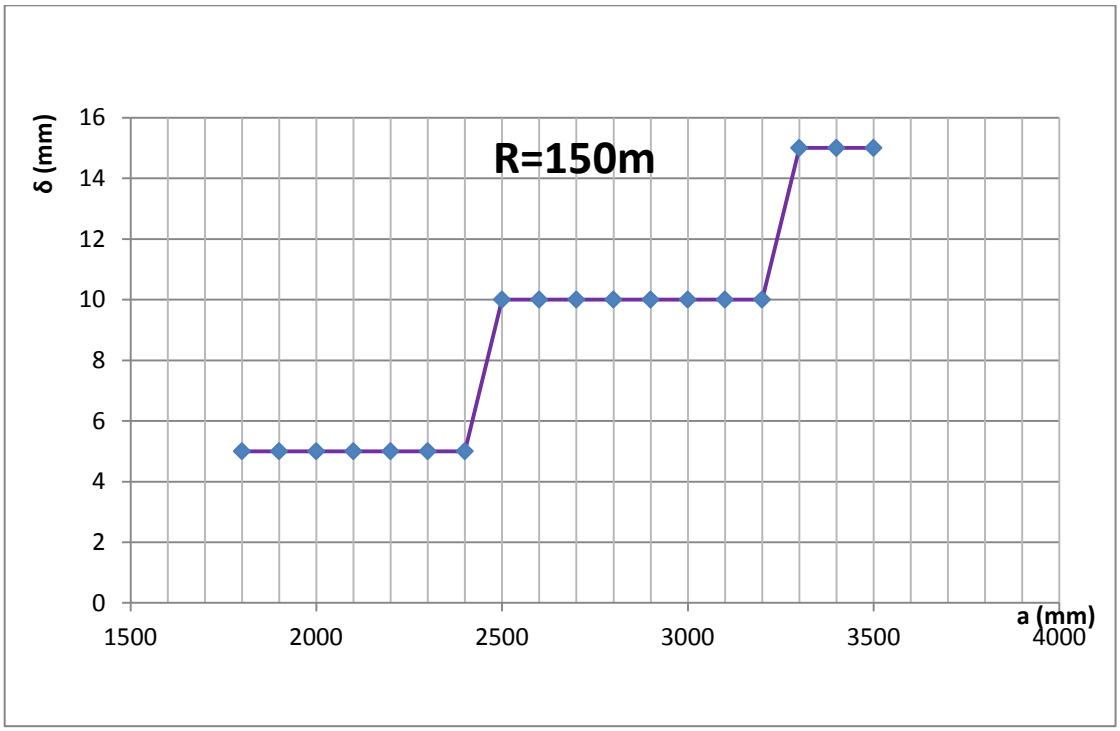
Σχήμα ΠΒ.9: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία R=250m



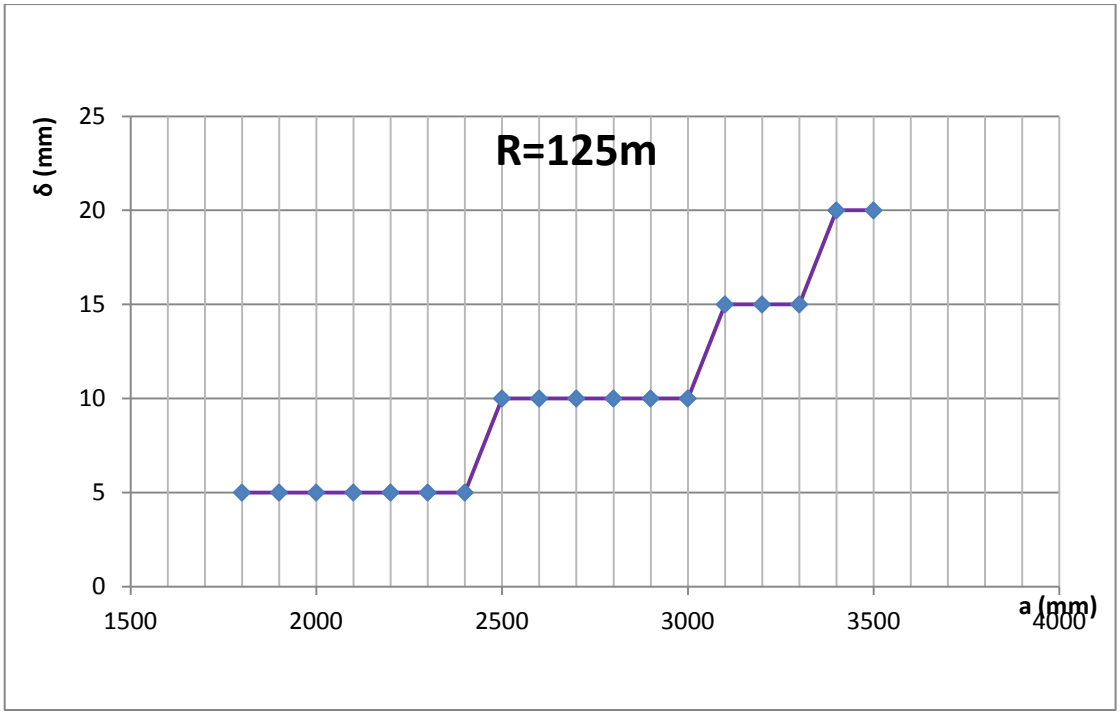
Σχήμα ΠΒ.10: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία R=200m



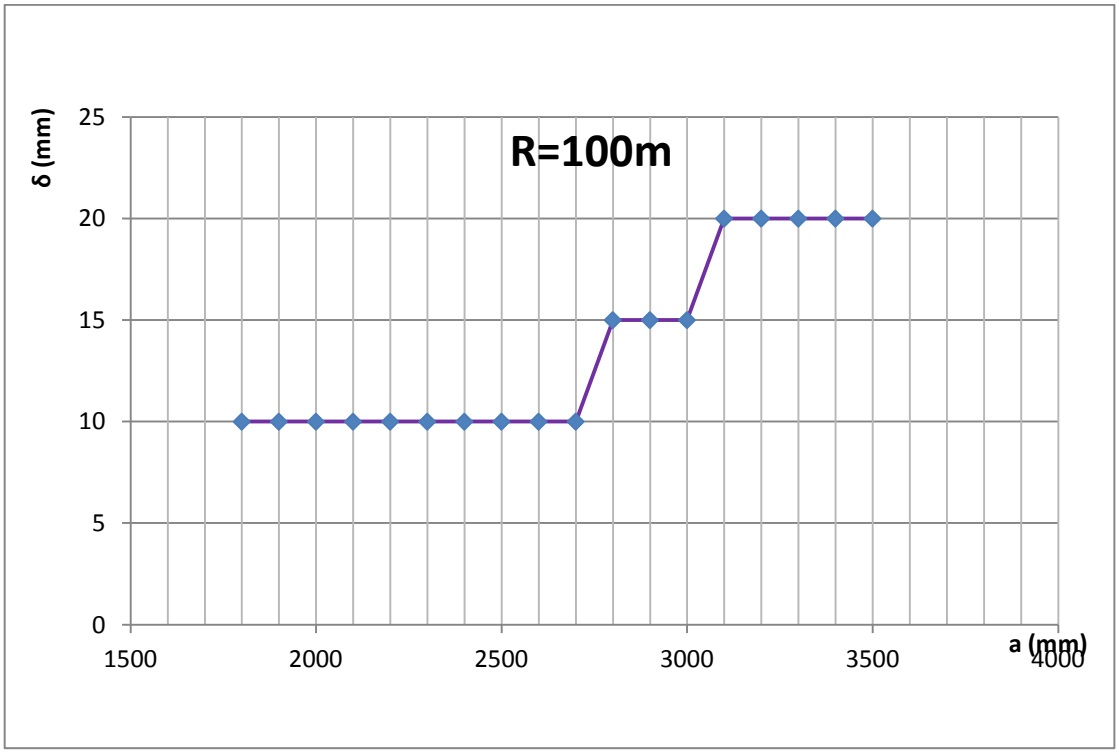
Σχήμα ΠΒ.11: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία R=175m



Σχήμα ΠΒ.12: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία R=150m



Σχήμα ΠΒ.13: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία R=125m

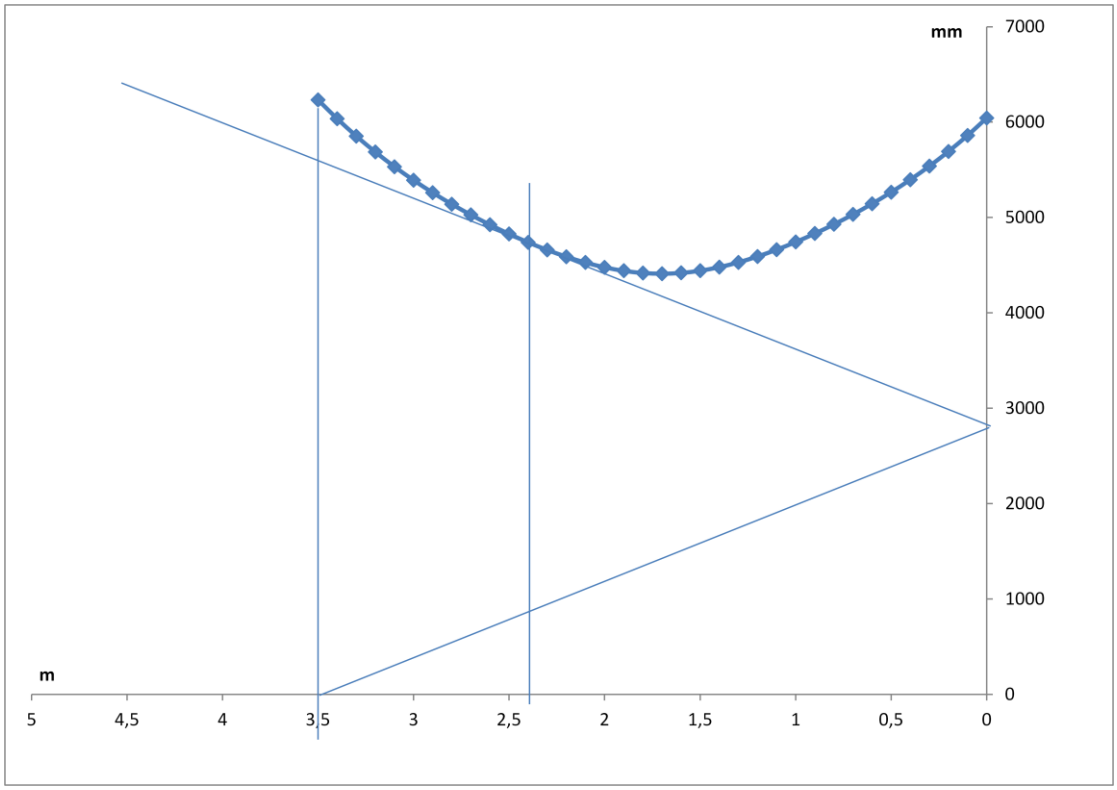


Σχήμα ΠΒ.14: Απαιτούμενες διαπλατύνσεις για διαξονικά φορεία R=100m

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ (ΔΥΝΑΜΕΙΣ)

X(m)	q_1 (mm)	q_2(mm)	q_3(mm)	Σq(mm)
0	717,5	1847,054	3478,7961	6043,351
0,1	724,4351	1755,338	3381,0091	5860,782
0,2	744,8532	1664,575	3283,3553	5692,784
0,3	777,6929	1574,932	3185,8472	5538,472
0,4	821,4659	1486,61	3088,4984	5396,575
0,5	874,532	1399,861	2991,3245	5265,717
0,6	935,3108	1314,994	2894,3431	5144,648
0,7	1002,4	1232,4	2797,5744	5032,375
0,8	1074,619	1152,567	2701,041	4928,227
0,9	1151,002	1076,109	2604,7691	4831,88
1	1230,775	1003,798	2508,789	4743,362
1,1	1313,319	936,595	2413,1354	4663,049
1,2	1398,144	875,677	2317,8486	4591,67
1,3	1484,859	822,4416	2222,976	4530,277
1,4	1573,152	778,4666	2128,5728	4480,191
1,5	1662,771	745,3927	2034,7045	4442,868
1,6	1753,513	724,7139	1941,4485	4419,675
1,7	1845,212	717,5028	1848,8976	4411,612
1,8	1937,732	724,1618	1757,1631	4419,057
1,9	2030,962	744,3186	1666,38	4441,661
2	2124,807	776,9236	1576,7125	4478,443
2,1	2219,19	820,4939	1488,3623	4528,047
2,2	2314,045	873,3901	1401,5785	4589,014
2,3	2409,317	934,029	1316,6709	4660,016
2,4	2504,956	1001,005	1234,0268	4739,988
2,5	2600,924	1073,131	1154,1327	4828,188
2,6	2697,185	1149,439	1077,6002	4924,224
2,7	2793,708	1229,15	1005,1976	5028,056
2,8	2890,468	1311,644	937,88179	5139,994
2,9	2987,441	1396,428	876,8251	5260,694
3	3084,608	1483,108	823,42106	5391,137
3,1	3181,95	1571,372	779,24467	5532,567
3,2	3279,452	1660,967	745,93716	5686,356
3,3	3377,1	1751,688	724,9981	5853,786
3,4	3474,882	1843,369	717,51115	6035,763
3,5	3572,787	1935,875	723,89381	6232,555

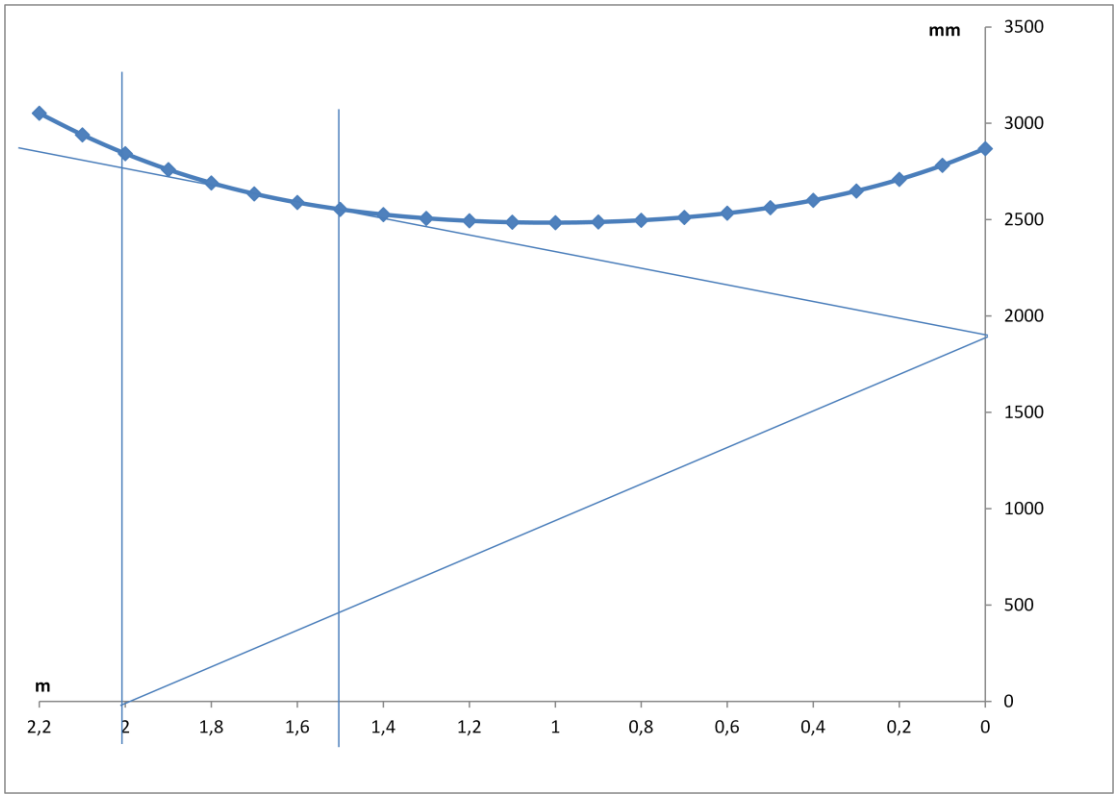
Πίνακας ΠΓ.1: Βραχίονες και συντεταγμένες γραμμής ροπών MLW A501-510



Σχήμα ΠΓ.1: Μέθοδος ελαχίστου του Heumann για MLW A501-510 σε σφηνοειδή κύλιση

x (m)	q_1 (mm)	q_2 (mm)	Σq (mm)
0	717,5	2151,183	2868,6835
0,1	724,4351	2057,18	2781,6153
0,2	744,8532	1963,769	2708,6226
0,3	777,6929	1871,04	2648,7328
0,4	821,4659	1779,098	2600,5641
0,5	874,532	1688,073	2562,605
0,6	935,3108	1598,121	2533,4316
0,7	1002,4	1509,434	2511,834
0,8	1074,619	1422,248	2496,8674
0,9	1151,002	1336,858	2487,8606
1	1230,775	1253,631	2484,4055
1,1	1313,319	1173,026	2486,3449
1,2	1398,144	1095,623	2493,7671
1,3	1484,859	1022,15	2507,0088
1,4	1573,152	953,5147	2526,6664
1,5	1662,771	890,8368	2553,6075
1,6	1753,513	835,4581	2588,9707
1,7	1845,212	788,9171	2634,1288
1,8	1937,732	752,8547	2690,587
1,9	2030,962	728,828	2759,7899
2	2124,807	718,0461	2842,8535
2,1	2219,19	721,1035	2940,2939
2,2	2314,045	737,8281	3051,8735

Πίνακας ΠΓ.2: Βραχίονες και συντεταγμένες γραμμής ροπών General Electric



Σχήμα ΠΓ.2: Μέθοδος ελαχίστου του Heumann για General Electric σε σφηνοειδή κύλιση