

## 5. Η χάραξη της σιδηροδρομικής γραμμής

Τα δύο παραπάνω φαινόμενα (φυγόκεντρη δύναμη, δυνάμεις ψευδοολίσθησης) έχουν δυσμενείς επιπτώσεις τόσο στο τροχαίο υλικό όσο και στη γραμμή.

Η **φυγόκεντρη δύναμη** μπορεί να προκαλέσει:

- μετατόπιση του φορτίου των οχημάτων και ανατροπή τους,
- εγκάρσιες επιταχύνσεις με αποτέλεσμα τη μείωση της εγκάρσιας δυναμικής άνεσης των επιβατών,
- εγκάρσιες μετατοπίσεις των αξόνων, των φορέων και του αμαξώματος,
- εμφάνιση δυνάμεων καθοδήγησης και κατά συνέπεια αύξηση της αντίστασης κίνησης του συρμού, θόρυβο κατά την κύλιση, φθορές των τροχών και των σιδηροτροχιών, μετατόπιση της γραμμής και εκτροχιασμό των οχημάτων.

### 5.1 Εισαγωγή

Μια σιδηροδρομική γραμμή θεωρείται ιδανική ως προς τη γεωμετρία χάραξης όταν:

- Αποτελείται αποκλειστικά από ευθύγραμμα τμήματα.
- Κείται, σε όλο το μήκος της, επί ενός οριζοντίου επιπέδου.
- Δεν παρουσιάζει γεωμετρικά σφάλματα.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες ένα σιδηροδρομικό όχημα μπορεί να αναπτύξει με πλήρη ασφάλεια και με καλή ποιότητα κύλισης (μικρή ενεργειακή κατανάλωση, περιορισμένες φθορές τροχαίου υλικού και επιδομής, αθόρυβη κύλιση, δυναμική άνεση επιβατών), ταχύτητες μεγαλύτερες των 300 km/h.

Η αύξηση των **δυνάμεων ψευδο-ολίσθησης** προκαλεί:

- θόρυβο κατά την κύλιση,
- πρόσθετες φθορές στην επιφάνεια επαφής τροχού-σιδηροτροχιάς και κόπωση των υλικών επαφής,
- πέρα από μία ορισμένη τιμή, ολίσθηση των τροχών, επαφή του όνυχου με την εσωτερική παρειά της σιδηροτροχιάς, και εμφάνιση δυνάμεων καθοδήγησης.

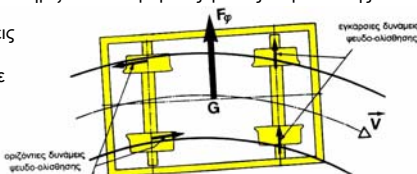
#### 5.1.1 Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα καμπύλα τμήματα της οριζοντιογραφίας

Η παρουσία των **καμπύλων τμημάτων στην οριζοντιογραφία** γραμμής προκαλεί:

- την εμφάνιση **φυγόκεντρης δύναμης  $F_{\phi}$** , η οποία εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους των οχημάτων και η οποία ωθεί τα οχήματα προς το εξωτερικό της καμπύλης.
- την αύξηση των **δυνάμεων ψευδο-ολίσθησης**, που επενεργούν στην επιφάνεια επαφής τροχών-σιδηροτροχιάς.

Στις καμπύλες, λόγω της γεωμετρίας της γραμμής, η εγγραφή των συμβατικών φορέων χαρακτηρίζεται από μεγάλες γωνίες παρέκκλισης

και εγκάρσιες μετατοπίσεις των αξόνων, με αποτέλεσμα, σε σχέση με τις ευθυγραμμίες, να αυξάνονται σημαντικά οι τιμές των οριζοντίων και εγκάρσιων δυνάμεων ψευδο-ολίσθησης.



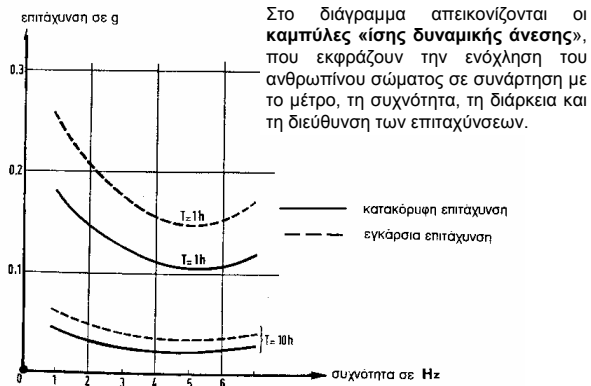
Για να **περιορισθούν** οι επιπτώσεις αυτές πρέπει:

- Να επιλέγονται όσο το δυνατόν μεγαλύτερες ακτίνες καμπυλότητας.
- Να μειώνεται, στα συγκεκριμένα τμήματα, η ταχύτητα διέλευσης των συρμών.
- Να δίνεται η κατάλληλη υπερύψωση στην εξωτερική σιδηροτροχιά, έτσι ώστε η φυγόκεντρη δύναμη να αντισταθμίζεται, μερικώς ή ολικώς, από την εγκάρσια συνιστώσα του βάρους του οχήματος.
- Να γίνεται, με τη βοήθεια καμπύλων συναρμογής, ομαλά η μετάβαση από τα ευθύγραμμα τμήματα στα κυκλικά καμπύλα τμήματα και αντίθετα.
- Να επιλέγεται η κατάλληλη τεχνολογία φορέων και να γίνεται σωστά η διαστασιολόγηση των κατασκευαστικών παραμέτρων των φορέων.
- Να γίνονται οι σωστές επιλογές όσον αφορά τα στοιχεία της επιδομής (στρωτήρες, σιδηροτροχιά, έρμα).
- Να γίνεται, στις καμπύλες μικρής ακτίνας καμπυλότητας ( $R_c < 500-600 \text{ m}$ ), διαπλάτυνση του εύρους της γραμμής.
- Το πρόβλημα της εγκάρσιας δυναμικής άνεσης των επιβατών μπορεί να περιορισθεί χρησιμοποιώντας οχήματα με αμάξωμα με μεταβαλλόμενη κλίση (*caisse inclinable, tilting body*).

### 5.1.2 Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στα καμπύλα τμήματα της οριζοντιογραφίας

Η παρουσία **κατά μήκος κλίσεων** σε μια γραμμή προκαλεί:

- αύξηση της αντίστασης κίνησης του συρμού,
- κατακόρυφες επιταχύνσεις  $\gamma_v$ ,
- προβλήματα στην ομαλή και ασφαλή πορεία των συρμών στις κατωφέρειες και στις ανωφέρειες,
- μείωση της ορατότητας των μηχανοδηγών.



Τα παραπάνω φαινόμενα έχουν δυσμενείς επιπτώσεις στο τροχαίο υλικό, στη γραμμή αλλά και στην εκμετάλλευση του δικτύου.

Ειδικότερα:

- Μειώνεται η μεταφορική ικανότητα και η μέση ταχύτητα του συρμού.
- Μειώνεται το επίπεδο της κατακόρυφης δυναμικής άνεσης των επιβατών.
- Απαιτούνται μεγαλύτερες δυνάμεις τροχοπέδησης.

Για να περιορισθούν οι παραπάνω δυσμενείς επιπτώσεις απαιτούνται:

- Όσο το δυνατόν μικρότερες κατά μήκος κλίσεις και μικρότερο ποσοστό επικλινών τμημάτων στο σύνολο του μήκους της γραμμής.
- Μεγάλες ακτίνες συναρμογής στη μηχανομη.
- Ασφαλή συστήματα τροχοπέδησης.
- Κινητήρια οχήματα με μεγαλύτερες ελκτικές δυνατότητες.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα της προηγούμενης σελίδας, αλλά και από την πρακτική εμπειρία:

- Η δυναμική άνεση είναι ελάχιστη για συχνότητες της τάξης των 5 HZ.
- Το ανθρώπινο σώμα συμπεριφέρεται καλύτερα σε κραδασμούς που αντιστοιχούν σε συχνότητες 5-20 HZ.
- Η χρονική διάρκεια  $T$  των επιταχύνσεων αυξάνει σημαντικά την ενόχληση των επιβατών.
- Το ανθρώπινο σώμα ενοχλείται περισσότερο από τις κατακόρυφες επιταχύνσεις, και ειδικότερα όταν αυτές έχουν φορά προς τα άνω.
- Η ενόχληση είναι μεγαλύτερη για τους ορθούς επιβάτες.

Η δυναμική άνεση των επιβατών συνδέεται άμεσα με τη χάραξη της οριζοντιογραφίας και της μηχανομη της γραμμής.

Η επιλογή της ακτίνας καμπυλότητας στην οριζοντιογραφία και στη μηχανομη εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τιμές της εγκάρσιας και κατακόρυφης αντίστοιχα επιτάχυνσης που γίνονται αποδεκτές.

## 5.2 Δυναμική άνεση επιβατών

Με τον όρο **δυναμική άνεση επιβατών** εννοούμε την ποσοτική και ποιοτική ενόχληση των επιβατών από τις επιταχύνσεις του αμαξώματος. Η ενόχληση αυτή, που σ' ένα πρώτο στάδιο εκδηλώνεται σαν ναυτία, εξαρτάται από:

- Την αριθμητική τιμή των επιταχύνσεων.
- Την διεύθυνση των επιταχύνσεων (κατακόρυφη, εγκάρσια, οριζόντια).
- Τη διάρκεια και τη συχνότητα με τις οποίες οι επιταχύνσεις γίνονται αισθητές στο ανθρώπινο σώμα.
- Τη φορά των επιταχύνσεων (προς τα άνω ή προς τα κάτω).
- Την ταχύτητα μεταβολής των επιταχύνσεων ( $dy/dt$ ).
- Τη στάση των επιβατών (καθήμενοι ή όρθιοι), και τέλος
- Τη φυσιολογία κάθε ατόμου.

## 5.3 Οριζοντιογραφία της γραμμής

### 5.3.1. Ακτίνες καμπυλότητας στην οριζοντιογραφία

Οι καμπύλες στην οριζοντιογραφία εκφράζονται συνήθως με την ακτίνα καμπυλότητας  $R_c$  ή με το μήκος τους, μετρούμενο πάνω στον άξονα της γραμμής.

Ανάλογα με το μέτρο της ακτίνας καμπυλότητας, οι καμπύλες στην οριζοντιογραφία μπορούν να χωρισθούν σε πέντε κατηγορίες:

- Καμπύλες πολύ μεγάλης ακτίνας  $R_c > 5000 \text{ m}$
- Καμπύλες μεγάλης ακτίνας  $1000 \text{ m} < R_c < 5000 \text{ m}$
- Καμπύλες μέσης ακτίνας  $500 \text{ m} < R_c < 1000 \text{ m}$
- Καμπύλες μικρής ακτίνας  $300 \text{ m} < R_c < 500 \text{ m}$
- Καμπύλες πολύ μικρής ακτίνας  $R_c < 300 \text{ m}$ .

- Ο διαχωρισμός αυτός, χωρίς να είναι απόλυτος, οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές συνθήκες κύλισης που παρουσιάζουν τα συμβατικά φορεία κατά την εγγραφή τους στις παραπάνω πέντε κατηγορίες καμπυλών.
- Η επιλογή των ακτινών καμπυλότητας αποτελεί βασική παράμετρο για τη σωστή λειτουργία και εκμετάλλευση ενός σιδηροδρομικού δικτύου.
- Όσο μικρότερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας, τόσο μεγαλύτερα και περισσότερα είναι τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά τη διέλευση των συρμών.

### 5.3.2. Υπερύψωση Γραμμής

- Όταν ένα σιδηροδρομικό όχημα μάζας  $m$  κινείται με ταχύτητα  $V$  σε μία στροφή ακτίνας καμπυλότητας  $R$  υπόκειται στην επίδραση φυγόκεντρης δύναμης  $F$ , η οποία το ωθεί προς το εξωτερικό της καμπύλης.
- Η δύναμη αυτή εφαρμόζεται στο κέντρο βάρους του οχήματος και είναι ίση με:

$$F = \frac{m \cdot V^2}{R}$$

- Η επιλογή των ακτινών καμπυλότητας πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τους παρακάτω παράγοντες:
  - Την τοπογραφία του εδάφους σε συνδυασμό με την υπάρχουσα χρηματοδότηση.
  - Τις ταχύτητες διέλευσης του ταχύτερου και του αργότερου συρμού που προβλέπεται να κυκλοφορήσουν στη γραμμή.
  - Τις κατηγορίες των κυκλοφορουσών αμαξοστοιχιών (επιβατικές, εμπορικές, κλπ.), καθώς επίσης και την ποσοστιαία αναλογία τους.
  - Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του επιλεγέντος τροχαίου υλικού και της επιδομής.
  - Τη συμπεριφορά του ανθρωπίνου σώματος στις εγκάρσιες επιταχύνσεις.
  - Τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ενδεχόμενης χάραξης.

- Για να περιορίσουμε τις εγκάρσιες δυνάμεις που ασκεί το όχημα (μέσω των τροχών) στις εξωτερικές σιδηροτροχιές, πρέπει να υπερυψώσουμε την εξωτερική πλευρά (σιδηροτροχιά) σε σχέση με την εσωτερική, όπως αντίστοιχα κάνουμε και στην οδοποιία.
- Η διαφορά του ύψους των δύο σιδηροτροχιών ονομάζεται "υπερύψωση γραμμής".
- Συμβολίζεται με το γράμμα  $h$  και εκφράζεται σε  $mm$ .
- Η υπερύψωση κατά κανόνα δίδεται μέσω μόνο της εξωτερικής σιδηροτροχιάς και είναι απαραίτητη για ταχύτητες κυκλοφορίας περίπου  $V > 40 \text{ km/h}$ .

#### Σχέσεις μεταξύ καμπυλότητας, ταχύτητας διέλευσης και υπερύψωσης.

Η ακτίνα καμπυλότητας  $R$ , οι ταχύτητες διέλευσης  $V$  των συρμών και η υπερύψωση  $h$  της γραμμής, συνδέονται, με απλές μαθηματικές σχέσεις.

Οι σχέσεις αυτές επιτρέπουν να επιλεγεί η κατάλληλη ακτίνα καμπυλότητας  $R$  στην οριζοντιογραφία, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται, για τις επιθυμητές ταχύτητες, η εγκάρσια δυναμική άνεση των επιβατών και η ομαλή διέλευση των συρμών.

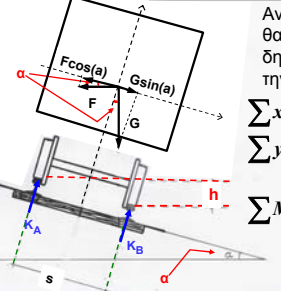
#### 5.3.2.1. Θεωρητική Υπερύψωση

Θεωρητική υπερύψωση  $h_0$  είναι η υπερύψωση που πρέπει να δοθεί στην εξωτερική σιδηροτροχιά για να εξισορροπηθεί πλήρως η αναπτυσσόμενη φυγόκεντρη δύναμη.

Το μέγεθος της υπερύψωσης εξαρτάται από το εύρος της γραμμής και από την γωνία της εγκάρσιας κλίσης.

Από την εξισορρόπηση δυνάμεων προκύπτει:

**5.3.2.1.α. Θεωρητική υπερέυωση για πλήρη εξισορρόπηση της φυγόκεντρης δύναμης**



Αν υποθέσουμε ότι η υπερέυωση h θα εξουδετέρωνε πλήρως την δημιουργούμενη φυγόκεντρο τότε από την ισορροπία του οχήματος έχουμε:

$$\sum x = 0 \Rightarrow G \cdot \sin(\alpha) = F \cdot \cos(\alpha)$$

$$\sum y = 0 \Rightarrow G \cdot \cos(\alpha) + F \cdot \sin(\alpha) = K_A + K_B$$

$$\sum M : 0 = 0 \Rightarrow K_A \cdot \frac{s}{2} = K_B \cdot \frac{s}{2} \Rightarrow K_A = K_B$$

Επειδή η γωνία α είναι πολύ μικρή, έχουμε  $\cos(\alpha) \approx 1$   
 Το ημίτονο της γωνίας εκφράζεται ως:  $\sin(\alpha) = \frac{h}{s}$   
 Οπότε αντικαθιστώντας στις σχέσεις ισορροπίας έχουμε:  
 G είναι το βάρος του οχήματος

$$\begin{cases} G \cdot \frac{h}{s} = F \\ G + F \cdot \frac{h}{s} = K_A + K_B \\ K_A = K_B \end{cases}$$

**5.3.2.1.β ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΑΧΕΩΣ ΣΥΡΜΟΥ – περίσσεια εγκάρσια επιτάχυνση / μη εξισορροπούμενη φυγόκεντρος επιτάχυνση**

Στην περίπτωση που ένας συρμός κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα ισορροπίας, η συνιστώσα της φυγόκεντρης  $F \cdot \cos(\alpha) \approx F$  είναι μεγαλύτερη από την συνιστώσα του βάρους  $G \cdot \sin(\alpha)$

$$F - G \cdot \sin(\alpha) = \frac{m \cdot V^2}{R} - m \cdot g \cdot \frac{h}{s} = m \cdot \left( \frac{V^2}{R} - g \cdot \frac{h}{s} \right) = m \cdot b$$

$$b = \left( \frac{V^2}{R} - g \cdot \frac{h}{s} \right)$$

Ονομάζεται **περίσσεια εγκάρσια επιτάχυνση ή μη εξισορροπούμενη φυγόκεντρος επιτάχυνση**

Αντικαθιστώντας τις G και F, στην σχέση  $G \cdot \frac{h}{s} = F$  έχουμε:

$$G \cdot \frac{h}{s} = F \Rightarrow m \cdot g \cdot \frac{h}{s} = m \cdot \frac{V^2}{R} \Rightarrow h_\theta = \frac{s \cdot V^2}{R \cdot g}$$

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

**Θεωρητική υπερέυωση**

$$h_\theta (\text{mm}) = 11,8 \cdot \frac{V^2 (\text{km/h})}{R (\text{m})}$$

Το γινόμενο  $m \cdot b = F - G \cdot \sin(\alpha)$  είναι η φυγόκεντρος δύναμη που δεν εξισορροπείται από την υπερέυωση. Η δύναμη αυτή εξισορροπείται από μια δύναμη που ασκείται από την εξωτερική σιδηροτροχιά στο όνυχα του τροχού λόγω δράσης – αντίδρασης.

Επομένως στην περίπτωση ταχέως συρμού θα ισχύει η σχέση:

$$F = G \cdot \sin(\alpha) + m \cdot b \Rightarrow \frac{m \cdot V^2}{R} = m \cdot g \cdot \frac{h}{s} + m \cdot b \Rightarrow g \cdot \frac{h}{s} = \frac{V^2}{R} - b \Rightarrow h = \frac{V^2 \cdot s}{R \cdot g} - b \cdot \frac{s}{g}$$

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

$$h(\text{mm}) = 11,8 \cdot \frac{V^2 (\text{km/h})}{R(\text{m})} - 152 \cdot b (\text{m/sec}^2)$$

Σε μία στροφή δεδομένης ακτίνας καμπυλότητας R, για διαφορετικές ταχύτητες διέλευσης αντιστοιχούν και διαφορετικές τιμές θεωρητικής υπερέυωσης.

Δεδομένου ότι, σχεδόν πάντοτε, σε ένα μη αστικό σιδηροδρομικό δίκτυο δρομολογούνται αμαξοστοιχίες με διαφορετικά κινηματικά χαρακτηριστικά, η επιλογή της τιμής υπερέυωσης δεν είναι προφανής.

Στην κατάσταση ισορροπίας  $K_A = K_B$ . Το γεγονός αυτό δείχνει ότι οι σιδηροτροχιές καταπονούνται το ίδιο σε μια καμπύλη. Αυτό ισχύει μόνο στην περίπτωση που η υπερέυωση εξουδετερώνει πλήρως την φυγόκεντρο δύναμη. Αυτό ισχύει μόνο όταν ο συρμός κινείται με την **ταχύτητα ισορροπίας**.

Στην πράξη επομένως διακρίνουμε δύο περιπτώσεις ανάλογα με το εάν ο συρμός κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη ή μικρότερη από την ταχύτητα ισορροπίας.

**5.3.2.1.β Περίπτωση βραδέως συρμού – έλλειμμα εγκάρσιας επιτάχυνσης**

Επειδή ο συρμός κινείται με ταχύτητα μικρότερη της ταχύτητας ισορροπίας, η φυγόκεντρος δύναμη εξισορροπείται από ένα μόνο μέρος της υπάρχουσας υπερέυωσης, και επομένως ισχύει:

$$h_\theta = \frac{11,8V^2}{R} < \frac{11,8V_{ισορ}^2}{R} = h$$

Έτσι προκύπτει ένα πλεόνασμα υπερέυωσης  $\pi = h - h_\theta$ . Λόγω αυτού του πλεονάσματος, η συνιστώσα του βάρους  $G \cdot \sin(\alpha)$  είναι μεγαλύτερη από την φυγόκεντρο F.

Έτσι εμφανίζεται ένα **έλλειμμα εγκάρσιας επιτάχυνσης C**

$$G \cdot \sin(\alpha) - F = m \cdot g \cdot \frac{h}{s} - \frac{m \cdot V^2}{R} = m \cdot \left( g \cdot \frac{h}{s} - \frac{V^2}{R} \right) = m \cdot C$$

Η εξισορρόπηση της δύναμης  $G \cdot \sin(\alpha) - F$  γίνεται με μία δύναμη που ασκείται από την εσωτερική σιδηροτροχιά στο όνυχα του τροχού λόγω δράσης – αντίδρασης.

### 5.3.2.2 Κανονική Υπερύψωση

- Εάν η επιλογή της υπερύψωσης της γραμμής γίνει με βάση τη θεωρητική υπερύψωση που αντιστοιχεί στα πιο γρήγορα τρένα ( $h_{0vmax}$ ), τότε για τα αργά τρένα η υπερύψωση αυτή θα είναι υπερβολική. Οι όνυχες των εσωτερικών τροχών θα έρχονται σε επαφή με τις εσωτερικές παρειές των εσωτερικών σιδηροτροχιών με όλες τις δυσμενείς συνέπειες.
- Εάν η επιλογή της υπερύψωσης της γραμμής γίνει με βάση τη θεωρητική υπερύψωση που αντιστοιχεί στα πιο αργά τρένα ( $h_{0vmin}$ ), τότε για τα γρήγορα τρένα η υπερύψωση θα είναι ανεπαρκής. Οι όνυχες των εξωτερικών τροχών θα έρχονται σε επαφή με τις εσωτερικές παρειές των εξωτερικών σιδηροτροχιών.

### 5.3.2.3 Ανεπάρκεια Υπερύψωσης

Η υιοθέτηση της κανονικής υπερύψωσης έχει ως συνέπεια για μεν τα γρήγορα τρένα να υπάρχει μια **ανεπάρκεια** υπερύψωσης, ενώ για τα αργά τρένα ένα **πλεόνασμα** υπερύψωσης.

Η διαφορά μεταξύ της θεωρητικής υπερύψωσης για τη μέγιστη ταχύτητα και της κανονικής υπερύψωσης ονομάζεται **ανεπάρκεια** υπερύψωσης  $a$ .

$$a = h_{\theta}(V_{max}) - h$$

- Επιπλέον, όλες οι αμαξοστοιχίες δεν αποκλείεται κάποια στιγμή να σταματήσουν μέσα στην καμπύλη.
- Στην περίπτωση αυτή, μια σχετικά μεγάλη τιμή υπερύψωσης θα αύξανε τον κίνδυνο ανατροπής των οχημάτων και θα δημιουργούσε προβλήματα στην εκκίνηση των συρμών.
- Συνεπώς θα πρέπει να επιλεγεί μια ενδιάμεση τιμή υπερύψωσης η οποία θα εξασφαλίζει για όλα τα τρένα που κινούνται στη γραμμή:
  - Ασφαλή κυκλοφορία.
  - Δυνατότητα παραμονής και εκκίνησης στις καμπύλες.
  - Ικανοποιητική εγκάρσια δυναμική άνεση των επιβατών.
  - Καταπόνηση της επιδομής και του τροχαίου υλικού σε ανεκτά επίπεδα.

### 5.3.2.4 Πλεόνασμα Υπερύψωσης

Η διαφορά μεταξύ της κανονικής υπερύψωσης και της θεωρητικής υπερύψωσης για την ελάχιστη ταχύτητα ονομάζεται **πλεόνασμα** υπερύψωσης  $\pi$ :

$$\pi = h - h_{\theta}(V_{min})$$

### 5.3.2.5 Μεταβολή εφαρμοζόμενης Υπερύψωσης

Για την ομαλή κίνηση των τρένων η μεταβολή της εφαρμοζόμενης υπερύψωσης  $h$  θα πρέπει να γίνεται βαθμιαία από την μηδενική τιμή στο πέρας της ευθυγραμμίας στην τιμή  $h$  στην αρχή του κυκλικού τόξου.

Για να επιτευχθεί αυτό θα πρέπει το **πρανές υπερύψωσης** και το **τόξο συναρμογής** να συμπίπτουν.

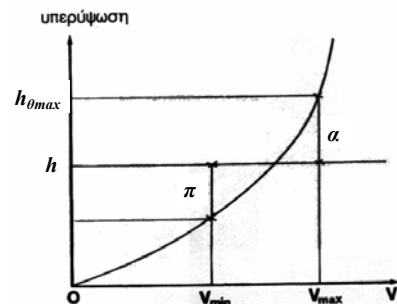
Η ενδιάμεση αυτή τιμή ονομάζεται **κανονική υπερύψωση** ή πραγματική υπερύψωση ή απλώς υπερύψωση γραμμής  $h$  και ουσιαστικά εκφράζει την επί τόπου μετρούμενη υπερύψωση μιας συγκεκριμένης καμπύλης.

Η κανονική υπερύψωση είναι πάντοτε μικρότερη από τη θεωρητική υπερύψωση που αντιστοιχεί στα πιο γρήγορα τρένα.

$$h_{\theta}(V_{min}) < h < h_{\theta}(V_{max})$$

Η κανονική τιμή της υπερύψωσης, υπολογίζεται από την σχέση:

$$h \text{ (mm)} = 7,12 \cdot \frac{V^2 \text{ (km/h)}}{R \text{ (m)}}$$



Σχηματική παράσταση θεωρητικών υπερψώσεων ( $h_{\theta max}$ ,  $h_{\theta min}$ ), κανονικής υπερψώσης  $h$ , ανεπάρκειας υπερψώσης  $a$ , πλεονάσματος υπερψώσης  $\pi$

### 5.3.3. Χαρακτηριστικά στοιχεία στις καμπύλες

και

#### Οριακές τιμές

4) Οριακή τιμή της **μεταβολής της εφαρμοζόμενης υπερυψώσεως  $h$** , στις παραβολικές συναρμογές, ανά μονάδα μήκους.

Η μεταβολή της εφαρμοζόμενης υπερύψωσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$i = h/l$$

Η οριακή τιμή, που ισοδυναμεί με την μέγιστη ανεκτή κλίση  $i$  του πρανούς υπερυψώσεως, ορίζεται σαν συνάρτηση της ταχύτητας, από την σχέση:

$$i = \frac{144}{V_{max}} \quad (\text{σε } \chi\lambda\sigma\tau / \mu) \quad V_{max} \text{ σε } \chi\lambda\mu/\omega\rho\alpha$$

Αυτή η οριακή τιμή έχει προκύψει με την παραδοχή ότι ο μέγιστος ρυθμός αύξησης της υπερύψωσης είναι  $r=40\text{mm/sec}$  και μπορεί να αυξηθεί και μέχρι την τιμή που προκύπτει για  $r=60\text{mm/sec}$  δηλ.

$$i = \frac{216}{V_{max}} \quad (\text{σε } \chi\lambda\sigma\tau / \mu)$$

με ανώτατο όριο  $i_{max} = 2,5 \chi\lambda\sigma\tau/\mu$ .

#### 5.3.3.1. Χαρακτηριστικά στοιχεία στις καμπύλες

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία στις καμπύλες είναι:

- Η εφαρμοζόμενη υπερύψωση
- Η ανεπάρκεια της υπερύψωσης
- Το πλεόνασμα της υπερύψωσης
- Η μεταβολή της εφαρμοζόμενης υπερύψωσης
- Η μεταβολή της ανεπάρκειας της υπερύψωσης

Για κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία έχουν θεσπισθεί οριακές τιμές (ΦΕΚ 1156/2000). Ο συσχετισμός των οριακών αυτών τιμών οδηγεί, για κάθε ακτίνα καμπύλης και για κάθε συνδυασμό μέγιστης και ελάχιστης ταχύτητας, σε ορισμένο περιθώριο, μέσα στο οποίο πρέπει να εκλεγεί η υπερύψωση, που θα εφαρμοσθεί.

Από την τελική αυτή υπερύψωση θα προκύψει στην συνέχεια ένα ελάχιστο μήκος παραβολικής συναρμογής, που θα πρέπει να τηρηθεί

5) Οριακή τιμή της **μεταβολής της ανεπάρκειας της εφαρμοζόμενης υπερυψώσεως**, στις παραβολικές συναρμογές, ανά μονάδα χρόνου.

$$\mu = 60 \chi\lambda\sigma\tau / \delta\lambda$$

#### 5.3.3.2. Οριακές τιμές των χαρακτηριστικών στοιχείων στις καμπύλες

1) Οριακή τιμή της **υπερυψώσεως**

$$h_{max} = 160 \text{ mm}$$

2) Οριακή τιμή της **ανεπάρκειας α της υπερυψώσεως**

$$a_{max} = 105 \text{ mm}$$

3) Οριακή τιμή **πλεονάσματος π της υπερύψωσης**

$$\pi_{max} = 100 \text{ mm}$$

#### 5.3.3.3. Συνδυασμοί μέγιστων και ελάχιστων ταχυτήτων για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών στοιχείων στις καμπύλες

Για τον προσδιορισμό της υπερυψώσεως  $h$ , καθώς και του μήκους της παραβολικής συναρμογής  $L$ , που θα εφαρμοσθούν, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συνδυασμοί μέγιστων και ελάχιστων ταχυτήτων  $V$

$V_{max}$  για τις επιβατικές αμαξοστοιχίες και  $V_{min}$  για τις εμπορικές

$$\text{A.} \quad V_{max} \leq 100 \chi\lambda\mu / \omega\rho \quad V_{min} = 60 \chi\lambda\mu / \omega\rho$$

$$\text{B.} \quad 100 < V_{max} \leq 140 \chi\lambda\mu / \omega\rho \quad V_{min} = 70 \chi\lambda\mu / \omega\rho$$

$$\text{Γ.} \quad 140 < V_{max} \leq 200 \chi\lambda\mu / \omega\rho \quad V_{min} = 80 \chi\lambda\mu / \omega\rho$$

### 5.3.3.4 Μένιστες επιτρεπόμενες ταχύτητες στις καμπύλες, συναρτήσει της ακτίνας R της καμπύλης

### 5.3.3.5 Υπερυψώσεις

#### 5.3.3.5.α Κανονική Υπερύψωση

Η κανονική υπερύψωση που θα εφαρμοσθεί υπολογίζεται από τον τύπο:

$$h = \frac{h_{\max}}{h_{\max} + a_{\max}} \cdot \frac{11,8 \cdot V^2}{R} = \frac{160}{160 + 105} \cdot \frac{11,8 \cdot V^2}{R} = \frac{7,12 \cdot V^2}{R}$$

$$\Rightarrow h = \frac{7,12 \cdot V^2}{R}$$

- V η μέγιστη εφαρμοζόμενη ταχύτητα σε χλμ/ώρα
- R η ακτίνα της καμπύλης σε μ
- h η υπερύψωση σε χλστ.

### 5.3.3.4.α Μένιστες επιτρεπόμενες ταχύτητες στις καμπύλες, συναρτήσει της ακτίνας R της καμπύλης

Η μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα συναρτήσει της ακτίνας R των κυκλικών καμπυλών, εφόσον δεν υπάρχουν άλλοι περιορισμοί, λόγω κατά μήκος κλίσεως της γραμμής, κλίσεως του πρσανούς υπερύψωσης κλπ θα υπολογίζεται από τον τύπο

Για τους συνδυασμούς A και B μέγιστων και ελαχίστων ταχυτήτων, και για συνδυασμό Γ εφόσον R < 1250

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{265R}{11,8}} = 4,74\sqrt{R}$$

Για συνδυασμό Γ μέγιστων και ελαχίστων ταχυτήτων εφόσον R > 1250

$$V_{\max} = \sqrt{\frac{205R}{11,8} + 80^2}$$

Vmax (χλμ/ωρ) και R (μ.)

Η ελάχιστη τιμή της υπερύψωσης δεν θα πρέπει να προκαλεί μη εξισορροπούμενη φυγόκεντρο επιτάχυνση μεγαλύτερη από **b = 0,7 m/sec<sup>2</sup>**

$$h_{\min} (mm) = 11,8 \cdot \frac{V^2 (km/h)}{R(m)} - 152 \cdot b (m/sec^2)$$

Μέγιστη τιμή του b = 0,7m/sec<sup>2</sup>

### 5.3.3.4.β. Ελάχιστες ακτίνες συναρτήσει της μέγιστης ταχύτητας

Από επίλυση των παραπάνω εξισώσεων προκύπτουν οι ελάχιστες ακτίνες συναρτήσει της μέγιστης ταχύτητας

Για τους συνδυασμούς A και B μέγιστων και ελαχίστων ταχυτήτων, και για συνδυασμό Γ εφόσον Vmax < 170 χλμ/ωρ

$$R_{\min} = \frac{11,8 \cdot V_{\max}^2}{265} = 0,0445 \cdot V_{\max}^2$$

Για συνδυασμό Γ μέγιστων και ελαχίστων ταχυτήτων εφόσον 170 < Vmax < 200 χλμ/ώρα

$$R_{\min} = \frac{11,8}{265} \cdot (V_{\max}^2 - 80^2)$$

Vmax (χλμ/ωρ) και R (μ.)

### 5.3.3.5.β Ανεπάρκεια και πλεόνασμα υπερύψωσης

Στην περίπτωση αυτή η ανεπάρκεια υπερύψωσης α δίνεται από τον τύπο:

$$a = \frac{105}{265} \cdot \frac{11,8 \cdot V^2}{R} = \frac{4,68 \cdot V^2}{R}$$

και το πλεόνασμα υπερύψωσης α δίνεται από τον τύπο:

$$\pi = \frac{160}{265} \cdot \frac{11,8 \cdot V^2}{R} - \frac{11,8 \cdot V_{\min}^2}{R} = \frac{11,8}{R} \cdot (0,60 \cdot V^2 - V_{\min}^2)$$

όπου Vmin η τιμή που προκύπτει από τον καθορισμένο συνδυασμό μεγίστων – ελαχίστων ταχυτήτων

**5.3.3.5.v Μέγιστη επιτρεπόμενη υπερύψωση και ταχύτητα**

Η **μέγιστη επιτρεπόμενη ταχύτητα Vmax** για μια καμπύλη με ακτίνα R, συναρτήσει μόνο της υπερυψώσεως, δίνεται από τον τύπο :

$$V_{max} = 0,375\sqrt{R \cdot h}$$

Η **μέγιστη επιτρεπόμενη υπερύψωση** είναι:

$$h_{max} = 160 \text{ χλστ}$$

Οι εφαρμοζόμενες υπερυψώσεις στοργγυλεύονται στα 5χλστ.

Στις κύριες γραμμές μέσα σε σταθμούς, η εφαρμοζόμενη υπερύψωση δεν επιτρέπεται να υπερβαίνει την τιμή **h = 100 χλστ**

Τόξο συναρμογής πρέπει να παρεμβάλλεται και μεταξύ δύο ομόστροφων καμπυλών (με ακτίνες R1 και R2) για να εξασφαλιστεί και η βαθμιαία και ομαλή μεταβολή της ακτίνας καμπυλότητας από R1 σε R2

Η καμπύλη συναρμογής, που εφαρμόζεται στην σιδηροδρομική είναι η κυβική παραβολή της μορφής

$$y = K \cdot x^3$$

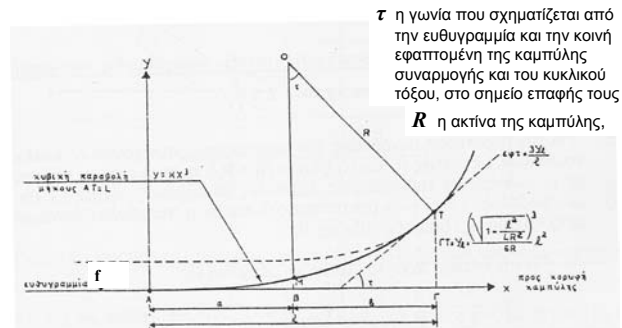
**5.3.4 Οριζόντιες συναρμογές**

**5.3.4.2 Τόξο συναρμογής μεταξύ ευθείας και κυκλικής καμπύλης**

Για την περίπτωση ευθυγραμμίας και κυκλικής καμπύλης, ο σταθερός συντελεστής K δίνεται από τον τύπο :

$$K = \frac{1}{6 \cdot l \cdot R \cdot [\cos(\tau)]^3}$$

όπου  $l$  η προβολή σε ευθυγραμμία του μήκους L της καμπύλης συναρμογής L



$\tau$  η γωνία που σχηματίζεται από την ευθυγραμμία και την κοινή εφαπτομένη της καμπύλης συναρμογής και του κυκλικού τόξου, στο σημείο επαφής τους  
R η ακτίνα της καμπύλης,

**5.3.4.1 Τόξο συναρμογής**

Η καμπυλότητα  $\rho$  ορίζεται σαν το αντίστροφο της ακτίνας μιας καμπύλης R:

$$\rho = \frac{1}{R}$$

Μεταξύ ευθυγραμμίας όπου  $R = \infty \Rightarrow \rho = 0$

και μιας καμπύλης, δημιουργείται μια απότομη μεταβολή της καμπυλότητας από το 0 στο  $1/R$

Αυτή η απότομη μεταβολή καμπυλότητας γίνεται αισθητή στον επιβάτη σαν ένα τινάγμα.

Για την ομαλή μετάβαση από την ευθυγραμμία στην καμπύλη παρεμβάλλεται τόξο συναρμογής μεταβλητής ακτίνας, του οποίου η καμπυλότητα είναι μηδενική στην αρχή και  $1/R$  στο τέλος

Οπότε η εξίσωση του τόξου συναρμογής γίνεται:

$$K = \frac{1}{6 \cdot l \cdot R \cdot [\cos(\tau)]^3} \left\{ \begin{array}{l} y = K \cdot x^3 \\ \Rightarrow y = \frac{X^3}{6 \cdot l \cdot R \cdot [\cos(\tau)]^3} \end{array} \right\} \Rightarrow \cos(\tau) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{l}{2 \cdot R}\right)^2}}$$

Το μήκος L της κυβικής παραβολής και η προβολή l συνδέονται με τις σχέσεις:

$$L = l + \frac{l}{10} \cdot \left(\frac{l}{2 \cdot R}\right)^2$$

$$l = L - \frac{L}{10} \cdot \left(\frac{L}{2 \cdot R}\right)^2$$

$$\Rightarrow y = \frac{X^3}{6 \cdot l \cdot R} \cdot \left[1 + \left(\frac{l}{2 \cdot R}\right)^2\right]^{3/2}$$

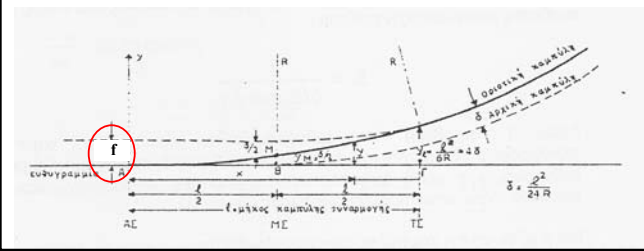


### 5.3.4.2.α. Τόξο συναρμογής μικρότερο από R/3,5

Στις περιπτώσεις που το μήκος του τόξου συναρμογής είναι επιτρεπόμενο να εφαρμόζεται ο απλοποιημένος τύπος της κυβικής παραβολής  $y \leq \frac{x^3}{6LR}$

όπου δεχόμαστε  $L = l$

$$L \leq \frac{R}{3,5}$$



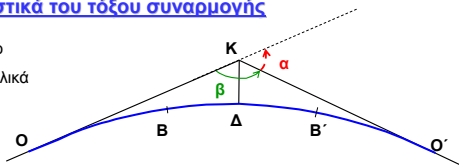
### 5.3.4.4 Τόξο συναρμογής μεταξύ δύο ομόστροφων καμπυλών με επαρκή ενδιάμεση ευθυγραμμία

Στην περίπτωση σύνδεσης δύο ομόστροφων κυκλικών καμπυλών με ακτίνες  $R_1$  και  $R_2$  (όπου  $R_1 > R_2$ ) παρεμβάλλονται από μία καμπύλη συναρμογής προς κάθε καμπύλη και ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα μήκους τουλάχιστον 30μ.

Θεωρώντας ότι τα τόξα συναρμογής με τις εκατέρωθεν ευθυγραμμίες, έχουν μήκη  $L_1$  και  $L_2$  με προβολές  $l_1$  και  $l_2$  και μεταπτώσεις  $\delta_1$  και  $\delta_2$ , η παραβολική συναρμογή ορίζεται από μια σειρά εξισώσεων:

### 5.3.4.3. Χαρακτηριστικά του τόξου συναρμογής

**ΒΔΒ'** : το κυκλικό τόξο  
**ΟΒ, Ο'Β'** : τα παραβολικά τόξα συναρμογής



Η μετατόπιση  $f$  που προκαλεί η κυβική παραβολή μεταξύ του κυκλικού τόξου και της ευθυγραμμίας υπολογίζεται από την σχέση:  $f = \frac{l^2}{24 \cdot R}$

Το μήκος από την κορυφή της πολυγωνικής μέχρι την αρχή του τόξου συναρμογής προκύπτει από την σχέση:

$$OK = (R + f) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{l}{2} = 434,2 \text{ m}$$

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = \frac{l_2^2}{24R_2} - \frac{l_1^2}{24R_1}$$

$$\rho = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 - R_2}$$

$$l = \sqrt{24 \cdot \rho \cdot \delta}$$

Για την πλευρά προς την καμπύλη με ακτίνα R1

$$y = \frac{X^2}{2R_1} + \frac{\delta}{2} - \frac{1}{6 \cdot l \cdot \rho} \left[ \left(\frac{l}{2}\right)^3 - \left(\frac{l}{2} - x\right)^3 \right]$$

Για την πλευρά προς την καμπύλη με ακτίνα R2

$$y = \frac{X^2}{2R_2} + \frac{\delta}{2} - \frac{1}{6 \cdot l \cdot \rho} \left[ \left(\frac{l}{2}\right)^3 - \left(\frac{l}{2} - x\right)^3 \right]$$

το μήκος ΚΔ υπολογίζεται από την σχέση:

$$ΚΔ = (R + f) \cdot \left[ \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1 \right] + f = 65,03 \text{ m}$$

Όπου:  $\sec\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1}{\cos(\alpha/2)}$

Αν  $L$  είναι το μήκος του τόξου συναρμογής και  $l$  η προβολή του στην ευθυγραμμία, τότε η ελάχιστη τιμή του τόξου συναρμογής θα είναι:

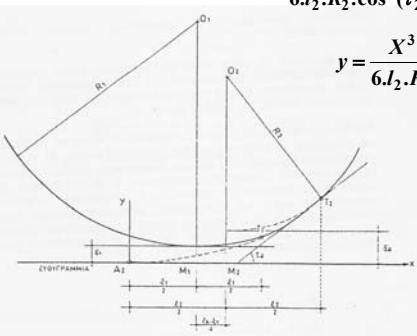
$$l_{\min} (m) = \frac{h(mm) \cdot V (km/h)}{144}$$

### 5.3.4.5 Τόξο συναρμογής μεταξύ δύο ομόστροφων καμπυλών με μικρή ενδιάμεση ευθυγραμμία

Στην περίπτωση σύνδεσης δύο ομόστροφων κυκλικών καμπυλών με ακτίνες  $R_1$  και  $R_2$  (όπου  $R_1 > R_2$ ) που μεταξύ τους μεσολαβεί μια μικρή ευθυγραμμία, της οποίας το μήκος δεν είναι αρκετό για να τοποθετηθεί στην κάθε καμπύλη κανονική παραβολική συναρμογή και να παραμείνει το απαιτούμενο ευθύγραμμο τμήμα (μήκους 30μ), η σύνδεση γίνεται με ενιαία παραβολική συναρμογή T1 - T2 (όπως φαίνεται στο ακόλουθο τμήμα) χωρίς μεσολάβηση ευθύγραμμου τμήματος. Οι συντεταγμένες της ενιαίας συναρμογής δίνονται από την εξίσωση:

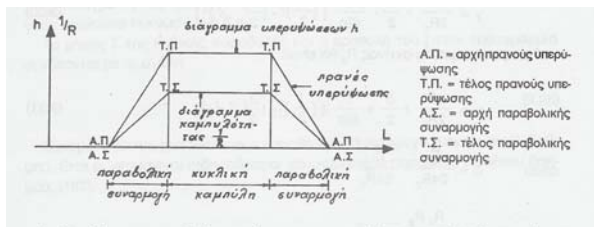
$$y = \frac{X^3}{6 \cdot l_2 \cdot R_2 \cdot \cos^3(\tau_2)} \quad \text{εφόσον} \quad L > \frac{R_2}{3,5}$$

$$y = \frac{X^3}{6 \cdot l_2 \cdot R_2} \quad \text{εφόσον} \quad L \leq \frac{R_2}{3,5}$$



### Πρανές Υπερύψωσης

Το πρανές υπερύψωσης και η κυβική παραβολή συναρμογής θα πρέπει να συμπίπτουν, οπότε το διάγραμμα υπερύψωσης που προκύπτει έχει την ακόλουθη μορφή:



Διάγραμμα μεταβολής υπερύψωσης και καμπυλότητας μεταξύ ευθυγραμμίας και κυκλικής καμπύλης

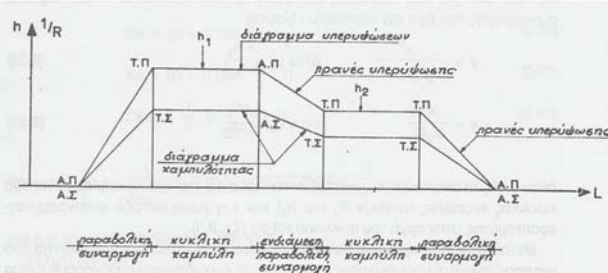
### 5.3.4.6 Τόξο Συναρμογής μεταξύ δύο αντίστροφων καμπυλών

Μεταξύ δύο αντίστροφων κυκλικών καμπυλών της κύριας γραμμής πρέπει οπωσδήποτε να μεσολαβεί ένα ευθύγραμμο τμήμα αρκετά μεγάλο, ώστε να μπορούν να παρεμβληθούν από μια παραβολική συναρμογή προς κάθε κυκλική καμπύλη.

Μεταξύ των δύο αυτών συναρμογών πρέπει να παραμείνει ευθύγραμμο τμήμα, ελάχιστου μήκους 30μ., στο οποίο δεν συμπεριλαμβάνονται οι στρογγυλεύσεις στις άκρες των συναρμογών.

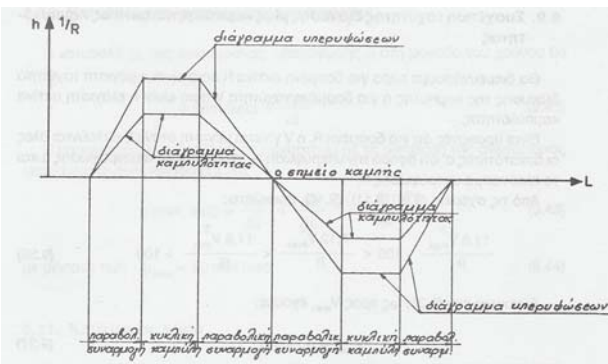
Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατή η παρεμβολή του ελαχίστου ευθύγραμμου τμήματος, θα πρέπει το τμήμα αυτό να παραλείπεται και οι δύο συναρμογές να έχουν κοινή αρχή, κοινή εφαπτομένη και την ίδια μεταβολή καμπυλότητας.

Αντίστοιχη γραμμική μεταβολή πρέπει να γίνεται μεταξύ ομόστροφων κυκλικών καμπυλών και αντίστροφων καμπυλών όπως φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα



Διάγραμμα μεταβολής υπερύψωσης και καμπυλότητας μεταξύ δύο διαδοχικών ομόστροφων καμπυλών

### 5.3.5. Το Πρανές Υπερύψωσης



Διάγραμμα μεταβολής υπερύψωσης και καμπυλότητας μεταξύ δύο διαδοχικών αντίστροφων καμπυλών

Οριακή τιμή της **μεταβολής της εφαρμοζόμενης υπερυψώσεως h**, στις παραβολικές συναρμογές, ανά μονάδα μήκους

Η οριακή τιμή, που ισοδυναμεί με την μέγιστη ανεκτή κλίση  $i$  του πρηνούς υπερυψώσεως, ορίζεται σαν συνάρτηση της ταχύτητας, από την σχέση:

$$i = \frac{144}{V_{max}} \quad (\text{σε } \chi\lambda\sigma\tau / \mu) \quad V_{max} \text{ σε } \chi\lambda\mu/\omega\rho\alpha$$

Αυτή η οριακή τιμή έχει προκύψει με την παραδοχή ότι ο μέγιστος ρυθμός αύξησης της υπερύψωσης είναι  $r=40\text{mm/sec}$  και μπορεί να αυξηθεί και μέχρι την τιμή που προκύπτει για  $r=60\text{mm/sec}$  δηλ.

$$i = \frac{216}{V_{max}} \quad (\text{σε } \chi\lambda\sigma\tau / \mu)$$

$$\text{με ανώτατο όριο } i_{max} = 2,5 \chi\lambda\sigma\tau/\mu.$$

Τα πρηνή υπερύψωσης θα πρέπει να βρίσκονται έξω από αλλαγές γραμμής και συσκευές διαστολής. Οπου αυτό δεν είναι δυνατό θα πρέπει να επιβάλλεται περιορισμός ταχύτητας.

Η συναρμογή των κλίσεων στην μηκοτομή γίνεται με την παρεμβολή τμήματος κυκλικού τόξου ακτίνας  $r$  που δίδεται από την προσεγγιστική σχέση:

$$r(m) \approx \frac{V^2(km/h)}{2}$$

Που σε εξαιρετικές περιπτώσεις μπορεί να μειωθεί μέχρι την τιμή:

$$r(m) \approx \frac{V^2(km/h)}{4}$$

Οι ελάχιστες ακτίνες συναρμογής σε μηκοτομή σε συνάρτηση με την ταχύτητα δίνονται από τον πίνακα:

	Κανονική τιμή	Κατ'εξίαιρηση μόνο
$V < 100 \text{ km/h}$	5000m	2500 m
$100 \text{ km/h} < V < 150 \text{ km/h}$	10000m	5000 m
$150 \text{ km/h} < V < 200 \text{ km/h}$	20000m	10000 m

### 5.3.6 Η μεταβολή της ανεπάρκειας υπερύψωσης

Η μεταβολή της ανεπάρκειας υπερύψωσης  $\alpha$  στην μονάδα του χρόνου είναι:

$$\mu(mm/sec) = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t}$$

Η παράμετρος  $\mu$  εκφράζεται σε συνάρτηση με τη μεταβολή της ανεπάρκειας υπερύψωσης στην μονάδα του μήκους:

$$\mu(mm/sec) = \frac{\Delta\alpha}{\Delta L} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta L} \cdot \frac{V_{max}(km/h)}{3,6}$$

Με μέγιστη τιμή  $\mu_{max} = 60 \text{ mm/sec}$

Η εφαπτομένη  $E$  του κυκλικού τόξου συναρμογής προκύπτει από την σχέση:

$$E = \Delta i \cdot \frac{r}{2}$$

Οι τεταγμένες του κυκλικού τόξου συναρμογής στην μηκοτομή υπολογίζονται με την σχέση

$$y = \frac{x^2}{2r}$$

### 5.4 Συναρμογή στη μηκοτομή

Η συναρμογή των κλίσεων στην μηκοτομή γίνεται με την παρεμβολή τμήματος κυκλικού τόξου. Η συναρμογή δεν είναι απαραίτητη εφόσον

- η διαφορά των αντίστοιχων κλίσεων (αν είναι ομόρροπες), ή
- Το άθροισμα τους αν είναι αντίρροπες

είναι μικρότερο από 2,5%

- Δεν θα πρέπει να γίνονται αλλαγές κλίσης, εκεί όπου οριζοντιογραφικά υπάρχουν παραβολικές συναρμογές και συνεπώς πρηνή υπερύψωση
- Στην περίπτωση που η ταυτόχρονη συνύπαρξη συναρμογών σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή δεν μπορεί να αποφευχθεί, εφαρμόζεται η μεγαλύτερη δυνατή ακτίνα καμπυλότητας
- Η κατακόρυφη συναρμογή κλίσεων πρέπει να τερματίζεται σε απόσταση τουλάχιστον  $\delta$  m από την αρχή ή το τέλος αλλαγής

## 5.5 Διαπλάτυνσεις σε καμπύλες

- Σε γραμμές με μικρή ακτίνα καμπυλότητας δίνεται διαπλάτυνση με αποτέλεσμα το εύρος της γραμμής να έχει μεγαλύτερη τιμή σε σύγκριση με την ευθυγραμμία.
- Η διαπλάτυνση δίνεται στην εσωτερική σιδηροτροχιά και παίρνει τις τιμές που φαίνονται στον πίνακα

Ακτίνα καμπυλότητας (m)	Διαπλάτυνση (mm)	Εύρος γραμμής (mm)
Ευθυγραμμία και καμπύλες με $R > 400$	0	1 435
$350 < R < 400$	5	1 440
$300 < R < 350$	10	1 445
$250 < R < 300$	15	1 450
$R < 250$	20	1 455

Πίνακας 9.3. Τιμές διαπλάτυνσης για στρωτήρες ξύλινους ή μεταλλικούς (188).

Ακτίνα καμπυλότητας (m)	Διαπλάτυνση (mm)	Εύρος γραμμής (mm)
Ευθυγραμμία και καμπύλες με $R > 600$	0	1 432
$300 < R < 600$	5	1 437

Πίνακας 9.4. Τιμές διαπλάτυνσης για στρωτήρες ξύλινους από σκυρόδεμα (189).

• Η διαπλάτυνση δεν δίδεται μονομιάς αλλά κλιμακώνεται ανά 2,5 μμ.

## ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΚΑΝΟΝΙΚΗΣ ΥΠΕΡΥΨΩΣΗΣ

### Κανονική Υπερύψωση

Η κανονική υπερύψωση ή πραγματική υπερύψωση ή απλώς υπερύψωση γραμμής  $h$  ουσιαστικά εκφράζει την επί τόπου μετρούμενη υπερύψωση μιας συγκεκριμένης καμπύλης.

Η κανονική τιμή της υπερύψωσης, υπολογίζεται από την σχέση (§ 5.3.2.2) :

$$h \text{ (mm)} = 7,12 \cdot \frac{V^2 \text{ (km/h)}}{R \text{ (m)}}$$

Όπου

$V$  η μέγιστη εφαρμοζόμενη ταχύτητα σε χλμ/ώρα

$R$  η ακτίνα της καμπύλης σε μ

$h$  η υπερύψωση σε χλστ.

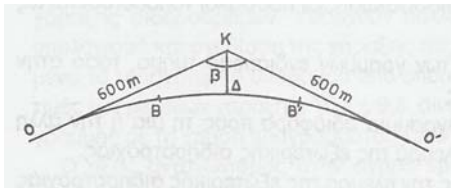
$$\Rightarrow h \text{ (mm)} = 139,5 \text{ mm}$$

Επιλέγουμε  $h = 140 \text{ mm}$

Επαληθεύουμε ότι  $h < h_{\max} = 160 \text{ mm}$

(οριακή τιμή  $h$  στην § 5.3.3.2)

## Παράδειγμα συναρμογής σε οριζοντιογραφία



Στην πολυγωνική ΟΚΟ' με  $\beta=140^\circ$  και  $OK = 600 \mu$ , να μελετηθεί η χάραξη σιδηροδρομικής γραμμής για μέγιστη ταχύτητα 140 km/h

## Επαλήθευση ορίων της μη εξισοροπούμενης φυγόκεντρης επιτάχυνσης

Η ελάχιστη τιμή της υπερύψωσης δεν θα πρέπει να προκαλεί μη εξισοροπούμενη φυγόκεντρο επιτάχυνση μεγαλύτερη από  $b = 0,7 \text{ m/sec}^2$  (§ 5.3.3.5.α)

$$h_{\min} \text{ (mm)} = 11,8 \cdot \frac{V^2 \text{ (km/h)}}{R \text{ (m)}} - 152 \cdot b \text{ (m/sec}^2)$$

Υπολογίζουμε την τιμή της μη εξισοροπούμενης φυγόκεντρης επιτάχυνσης για την τιμή της υπερύψωσης που επιλέξαμε

$$\Rightarrow h_{\min} = 11,8 \cdot \frac{V^2}{R} - 152 \cdot b \Rightarrow 140 = 11,8 \cdot \frac{140^2}{1000} - 152 \cdot b \Rightarrow b = 0,6 \text{ m/sec}^2$$

Επαληθεύουμε ότι  $b = 0,6 \text{ m/sec}^2 < b_{\max} = 0,7 \text{ m/sec}^2$

Επομένως για την επιλεγμένη υπερύψωση (=140mm), η εγκάρσια φυγόκεντρο επιτάχυνση είναι μικρότερη από το ανώτατο όριο που είναι  $0,7 \text{ m/sec}^2$ .

## Υπολογισμός Ελάχιστης ακτίνας συναρτήσει της μέγιστης ταχύτητας

Ο υπολογισμός της ελάχιστης ακτίνας γίνεται εφαρμόζοντας τον κατάλληλο τύπο που αντιστοιχεί στην ταχύτητα μελέτης που για το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι 140 χλμ/ώρα. (ανατρέχουμε στις ενότητες § 5.3.3.3 και § 5.3.3.4.β).

Για τους συνδυασμούς Α και Β μέγιστων και ελαχίστων ταχυτήτων, και για συνδυασμό Γ εφόσον  $V_{\max} < 170 \text{ χλμ/ωρ}$

$$R_{\min} = \frac{11,8 \cdot V_{\max}^2}{265} = 0,0445 \cdot V_{\max}^2$$

Για συνδυασμό Γ μέγιστων και ελαχίστων ταχυτήτων εφόσον  $170 < V_{\max} < 200 \text{ χλμ/ωρ}$

$$R_{\min} = \frac{11,8}{265} \cdot (V_{\max}^2 - 80^2)$$

$V_{\max}$  (χλμ/ωρ) και  $R$  (μ.)

$$R_{\min} = 0,0445 \cdot V_{\max}^2 \Rightarrow R_{\min} = 872,2 \text{ m}$$

Επιλέγουμε  $R = 1000 \text{ m}$

## Υπολογισμός $V_{\min}$ για τον καθορισμό του πλεονάσματος υπερύψωσης

Η ελάχιστη ταχύτητα καθορίζεται από τον πίνακα της § 5.3.3.3.

**Συνδυασμοί μέγιστων και ελαχίστων ταχυτήτων για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών στοιχείων στις καμπύλες**

Για τον προσδιορισμό της υπερυψώσεως  $h$ , καθώς και του μήκους της παραβολικής συναρμογής  $L$ , που θα εφαρμοσθούν, χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συνδυασμοί μέγιστων και ελαχίστων ταχυτήτων  $V$

$V_{\max}$  για τις επιβατικές αμαξοστοιχίες και  $V_{\min}$  για τις εμπορικές

**A.**  $V_{\max} \leq 100 \text{ χλμ/ωρ}$   $V_{\min} = 60 \text{ χλμ/ωρ}$

**B.**  $100 < V_{\max} \leq 140 \text{ χλμ/ωρ}$   $V_{\min} = 70 \text{ χλμ/ωρ}$

**Γ.**  $140 < V_{\max} \leq 200 \text{ χλμ/ωρ}$   $V_{\min} = 80 \text{ χλμ/ωρ}$

Δεδομένου ότι η μέγιστη ταχύτητα είναι 140 χλμ/ώρα, θεωρούμε  $V_{\min} = 70 \text{ χλμ/ώρα}$ .

### Επαλήθευση ορίων ανεπάρκειας και πλεονάσματος υπερύψωσης

Η ανεπάρκεια υπερύψωσης υπολογίζεται ως η διαφορά της μέγιστης θεωρητικής από την εφαρμοζόμενη :

$$a = h_{\theta}(V_{\max}) - h \Rightarrow a = \frac{11,8 \cdot V^2}{R} - 140 = 91,3 \text{ mm}$$

και το πλεόνασμα υπερύψωσης  $\pi$  ως η διαφορά της εφαρμοζόμενης από την ελάχιστη:

$$\pi = h - h_{\theta}(V_{\min}) \Rightarrow 140 - \frac{11,8 \cdot V_{\min}^2}{R} = 82,2 \text{ mm}$$



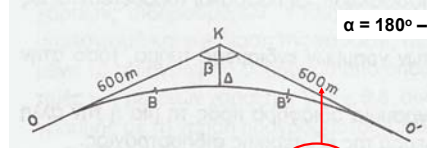
$$a = 91,3 \text{ mm} < a_{\max} = 105 \text{ mm}$$

$$\pi = 82,2 \text{ mm} < \pi_{\max} = 100 \text{ mm}$$

(§ 5.3.3.2)

### Υπολογισμός χαρακτηριστικών κυκλικού τόξου

Υπολογίζουμε τα μήκη OK και ΚΔ (§ 5.3.4.3) έτσι να ελέγξουμε αν η προτεινόμενη χάραξη μπορεί να εγγραφεί στην δοσμένη πολυγωνική.



$$\alpha = 180^\circ - \beta = 180^\circ - 140^\circ = 40^\circ$$

$$OK = (R + f) \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \frac{l}{2} = 434,2 \text{ m} \Rightarrow OK = 434,2 < 600 \mu$$

$$K\Delta = (R + f) \cdot \left[ \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right) - 1 \right] + f = 65,03 \text{ m}$$

$$\sec\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{1}{\cos(\alpha/2)}$$

Η προτεινόμενη χάραξη μπορεί να εγγραφεί στην δοσμένη πολυγωνική. Υπάρχουν περιθώρια για επιλογή πιο πεπλατυσμένης χάραξης, δηλ. μεγαλύτερη ακτίνα και μικρότερη υπερύψωση ώστε το OK να προσεγγίσει περισσότερο τα 600 μ. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με διαδοχικές δοκιμές

### Υπολογισμός μήκους παραβολικής συναρμογής

Το ελάχιστο μήκος  $l_{\min}$  υπολογίζεται από την σχέση (§ 5.3.4.3) :

$$l_{\min} = \frac{h \cdot V}{144} = 136,1 \text{ m}$$



επιλέγουμε  $l_{\min} = 140 \text{ m}$

### Έλεγχος του πρσανούς υπερύψωσης

(§ 5.3.3.2)

$$i = \frac{h}{l} = \frac{140}{140} = 1 \text{ } \chi\lambda\sigma\tau / \mu$$

$$i_{\max} = \frac{144}{V_{\max} (klm/h)} = \frac{144}{140} = 1,02 \text{ } \chi\lambda\sigma\tau / \mu$$

$$i < i_{\max}$$

### Υπολογισμός βέλους/μετατόπισης μεταξύ κυκλικού τόξου και ευθυγραμμίας λόγω παραβολικής συναρμογής

Η μετατόπιση  $f$  υπολογίζεται από την σχέση (§ 5.3.4.3) :

$$f = \frac{l^2}{24 \cdot R} = 0,82 \text{ m}$$

### Υπολογισμός τεταγμένων

$$l = 140 \text{ m} < \frac{R(m)}{3,5} = 285,7 \text{ m} \Rightarrow$$

Οι τεταγμένες της κυβικής παραβολής μπορούν να υπολογισθούν από την σχέση :

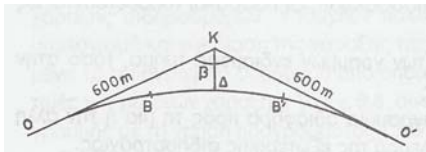
$$y = \frac{x^3}{6 \cdot R \cdot l}$$

$$\text{Εάν } l > \frac{R(m)}{3,5} \Rightarrow$$

Οι τεταγμένες της κυβικής παραβολής θα υπολογίζονται από την σχέση :

$$y = \frac{x^3}{6 \cdot R \cdot l} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{l}{2R} \right)^2 \right]^{3/2}$$

**Υπολογισμός χαρακτηριστικών κυκλικού τόξου σε περίπτωση που η προτεινόμενη χάραξη δεν είναι δυνατό να εγγραφεί στην πολυγωνική**



Εάν η χάραξη που υπολογίσαμε δεν μπορούσε να εγγραφεί στην πολυγωνική  
 Δηλ. εάν το υπολογισθέν τμήμα OK ήταν μεγαλύτερο από αυτό που ορίζεται στην πολυγωνική.  
 Τι θα έπρεπε να κάνουμε ?

**Υπολογισμός χαρακτηριστικών κυκλικού τόξου σε περίπτωση που η προτεινόμενη χάραξη δεν είναι δυνατό να εγγραφεί στην πολυγωνική**

$$OK = (R + f) \cdot \tan(\alpha) + \frac{l}{2}$$

$$f = \frac{l^2}{24 \cdot R}$$

$$l = \frac{7,12 \cdot V}{6,41}$$

$$R_{\min} = 0,0445 \cdot V_{\max}^2$$

Αντικαθιστώντας προκύπτει το μήκος OK σαν συνάρτηση της ταχύτητας (εξίσωση 2ου βαθμού)

$$\Rightarrow OK = \Phi(V)$$

Έστω  $\xi$  το μέγιστο μήκος OK όπως προκύπτει από την πολυγωνική.

Θέτουμε  $\Phi(V) = \xi$  και επιλύουμε ως προς  $V$  που αποτελεί την μέγιστη ταχύτητα.

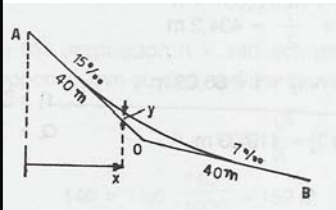
Στην συνέχεια εφαρμόζουμε την διαδικασία που ακολουθήσαμε στη αρχή αυτού του παραδείγματος.

**Υπολογισμός χαρακτηριστικών κυκλικού τόξου σε περίπτωση που η προτεινόμενη χάραξη δεν είναι δυνατό να εγγραφεί στην πολυγωνική**

Θα πρέπει να ελαττώσουμε την ακτίνα της καμπύλης το οποίο συνεπάγεται μείωση της μέγιστης ταχύτητας, έτσι ώστε το υπολογισθέν μήκος AK να είναι μικρότερο από αυτό που ορίζεται από την πολυγωνική

Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εκφράσουμε τα χαρακτηριστικά της καμπύλης συναρμογής σαν συνάρτηση της ταχύτητας, τότε υπολογίζουμε την νέα μέγιστη ταχύτητα και στην συνέχεια ακολουθούμε την ίδια διαδικασία.

**Παράδειγμα συναρμογής σε μηκοτομή**



Η ταχύτητα διάνυσης είναι 150 km./hr

$$\Delta i = i_1 - i_2 = 8\%$$

Επομένως απαιτείται συναρμογή των κλίσεων

Η επιθυμητή ακτίνα συναρμογής είναι

$$r = V^2 / 2 = 11.250m$$

Επιλέγεται  $r = 12.000m$

Υπολογίζουμε το μήκος AO όπως προκύπτει από τα χαρακτηριστικά που επιλέξαμε

**Υπολογισμός χαρακτηριστικών κυκλικού τόξου σε περίπτωση που η προτεινόμενη χάραξη δεν είναι δυνατό να εγγραφεί στην πολυγωνική**

$$\left. \begin{aligned} l_{\min} &= \frac{h \cdot V}{144} \\ h &= \frac{7,12 \cdot V^2}{R} \end{aligned} \right\} \Rightarrow l_{\min} = \frac{7,12 \cdot V^2}{144} \cdot V$$

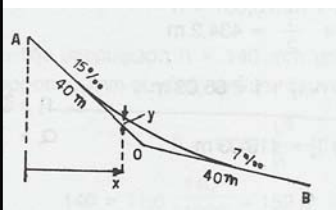
$$\left. \begin{aligned} R_{\min} &= 0,0445 \cdot V_{\max}^2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow l = \frac{7,12 \cdot V^2}{144} \cdot V$$

$$\Rightarrow l = \frac{7,12 \cdot V}{6,41}$$

$$f = \frac{l^2}{24 \cdot R}$$

$$OK = (R + f) \cdot \tan(\alpha) + \frac{l}{2}$$

**Παράδειγμα συναρμογής σε μηκοτομή**



$$E = \Delta i \cdot (r/2) = 0,008 \cdot (12000/2) = 48 > \text{από το μήκος OK}$$

Επομένως θα πρέπει να επιλέξουμε μικρότερη ακτίνα

Οι τεταγμένες του κυκλικού τόξου συναρμογής θα υπολογισθούν από την σχέση :

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot r}$$