Στρώση Γραμμής Συστημάτων LRT: Μια Μέθοδος για την Προσαρμογή των Σιδηροτροχιών στη Γεωμετρία της Χάραξης και το Γεωδαιτικό Έλεγχο Στρώσης

Β. ΓΚΙΚΑΣ Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια μέθοδος με την οποία αντιμετωπίζεται συνολικά το πρόβλημα του γεωμετρικού υπολογισμού των σιδηροτροχιών (υπολογισμός παραμέτρων κοπής και κάμψης) στη φάση του σχεδιασμού καθώς και του ελέγχου στρώσης γραμμής στη φάση της κατασκευής σύγγρονων συστημάτων ελαφριού μετρό και τραμ (LRT – Light Rail Transit). Η προτεινόμενη διαδικασία προσαρμογής του σχήματος των σιδηροτροχιών στη γεωμετρία της χάραζης βασίζεται σε αναλυτικές σχέσεις ενώ ο έλεγχος τοποθέτησης των σιδηροτροχιών στην προβλεπόμενη από τη μελέτη θέση στηρίζεται σε γεωδαιτική μεθοδολογία. Ο έλεγχος του σχήματος και της θέσης των σιδηροτροχιών κατά τη διάρκεια της κατασκευής γίνεται με χρήση γεωδαιτικού σταθμού από σημεία αναφοράς που εξαρτώνται από το τριγωνομετρικό δίκτυο που εγκαθίσταται για τις ανάγκες υλοποίησης του έργου. Η επιτυχία εφαρμογής της μεθόδου επαληθεύεται από τον υπολογισμό και την ανάλυση καθοριστικών παραμέτρων που αφορούν τον προσδιορισμό της «απόλυτης» και «σχετικής» θέσης των σιδηροτροχιών, όπως προσδιορίσθηκαν κατά την κατασκευή του τραμ της Αθήνας.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνική αρτιότητα ενός συγκοινωνιακού έργου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την ακρίβεια εφαρμογής των στοιγείων της γάραξης όπως αυτά ορίζονται στη μελέτη εφαρμογής. Σε συγκοινωνιακά έργα μέσων σταθερής τροχιάς η τήρηση των βασικών αργών γεωμετρικού σχεδιασμού καθορίζεται από την «απόλυτη» και «σχετική» ακρίβεια στρώσης των σιδηροτροχιών στην οριστική τους θέση [6, 8]. Όσον αφορά στην «απόλυτη» θέση των σιδηροτροχιών, τυχόν αποκλίσεις μεταξύ της θεωρητικής (ιδανικής) τοποθέτησης και της πραγματικής τοποθέτησης έχουν αρνητικές επιπτώσεις στη δυναμική της κίνησης του οχήματος, καθώς και στο δυναμικό περιτύπωμα. Αντίστοιχα, τυχόν αποκλίσεις στη «σχετική» θέση μεταξύ αντικριστών σιδηροτροχιών στην ίδια γραμμή μεγαλώνουν την πιθανότητα εκτροχιασμού, αυξάνουν τα επίπεδα θορύβου κυρίως στις κλειστές καμπύλες και προκαλούν σε μικρό χρονικό διάστημα σημαντικές φθορές στις σιδηροτροχιές και στο τροχαίο υλικό με αποτέλεσμα να μεγαλώνει *Υποβλήθηκε:* 6.7.2004 *Εγινε δεκτή: 5.4.2005*

το κόστος συντήρησης και λειτουργίας του συστήματος. Σε αντίθεση με τα συνήθη σιδηροδρομικά έργα η κατασκευή δικτύων ΤΡΑΜ και ΜΕΤΡΟ παρουσιάζει ιδιαιτερότητες, οι οποίες δυσχεραίνουν την υλοποίηση της χάραξης στο έδαφος. Ειδικότερα, η τροχιοδρομική υποδομή κατασκευάζεται σε αστικό περιβάλλον με αποτέλεσμα τα σχετικά έργα να υπόκεινται σε πληθώρα πολεοδομικών και άλλων περιορισμών. Στο μεγαλύτερο τμήμα τους διέρχονται μέσα από ζώνες πυκνής δόμησης, όπου οι απαιτήσεις για συχνές και απότομες μεταβολές της πορείας του οχήματος είναι αναπόφευκτες ενώ σε άλλες περιπτώσεις εξασφαλίζεται οριακά ο απαιτούμενος «ελεύθερος εμποδίων» χώρος. Επιπρόσθετα, η ανάγκη κατασκευής τμημάτων γραμμής με «κοινό διάδρομο» κυκλοφορίας με άλλα οδικά μέσα, επιβάλλουν την υιοθέτηση μικρών ακτίνων καμπυλότητας στην οριζοντιογραφία, οι οποίες σε εξαιρετικές περιπτώσεις φθάνουν τα 25 m. Αποδεικνύεται εύκολα ότι προκειμένου να εξασφαλίζεται η πιστή εφαρμογή της μελέτης της γάραξης, για μήκη σιδηροτρογιών από 15 έως 18 m, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ακτίνες καμπυλότητας μεγαλύτερες από 250 m [3, 8]. Στα τμήματα του έργου, στα οποία εφαρμόζονται μικρότερες ακτίνες, κάθε σιδηροτροχιά πριν τοποθετηθεί στο πεδίο θα πρέπει να καμφθεί κατάλληλα σε συγκεκριμένα σημεία και να κοπεί προκειμένου να υλοποιείται πιστά η γεωμετρία της γάραξης.

Η σύνταξη, η εφαρμογή και ο έλεγχος των γεωμετρικών προδιαγραφών βιομηχανικών παραγώγων, των οποίων ο σχεδιασμός γίνεται με μεγάλη, προδιαγεγραμμένη και ελέγξιμη ακρίβεια αποτελεί αντικείμενο του κλάδου της βιομηχανικής γεωδαισίας [7]. Σε αυτό το πλαίσιο, αντιμετωπίζεται στην παρούσα εργασία το γενικευμένο πρόβλημα της προσαρμογής του σχήματος των σιδηροτροχιών στη γεωμετρία της χάραξης καθώς και της εφαρμογής τους στο πεδίο. Ειδικότερα παρουσιάζεται η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη κάμψης και κοπής σιδηροτροχιών – ΜΚΚΣ (rail cutting and bending design), καθώς και οι τεχνικές στρώσης γραμμής (rail laying) και του σχετικού ελέγχου με γεωδαιτική μεθοδολογία, όπως εφαρμόσθηκαν στην κατασκευή του ΤΡΑΜ της Αθήνας.

2. ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

r	:	ακτίνα κυκλικού τόξου,
А	:	παράμετρος κλωθοειδούς καμπύλης,
ds	:	απόσταση σιδηροτροχιάς από τον
		άξονα της γραμμής,
$X\Theta_{START}, X\Theta_{END}$:	χιλιομετρική θέση αρχής και τέλους
		σιδηροτροχιάς,
L _{axis} , L _{rail}	:	μήκος τμήματος ευθυγραμμίας,
		κυκλικού τόξου ή κλωθοειδούς με-
		τρούμενο στον άξονα της γραμμής
		και στη σιδηροτροχιά,
ν	:	πλήθος κυκλικών τόξων προσ-ομοι-
		ούμενης κλωθοειδούς,
dL_{AXIS}, dL_{RAII}	:	μήκος προσομοιούμενου με κυκλικό
		τόξο, τμήματος κλωθοειδούς με-
		τρούμενο στον άξονα της γραμμής
		και στη σιδηροτροχιά,
pf	:	βέλος κάμψης σιδηροτροχιάς, (κατά
		την εγκάρσια διεύθυνση)

Σφάλματα τοποθέτησης σιδηροτροχιάς:

δx : σφάλμα οριζοντιογραφικής τοποθέ-τησης,
 δh : σφάλμα υψομετρικής τοποθέτησης,
 δs : σφάλμα εύρους γραμμής,
 δu : σφάλμα υπερύψωσης,
 δpf : σφάλμα βέλους κάμψης σιδηρο-τροχιάς.

3. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΜΨΗΣ ΚΑΙ ΚΟΠΗΣ ΣΙΔΗΡΟΤΡΟΧΙΩΝ

3.1. Βασικά στοιχεία μελέτης

Για κάθε σιδηροτροχιά, ανάλογα με τη θέση της στη χάραξη, πριν σταλεί στο εργοτάξιο για να καμφθεί και στη συνέχεια στο πεδίο, όπου θα εφαρμοσθεί στην οριστική της θέση, θα πρέπει να έχουν υπολογισθεί τα παρακάτω στοιχεία της ΜΚΚΣ:

- το μήκος, η ακτίνα καμπυλότητας και το βέλος κάμψης (για κάθε σιδηροτροχιά που απαιτείται να καμπυλωθεί),
- η χιλιομετρική θέση (ΧΘ) της αρχής και του τέλους κάθε σιδηροτροχιάς,
- η τροχιοσειρά της γραμμής στην οποία ανήκει η σιδηροτροχιά και η θέση της ως προς τη φορά κίνησης των συρμών (αριστερή ή δεξιά).

Για την εκπόνηση της ΜΚΚΣ θα πρέπει να είναι κατ' ελάχιστο γνωστά τα εξής:

 τα στοιχεία της μελέτης της χάραξης και συγκεκριμένα, οι ακτίνες των κυκλικών τόξων, οι παράμετροι των κλωθοειδών, καθώς και οι ΧΘ των χαρακτηριστικών σημείων του άζονα της γραμμής,

- οι ΧΘ αρχής και τέλους των περιοχών σχηματισμών γραμμής (π.χ. αλλαγές και διασταυρώσεις),
- το ονομαστικό μήκος των σιδηροτροχιών και η μεταξύ τους απόσταση.

Ο υπολογισμός της ΜΚΚΣ σε ευθύγραμμα τμήματα και σε κυκλικά τόξα είναι σχετικά απλός και μπορεί να γίνει με εφαρμογή στοιχειώδους γεωμετρίας. Ωστόσο, σε τμήματα της χάραξης που περιλαμβάνουν καμπύλες συναρμογής, η γεωμετρία είναι πολύπλοκη. Στα τμήματα αυτά απαιτείται προσομοίωση της γεωμετρίας των κλωθοδειδών με επιμέρους κυκλικά τόξα και στη συνέχεια υπολογισμός των στοιχείων της ΜΚΚΣ.

3.2. Μαθηματικός υπολογισμός

Η μεθοδολογία υπολογισμού της ΜΚΚΣ, που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία, στηρίζεται στις βασικές γεωμετρικές ιδιότητες των θεμελιωδών στοιχείων της χάραξης (ευθυγραμμία, κυκλικό τόξο και κλωθοειδής καμπύλη) προσαρμοσμένη κατάλληλα στις ανάγκες κατασκευής του ΤΡΑΜ της Αθήνας [5, 8].

Η μέθοδος περιλαμβάνει τέσσερα διακριτά βήματα, τα οποία απεικονίζονται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής MKKΣ. Figure 1: Rail cutting and bending flowchart.

3.2.1. Από τον άξονα στις σιδηροτροχιές

Με δεδομένη τη χιλιομέτρηση του άξονα μιας γραμμής από τη μελέτη εφαρμογής, υπολογίζεται το μήκος των εσωτερικών και εξωτερικών (ως προς το κέντρο καμπυλότητας) σιδηροτροχιών για κάθε τμήμα ευθυγραμμίας, κυκλικού τόξου και κλωθοειδούς αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$L_{RAIL} = L_{AXIS}$$
(3.1)

$$L_{RAIL} = L_{AXIS} \pm \frac{L_{AXIS}}{r} ds$$
(3.2)

$$L_{RAIL} = L_{AXIS} \pm \frac{A^2}{2r^2} ds$$
(3.3)

όπου, το πηλίκο L_{AXIS}/r και $A^2/2r^2$ ισοδυναμεί με την επίκεντρο γωνία που αντιστοιχεί στο καμπύλο τμήμα και ds είναι το μισό του εύρους της γραμμής. Στη συνέχεια, με γνωστά τα μήκη των ευθύγραμμων και καμπύλων τμημάτων των σιδηροτροχιών υπολογίζονται για κάθε μια σιδηροτροχιά ξεχωριστά, ανάλογα με τη θέση της στη χάραξη, τα μήκη που αναλογούν σε ευθυγραμμία, κυκλικό τόξο και κλωθοειδή καμπύλη, όπως φαίνεται στο σχήμα 2 [5, 8]. Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται προβολή του μήκους και της γεωμετρίας της χάραξης από τον άξονα της γραμμής στις σιδηροτροχιές.

3.2.2. Υπολογισμός της χιλιομετρικής θέσης των σιδηροτροχιών

Η ΧΘ των σημείων αρχής και τέλους κάθε σιδηροτροχιάς αποτελεί θεμελιώδη παράμετρο υπολογισμού της ΜΚΚΣ, επειδή απαιτείται για την τοποθέτηση των σιδηροτροχιών στο πεδίο και, ορίζεται ως η ΧΘ της προβολής των σημείων αυτών στον άξονα της γραμμής. Ο υπολογισμός της ΧΘ των σημείων αυτάν στον άξονα της γραμμής. Ο υπολογισμός της ΧΘ των σημείων αυτάν στον άξονα της γραμμής. Ο υπολογισμός της ΧΘ των σημείων αυτάν στον άξονα της γραμμής. Ο υπολογισμός της ΧΘ των σημείων αυτάν στον άξονα της γραμμής. Ο υπολογισμός της ΧΘ των σημείων αυτάν στον άξονα της γραμμής. Ο υπολογισμός της ΧΘ των σημείων αυτάν στον άξονα της γραμμής. Ο υπολογισμός της ΧΘ των σημείων αυτάν στον άξονα της γραμμής. Ο υπολογισμός της ΧΘ των σημείων αυτάν στον τέλους των σιδηροτροχιώς (Σ_{RAIL} όπως προέκυψε από το προηγούμενο στάδιο (εξισώσεις 3.1, 3.2, 3.3) και για ΧΘ αρχής, (XΘ_{START}) υπολογίζεται η ΧΘ του τέλους της σιδηροτροχιάς, (ΧΘ_{END}) από τη σχέση:

$$X\Theta_{END} = X\Theta_{START} + L_{AXIS}$$
(3.4)

όπου, L_{AXIS} είναι η προβολή του τμήματος L_{RAIL} στον άξονα που ανάλογα με τη γεωμετρία της χάραξης υπολογίζεται για κάθε τμήμα ευθυγραμμίας, κυκλικού τόξου και κλωθοειδούς από τις σχέσεις 3.5 έως 3.7 (σχ. 2):

 $L_{AXIS} = L_{RAIL}$ (3.5)

$$L_{AXIS} = L_{RAIL} \frac{r}{r \pm ds}$$
(3.6)

$$L_{AXIS} = \frac{A^2}{\frac{A^2}{2L_{RAIL}} + \sqrt{\frac{A^4}{4L_{RAIL}^2} \pm \frac{A^2}{2L_{RAIL}}} ds}$$
(3.7)

Αναλυτικότερα, στην περίπτωση κυκλικού τόξου η σχέση (3.6) προκύπτει από τη σχέση (3.2) επιλύοντάς την ως προς L_{AXIS} . Για τμήμα κλωθοειδούς L_{AXIS} η σχέση (3.7) προκύπτει από το θεμελιώδη τύπο της γεωμετρίας της κλωθοειδούς:

$$L_{AXIS} = \frac{A^2}{r}$$
(3.8)

Στην εξίσωση (3.8) άγνωστος είναι η ακτίνα καμπυλότητας της κλωθοειδούς r, μήκους L_{RAIL} μετρούμενου από την αρχή της κλωθοειδούς. Η τιμή της ακτίνας r υπολογίζεται επιλύοντας τη σχέση (3.3) ως προς r:

$$r = \frac{A^2}{2L_{RAIL}} + \sqrt{\frac{A^4}{4L_{RAIL}^2} \pm \frac{A^2}{2L_{RAIL}}} ds$$
(3.9)

οπότε, αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.9) στην εξίσωση (3.8) προκύπτει η σχέση (3.7).



Σχήμα 2: Προβολή της γεωμετρίας του άζονα στις σιδηροτροχιές. Figure 2: Computation of rail geometry.

3.2.3. Προσομοίωση των κλωθοειδών με κυκλικά τόξα

Η προσαρμογή των σιδηροτροχιών στη γεωμετρία της χάραξης γίνεται με τη βοήθεια μηχανών κάμψης. Σε κυκλικά τμήματα η διαδικασία απαιτεί τον υπολογισμό του βέλους κάμψης στο μέσο του κυκλικού τόξου.

Ωστόσο, οι κλωθοειδείς καμπύλες λόγω της πολύπλοκης

γεωμετρίας τους είναι αναγκαίο να διαιρούνται σε μικρότερα τμήματα, τα οποία θα πρέπει να προσομοιάζονται από κυκλικά τόξα, που να προσεγγίζουν κατά το δυνατό το σχήμα της κλωθοειδούς.

Η διαδικασία υπολογισμού στη μέθοδο που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία έχει ως εξής: με γνωστές τις ΧΘ των σημείων αρχής και τέλους της κλωθοειδούς και της σιδηροτροχιάς που θα καμπυλωθεί, το τμήμα της κλωθοειδούς που περιέχεται στη σιδηροτροχιά διαιρείται σε πλήθος (ν) τμήματα ίδιου μήκους όχι μεγαλύτερα από 6 m το καθένα. Το πλήθος των προσομοιούμενων κυκλικών τόξων υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\nu = \begin{cases} L_{\text{axis}}/6, & \text{gia} \quad L_{\text{axis}}/6 & \text{akéraio ariquó} \\ \\ [L_{\text{axis}}/6]+1, & \text{gia} \quad L_{\text{axis}}/6 & \text{rgtó ariquó} \end{cases}$$
(3.10)

οπότε, το μήκος κάθε τμήματος στον άξονα δίνεται από τη σχέση:

$$dL_{AXIS} = \frac{L_{AXIS}}{v}$$
(3.11)

Στη συνέχεια, με γνωστό το μήκος dL_{AXIS} προβάλλεται κάθε επιμέρους τμήμα της κλωθοειδούς από τον άξονα στη σιδηροτροχιά.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.3) και (3.8) υπολογίζεται το μήκος τμήματος στη σιδηροτροχιά dL_{RAIL} ως εξής (σχ. 3):



Σχήμα 3: Προσομοίωση κλωθοειδούς με κυκλικά τόζα. Figure 3: Clothoid element simulation with arcs of circles.

$$dL_{RAIL_{i}} = idL_{AXIS} + \frac{(idL_{AXIS})^{2}}{2A^{2}}ds - dL_{RAIL_{i-1}}$$
(3.12)

όπου: i=1,...,ν.

Τέλος, η ακτίνα καμπυλότητας κάθε τμήματος προσεγγίζεται από την ακτίνα καμπυλότητας της κλωθοειδούς στο μέσον του τμήματος από τη σχέση (3.8), η οποία παραμετρικά παίρνει τη μορφή:

$$\mathbf{r}_{i} = \frac{\mathbf{A}^{2}}{(i - 0.5) \mathrm{dL}_{\mathrm{AXIS}}}$$
 óπου: $i = 1, ..., v$ (3.13)

Με αυτό τον τρόπο κάθε κλωθοειδής καμπύλη αντικαθίσταται από (ν) κυκλικά τόξα, μήκους dL_{RAILi} και ακτίνας καμπυλότητας r_i, εφαπτόμενα στην κλωθοειδή στο μέσον τους.

3.2.4. Υπολογισμός του βέλους κάμψης

Το τελικό στάδιο της ΜΚΚΣ αφορά στον υπολογισμό του βέλους κάμψης σε κάθε καμπύλο τμήμα. Αποδεικνύεται ότι για τις ανάγκες της ΜΚΚΣ η τιμή του βέλους κάμψης pf υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια από τη σχέση:

$$pf = \frac{L_{RAIL}^2}{8r}$$
(3.14)

Ειδικότερα, στην περίπτωση κυκλικού τόξου το μήκος L_{RAIL} δίνεται από τη σχέση (3.2) ενώ η ακτίνα καμπυλότητας r καθορίζεται από τη μελέτη οριζοντιογραφίας. Ανάλογα, για τμήμα κλωθοειδούς καμπύλης που προσεγγίζεται από κυκλικά τόξα οι τιμές των βελών κάμψης προκύπτουν από συνδυασμό των εξισώσεων (3.12) και (3.14) αντίστοιχα.

4. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΤΡΑΜ ΤΗΣ ΑΘΗΝΑΣ

4.1. Γενική περιγραφή του έργου και αρχές σχεδιασμού

Η Μελέτη Ανάπτυξης Μετρό (ΜΑΜ) [12] προβλέπει ότι κατά το έτος σχεδιασμού 2020 θα λειτουργούν στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας τέσσερις γραμμές ΤΡΑΜ συνολικού μήκους 46 km. Το TPAM θα λειτουργεί συμπληρωματικά του δικτύου ΜΕΤΡΟ με ημερήσια επιβατική κίνηση μεγαλύτερη από 380.000 επιβάτες (ποσοστό > 9% των συνολικών μετακινήσεων με MMM) και μέση ταχύτητα κίνησης 22 km/ h. Δεδομένης της τμηματικής χρηματοδότησης του έργου, σε πρώτη φάση κατασκευάζεται το τμήμα που θα εξυπηρετεί τις περιοχές από το κέντρο της Αθήνας (Σύνταγμα) προς το Παλαιό Φάληρο και το τμήμα από το Παλαιό Φάληρο προς την περιοχή του Νέου Φαλήρου βορειοδυτικά και της Βούλας νοτιοανατολικά. Οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού του έργου καθορίζονται από την επιλογή του τροχαίου υλικού και τις προδιαγραφές που αφορούν τη μελέτη της οριζοντιογραφίας, της μηκοτομής και της διατομής του τροχιοδρόμου. Οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές των βασικών παραμέτρων γεωμετρικού σχεδιασμού που εφαρμόσθηκαν στη χάραξη του τροχιοδρόμου της Αθήνας είναι οι εξής [9]:

ελάχιστη ακτίνα οριζόντιογραφίας, $r_{Hmin} = 25 \text{ m}$,

- μέγιστη κατά μήκος κλίση, $g_{max} = 6\%$,
- ελάχιστη ακτίνα κατακόρυφης καμπύλης συναρμογής (κοίλης και κυρτής), r_{Vmin} = 650 m,
- μέγιστη κανονική υπερύψωση της εξωτερικής (ως προς την καμπύλη) σιδηροτροχιάς, u_{max} = 150 mm.



Σχήμα 4: Σχέδιο κοπής και κάμψης σιδηροτροχιών. Figure 4: Sample rail cutting and bending plan.



Σχήμα 5: Μηχανή κάμψης σιδηροτροχιών. Figure 5: Rail bending machine.

Οι σιδηροτροχιές που χρησιμοποιούνται σε έργα TPAM ταξινομούνται σε διαφορετικούς τύπους ανάλογα με το σχήμα και τις διαστάσεις της διατομής τους, το βάρος τους ανά τρέχον μέτρο, καθώς και την αντοχή τους σε κρούση, τριβή και οξείδωση. Οι επικρατέστερες διατομές σιδηροτροχιών είναι η τυπική διατομή (normal rail ή flat bottom rail) και η διατομή με αύλακα ή έγκοιλη διατομή (grooved rail). Η διατομή με αύλακα διατίθεται στην αγορά σε μήκη 15 και 18 m. Βασικό πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να εγκιβωτισθούν στο οδόστρωμα με αποτέλεσμα να παρέχουν ανεμπόδιστα τη δυνατότητα λειτουργίας μικτής κυκλοφορίας με άλλα οδικά μέσα. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται σε έργα TPAM, τα οποία εξυπηρετούν κυρίως αστικές περιοχές. Οι σιδηροτροχιές με τυπική διατομή (όπως η Vignol S49) διατίθενται στην αγορά σε μήκη 18 m και θα πρέπει να προτιμώνται, όπου είναι εφικτό, γιατί μειώνουν το κόστος κατασκευής σε ποσοστό ως και 30% [3]. Στην περίπτωση του TPAM της Αθήνας επιλέχθηκαν η έγκοιλη σιδηροτροχιά τύπου Ri60N για το αστικό τμήμα του τροχιοδρόμου (διαδρομή Αθήνα – Παλαιό Φάληρο) και η τυπική σιδηροτροχιά τύπου S49 για το παραλιακό τμήμα (διαδρομή Νέο Φάληρο – Βούλα).

4.2. Κοπή και κάμψη σιδηροτροχιών

Ο υπολογισμός των παραμέτρων κοπής και κάμψης σιδηροτροχιών (ΚΚΣ) βασίζεται στη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην παράγραφο 3. Για αυτό το σκοπό αναπτύγθηκαν φύλλα υπολογισμού των παραμέτρων ΚΚΣ σε Η/Υ με εφαρμογή των μαθηματικών σχέσεων της παραγράφου 3. Η απόδοση των τελικών παραμέτρων ΚΚΣ έγινε στο σχεδιαστικό πακέτο AutoCAD. Στο σχήμα 4 δίνεται ένα τυπικό παράδειγμα σχεδίου ΚΚΣ, το οποίο περιλαμβάνει τμήμα ευθυγραμμίας, κυκλικού τόξου και κλωθοειδούς καμπύλης. Ειδικότερα φαίνεται ο άξονας της γραμμής, οι σιδηροτροχιές με τους κωδικούς αναγνώρισής τους, καθώς και τα στοιχεία χάραξης (ΧΘ χαρακτηριστικών σημείων, ακτίνες κυκλικών τόξων και παράμετροι κλωθοειδών καμπυλών). Οι παράμετροι ΚΚΣ περιλαμβάνουν τις ΧΘ αρχής και τέλους των σιδηροτροχιών, ενώ για κάθε καμπύλο τμήμα δίνεται η ακτίνα καμπυλότητας (σε μέτρα), το μήκος του τμήματος (σε χιλιοστά) και το βέλος κάμψης (σε χιλιοστά), το οποίο θα πρέπει να εφαρμοσθεί στο μέσο του τμήματος κατά τη διαδικασία λυγισμού. Επίσης, δίνεται το συνολικό βέλος κάμψης, που θα πρέπει να εμφανίζει κάθε σιδηροτροχιά, όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία κάμψης.

Η εφαρμογή των σχεδίων ΚΚΣ γίνεται με χρήση ειδικής μηχανής κάμψης, η οποία φέρει κατάλληλα προσαρμοσμένους, περιστρεφόμενους οδηγούς, οι οποίοι κυλίουν τη σιδηροτροχιά από το ένα άκρο της στο άλλο με τη βοήθεια ειδικών στατήρων (σχ. 5). Η εφαρμογή του βέλους κάμψης γίνεται στα επιθυμητά σημεία της σιδηροτροχιάς με άσκηση της κατάλληλης τάσης. Σε σιδηροτροχιές που απαιτείται να καμφθούν σε περισσότερα του ενός σημεία (σιδηροτροχιές που περιέχουν κλωθοειδή καμπύλη), για τις οποίες απαιτούνται βέλη κάμψης μεγαλύτερα από 100 mm, η καμπύλωσή τους επιτυγχάνεται επαναληπτικά σε όλες τις θέσεις κάμψης με εφαρμογή προοδευτικά αυξανόμενης τάσης έως ότου η σιδηροτροχιά αποκτήσει το επιθυμητό σχήμα. Γενικά, απαιτείται μεγαλύτερη προσοχή κατά το λυγισμό σιδηροτροχιών με αύλακα, επειδή η διατομή τους είναι ασύμμετρη. Όταν η διαδικασία κάμψης ολοκληρωθεί μετράται το συνολικό βέλος κάμψης στο μέσον της σιδηροτροχιάς και συγκρίνεται με την αντίστοιχη τιμή που αναγράφεται στα σχέδια ΚΚΣ. Δεδομένου ότι οι σιδηροτροχιές παρουσιάζουν μεγάλο βαθμό ευλυγισίας η ακρίβεια εφαρμογής της ΜΚΚΣ ανάλογα με το μήκος των σιδηροτροχιών και τις συνθήκες μεταφοράς, φόρτωσης και εκφόρτωσής τους στο πεδίο ενδέχεται

(ιδιαίτερα σε καμπύλες μικρών ακτίνων) να είναι της τάξης των 5 cm. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου βαθμού ευλυγισίας, οι σιδηροτροχιές κατά την τοποθέτησή τους στην οριστική τους θέση είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν με πολύ καλύτερη ακρίβεια, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 4.3.3.

4.3. Στρώση σιδηροτροχιών με γεωδαιτική μεθοδολογία

4.3.1. Γενικά



- Σχήμα 6: Διάγραμμα τριγωνισμού GPS που ιδρύθηκε για την κατασκευή του TPAM της Αθήνας.
- *Figure 6: GPS network established for the construction of the Athens tram system.*

Η διαδικασία στρώσης των σιδηροτροχιών του ΤΡΑΜ της Αθήνας διακρίνεται σε πέντε κατασκευαστικές φάσεις, οι οποίες συνοπτικά περιγράφονται ως εξής [9]:

- κατασκευή των έργων αποστράγγισης του διαδρόμου, διάστρωση και συμπύκνωση του υποστρώματος επιδομής (ελάχιστου πάχους 0,20 m) και διάστρωση του σκυροδέματος εξομάλυνσης – καθαριότητας (πάχους 0,05 m),
- εφαρμογή του προβλεπόμενου σιδηροπλισμού στα διάκενα του οποίου τοποθετούνται προσωρινές στηρίξεις των σιδηροτροχιών σε αποστάσεις περίπου ανά 5 m, σε θέση (οριζοντιογραφικά και υψομετρικά) κατά το δυνατόν πλησιέστερη της οριστικής,
- τοποθέτηση των σιδηροτροχιών στην οριστική οριζοντο-

γραφική και υψομετρική θέση τους με εφαρμογή του συστήματος PREFARAIL, που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο,

- σκυροδέτηση της δοκού ή της πλάκας έδρασης στην οποία εγκιβωτίζεται η σιδηροτροχιά και το ελαστικό περίβλημά της,
- αλουμινοθερμική συγκόλληση των σιδηροτροχιών.

4.3.2. Γεωδαιτικά δίκτυα

Για τις ανάγκες του ΤΡΑΜ της Αθήνας εγκαταστάθηκαν 28 νέα τριγωνομετρικά σημεία κατά μήκος της ζώνης του έργου με μέση απόσταση κορυφών 1 km [10]. Το γεωδαιτικό δίκτυο που προέκυψε είναι ένα επίμηκες τριγωνομετρικό δίκτυο, το οποίο διατρέχει τους δύο κύριους άξονες του έργου (από την Αθήνα στο Παλαιό Φάληρο και από το Νέο Φάληρο στη Βούλα), το οποίο μετρήθηκε και υπολογίσθηκε με μεθόδους δορυφορικής γεωδαισίας (σχ. Το τμήμα του τροχιοδρόμου που εκτείνεται από το κέντρο της Αθήνας μέχρι το Παλαιό Φάληρο διέρχεται από περιοχές πυκνής δόμησης με αποτέλεσμα η δυνατότητα ταυτόγρονης λήψης ικανοποιητικού αριθμού δορυφόρων να είναι περιορισμένη. Ιδιαίτερα στις περιοχές του Νέου Κόσμου και της Νέας Σμύρνης, οι οποίες χαρακτηρίζονται από πολυώροφα κτίρια και στενούς δρόμους, η επιλογή της θέσης των τριγωνομετρικών σημείων και ο χρονικός προγραμματισμός των παρατηρήσεων είχαν καθοριστικό ρόλο στον υπολογισμό του δικτύου. Σε αυτές τις περιοχές τα τριγωνομετρικά σημεία εγκαταστάθηκαν σε θέσεις με κατά το δυνατόν «ανοικτό ορίζοντα», ενώ για την εκτέλεση των μετρήσεων κατασκευάσθηκαν και εφαρμόσθηκαν διαγράμματα ορατότητας δορυφόρων για κάθε κορυφή του δικτύου. Μεμονωμένα προβλήματα, επίσης, παρουσιάστηκαν στην ποιότητα λήψης του δορυφορικού σήματος στην περιοχή της Νέας Σμύρνης λόγω παρεμβολών που οφείλονται πιθανότατα σε κεραίες και σε καλώδια υψηλής τάσης. Το πρόβλημα αντιμετωπίσθηκε με μερικό επανασχεδιασμό του δικτύου στην περιοχή.

Για τη μέτρηση του δικτύου χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις δέκτες GPS δύο συχνοτήτων. Η μέτρηση του δικτύου έγινε με την τεχνική του σχετικού (στατικού) εντοπισμού με ταυτόχρονες παρατηρήσεις φάσεων. Αρχικά το δίκτυο επιλύθηκε ως ελεύθερο για εσωτερικό έλεγχο των μετρήσεων GPS κάθε βάσης. Στη συνέχεια το δίκτυο εξαρτήθηκε από το κρατικό τριγωνομετρικό δίκτυο και επιλύθηκε ξανά. Επιπρόσθετα, το δίκτυο ελέγχθηκε ως προς την αξιοπιστία του με την εφαρμογή ανεξάρτητων ελέγχων, όπως ο υπολογισμός του σφάλματος κλεισίματος των συντεταγμένων σε κλειστά πολύγωνα του δικτύου, «βρόγχους».

Η εφαρμογή των υψομετρικών στοιχείων της χάραξης έγινε από υψομετρικά σημεία (repθres), τα οποία ιδρύθηκαν στην περιοχή του έργου, ύστερα από πύκνωση επιλεγμένων κορυφών του χωροσταθμικού δικτύου της ΕΥΔΑΠ. Οι κορυφές του δικτύου της ΕΥΔΑΠ και τα νέα σημεία συνδέθηκαν μεταξύ τους με χωροσταθμικές οδεύσεις, οι οποίες μετρήθηκαν με ηλεκτρονικό χωροβάτη σε μετάβαση και επιστροφή. Τα τελικά υψόμετρα των νέων σημείων υπολογίσθηκαν με συνόρθωση του χωροσταθμικού δικτύου με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Το σφάλμα κλεισίματος σε όλο το μήκος του δικτύου είναι καλύτερο από 2 mm.

4.3.3. Τοποθέτηση σιδηροτροχιών στην οριστική τους θέση

Η εφαρμογή της χάραξης στο έδαφος έγινε με μετρήσεις από πολυγωνομετρικά σημεία αναφοράς, τα οποία ιδρύθηκαν με πύκνωση του τριγωνομετρικού δικτύου. Τα σημεία αναφοράς εγκαταστάθηκαν σε θέσεις εντός και εκτός της ζώνης του τροχιοδρόμου, ώστε να εξασφαλίζονται οι απαιτούμενες ορατότητες και η εποπτεία της χάραξης με μέση απόσταση μεταξύ των κορυφών 35 – 50 m. Η σύνδεση των σημείων αναφοράς με το τριγωνομετρικό δίκτυο έγινε με τη μέτρηση κλειστών, πλήρως εξαρτημένων οδεύσεων με ακρίβεια της τάξεως των 4 mm ως προς τα τριγωνομετρικά σημεία. Η υψομετρική εξάρτηση των σημείων αναφοράς έγινε με ακρίβεια της τάξης των 0,5 mm ως προς το χωροσταθμικό δίκτυο αναφοράς.



Σχήμα 7: Τοποθέτηση σιδηροτροχιών με τη βοήθεια σημείων αναφοράς. Figure 7: Setting out of tracks with respect to reference points.

Η τοποθέτηση των σιδηροτροχιών στην οριστική τους θέση έγινε με τη χρήση γεωδαιτικού σταθμού από τα σημεία αναφοράς. Συγκεκριμένα για κάθε σημείο αναφοράς υπολογίζονται τα στοιχεία εφαρμογής των γειτονικών του σιδηροτροχιών δηλαδή, οι πολικές συντεταγμένες και η ακριβής υψομετρική διαφορά των σιδηροτροχιών ως προς το σημείο αναφοράς, καθώς και η ΧΘ, το απόλυτο υψόμετρο και η υπερύψωση των σιδηροτροχιών (σχ. 7, 8). Η οριστική υψομετρική και οριζοντιογραφική θέση των σιδηροτροχιών επιτυγχάνεται με την εφαρμογή του συστήματος PREFARAIL [1, 2].

Κατά την εφαρμογή της τεχνικής PREFARAIL τοποθετούνται ειδικοί μηχανισμοί ανάρτησης των σιδηροτροχιών (ανά 2,5 m σε ευθύγραμμα τμήματα και ανά 0,6 m σε καμπύλα τμήματα), οι οποίοι εδράζονται εκατέρωθεν αυτών και φέρουν ακριβές σύστημα οριζοντιογραφικής τοποθέτησης και χωροστάθμησης βάσει του οποίου, υλοποιείται το προβλεπόμενο από τη μελέτη εύρος των σιδηροτροχιών και οι υπερυψώσεις στις οριζόντιες καμπύλες (σχ. 9).

4.4. Γεωδαιτικός έλεγχος στρώσης σιδηροτροχιών και επαλήθευσης της ΜΚΚΣ

Η διασφάλιση της ποιότητας και της ακρίβειας της κατασκευής επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση και την εφαρμογή από πλευράς αναδόχου των κατάλληλων διαδικασιών και τεχνικών που αποσκοπούν στον έλεγχο, την αποκατάσταση τυχόν σφαλμάτων, την τεκμηρίωση και τελικά την ορθή εφαρμογή της χάραξης.

Η εφαρμογή των ελέγχων ποιότητας θα πρέπει να διενεργείται λίγο πριν από τη σκυροδέτηση, ώστε τυχόν ατέλειες ή σφάλματα στην κάμψη και την τοποθέτηση των σιδηροτροχιών στην οριστική τους θέση να αποκαθίστανται με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Ανάλογοι έλεγχοι θα πρέπει να πραγματοποιούνται μετά την σκυροδέτηση και πριν από την παράδοση του έργου.

Στην περίπτωση του TPAM της Αθήνας ο έλεγχος των εργασιών εφαρμογής συνίσταται στην πιστοποίηση της τοποθέτησης των σιδηροτροχιών στην οριστική τους θέση («απόλυτη» και «σχετική») καθώς και στην επαλήθευση της ΜΚΚΣ [6, 11]. Οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ποιότητα εφαρμογής ενός σημείου ως προς την «απόλυτη» θέση του είναι τα σφάλματα οριζοντιογραφικής και υψομετρικής τοποθέτησης δχ και δh αντίστοιχα που ορίζονται ως εξής [6]:

$$\delta x = \sqrt{(X_{\rm K} - X_{\rm M})^2 + (Y_{\rm K} - Y_{\rm M})^2}$$
(4.1)

$$\delta \mathbf{h} = \mathbf{h}_{\mathrm{K}} - \mathbf{h}_{\mathrm{M}} \tag{4.2}$$

όπου, $(X,Y,h)_M$ είναι η θέση του σημείου, όπως προκύπτει από τη μελέτη εφαρμογής και $(X,Y,h)_K$ η θέση του σημείου, όπως εφαρμόσθηκε στο έδαφος. Η «σχετική» θέση των σιδηροτροχιών καθορίζεται από το εύρος γραμμής s και από την υπερύψωση της εξωτερικής ως προς την εσωτερική σιδηροτροχιά u. Η πιστοποίηση αυτών των δύο κατασκευαστικών μεγεθών γίνεται με υπολογισμό των σφαλμάτων εύρους της γραμμής και υπερύψωσης από τις σχέσεις:

$$\delta s = s_{\rm K} - s_{\rm M} \tag{4.3}$$

$$\delta \mathbf{u} = \mathbf{u}_{\mathrm{K}} - \mathbf{u}_{\mathrm{M}} \tag{4.4}$$



Σχήμα 8: Τοποθέτηση σιδηροτροχιών με τη βοήθεια σημείων αναφοράς. Figure 8: Setting out of tracks with respect to reference points.



Σχήμα 9: Οριστική τοποθέτηση σιδηροτροχιών με τη βοήθεια της τεχνικής PREFARAIL.

Figure 9: Setting out of tracks using the PREFARAIL technique.



Σχήμα 10: Σφάλμα οριζοντιογραφικής τοποθέτησης σιδηροτροχιών. Figure 10: Horizontal displacement in rail location.



Σχήμα 11: Σφάλμα υψομετρικής τοποθέτησης σιδηροτροχιών. Figure 11: Vertical displacement in rail location.

όπου s_M, u_M είναι το εύρος της γραμμής και η υπερύψωση των σιδηροτροχιών σε κάποια θέση της χάραζης όπως καθορίζεται στη μελέτη εφαρμογής, και s_K , u_K οι κατασκευαστικές τιμές των ίδιων μεγεθών στην ίδια θέση της χάραζης. Η επαλήθευση της ΜΚΚΣ στα καμπύλα τμήματα γίνεται ως εξής: για κάθε σιδηροτροχιά (αριστερή και δεξιά) μιας γραμμής υπολογίζεται διαδοχικά από τα στοιχεία της μελέτης εφαρμογής το θεωρητικό βέλος κάμψης pf_M (ως απόσταση σημείου από χορδή) που αναλογεί σε τμήμα της χάραξης μήκους 10 m. Κατ' αναλογία υπολογίζεται το πραγματικό βέλος κάμψης pf_K μετά την τοποθέτηση των σιδηροτροχιών. Ο έλεγχος εφαρμογής της ΜΚΚΣ στηρίζεται στο σφάλμα υπολογισμού του βέλους κάμψης που ορίζεται ως η διαφορά του θεωρητικού από το κατασκευασμένο βέλος κάμψης:

$$\delta pf = pf_{\rm K} - pf_{\rm M} \tag{4.5}$$

Στα σχήματα 10, 11, 12 και 13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ελέγχων σε ένα τμήμα της χάραξης μήκους 200 m, το οποίο περιλαμβάνει τρεις μικτές καμπύλες με διαδοχική εναλλαγή των στοιχείων κλωθοειδής καμπύλη – κυκλικό τόξο – κλωθοειδής καμπύλη – ευθυγραμμία . Από το σχήμα 10 προκύπτει ότι τα σφάλματα οριζοντιογραφικής τοποθέτησης δχ κυμαίνονται από -17 έως 13 mm με μέση τιμή -3,0 mm και τυπική απόκλιση 6,3 mm, όπου το πρόσημο δηλώνει τη σχετική θέση του σημείου, όπως εφαρμόσθηκε στο πεδίο σε σχέση με τη θεωρητική (από τη μελέτη εφαρμογής) θέση της σιδηροτροχιάς. Αντίστοιχα, από το σχήμα 11 προκύπτει ότι το σφάλμα υψομετρικής τοποθέτησης δh μεταβάλλεται $a\pi 6 - 12$ έως 9 mm με μέση τιμή -1 mm και τυπική απόκλιση 6,7 mm. Σημειώνεται ότι τα σφάλματα τοποθέτησης δχ και δh δεν οφείλονται αποκλειστικά σε λόγους που σχετίζονται με την εφαρμογή των σιδηροτροχιών στη φάση κατασκευής του έργου, αλλά και σε λόγους που αφορούν στη διαδικασία του ελέγχου (π.χ. σφάλματα κέντρωσης/κατακορύφωσης του οργάνου) – ωστόσο, είναι μικρά και καλύπτουν τις προδιαγεγραμμένες απαιτήσεις ακρίβειας [4, 11]. Το δεύτερο στοιχείο που προκύπτει από τα σχήματα 10 και 11 είναι ότι οι αντικριστές σιδηροτροχιές μιας γραμμής στην ίδια ΧΘ εμφανίζουν παρόμοια σφάλματα τοποθέτησης δχ και δh. Αυτό φανερώνει, όπως είναι αναμενόμενο, ότι οι αντικριστές σιδηροτροχιές έχουν τοποθετηθεί σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους γεγονός που επαληθεύεται και από το σχήμα 12.



Σχήμα 12: Σφάλμα υπερύψωσης (δu) και εύρους (δs) σιδηροτρο-χιών. Figure 12: Misclosures in superelevation (δu) and in track gauge(δs).



Σχήμα 13: Σφάλμα βέλους κάμψης σιδηροτροχιών. Figure 13: Misclosures in rise to chord values.

Ειδικότερα, από το σχήμα 12 προκύπτει ότι το σφάλμα εύρους τροχιάς κυμαίνεται, στην πλειονότητα των περιπτώσεων από -1 mm έως 2 mm ενώ, το σφάλμα υπερύψωσης υπερβαίνει ή υπολείπεται της θεωρητικής τιμής στη χειρότερη περίπτωση κατά 2 mm. Γενικά οι τιμές αυτές είναι μέσα σε αποδεκτά όρια. Ωστόσο, με δεδομένο ότι ο έλεγχος στρώσης διενεργείται μια φάση πριν από τη σκυροδέτηση υπάργει πάντα η δυνατότητα αποκατάστασης της σγετικής θέσης των σιδηροτροχιών όπου αυτό απαιτείται. Στο σχήμα 13 δίνονται οι διαφορές μεταξύ του θεωρητικού και του υλοποιημένου βέλους κάμψης δpf για κάθε 5 m κατά μήκος της χάραξης (βέλος κάμψης για τμήμα μήκους 10 m) για την αριστερή (δpf_{L-rail}) και δεξιά (δpf_{R-rail}) σιδηροτροχιά της ίδιας γραμμής. Η μέση διαφορά είναι της τάξης του 1 mm με τυπική απόκλιση 4 mm. Σημειακά, σε θέσεις μεγάλης καμπυλότητας (περιογή X Θ :13+720, r = 54 m) παρατηρούνται μεγαλύτερες διαφορές, που σε μεμονωμένες περιπτώσεις φθάνουν τα 11 mm. Αποδεικνύεται ότι, ακόμη και σε αυτές τις θέσεις η ΜΚΚΣ εφαρμόζεται με ακρίβεια καλύτερη από 95% (για r = 54 m και μήκος σιδηροτροχιάς L = 10 m το θεωρητικό βέλος κάμψης είναι 232 mm) – που όπως προκύπτει από το σχήμα 12 αρκεί ώστε το εύρος της γραμμής να μην αποκλίνει από την ονομαστική τιμή (s = 1435 mm) περισσότερο από +2/-1 mm.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μέθοδος που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία παρέχει μια μαθηματικά τεκμηριωμένη λύση για τον υπολογισμό κοπής και κάμψης σιδηροτροχιών έργων TPAM και ελαφριού METPO. Ειδικότερα:

- η προβολή της χάραξης από τον άξονα της γραμμής στις σιδηροτροχιές βασίζεται σε αναλυτικές μαθηματικές σχέσεις, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται σταθερό εύρος γραμμής s σε όλο το μήκος της χάραξης,
- η προσομοίωση των τόξων συναρμογής με κυκλικά τόξα αποδείχθηκε επαρκής και οικονομική λύση. Ειδικότερα, η χρησιμοποίηση κυκλικών τόξων μήκους έως 6 m (1/3 του μήκους της σιδηροτροχιάς) αποδείχθηκε ικανοποιητική ακόμη και για πολύ μικρές ακτίνες καμπυλότητας (r [50 m),
- η μέθοδος παρέχει στον ανάδοχο με απλό τρόπο, πλήρη στοιχεία για το λυγισμό και τη κοπή των σιδηροτροχιών.

Η κάμψη, η τοποθέτηση και ο έλεγχος εφαρμογής των σιδηροτροχιών στην οριστική τους θέση αντιμετωπίσθηκε ως ένα γενικευμένο πρόβλημα βιομηχανικής γεωδαισίας. Η ακρίβεια που επιτεύχθηκε καλύπτει τις προδιαγεγραμμένες απαιτήσεις. Ειδικότερα:

- οι σιδηροτροχιές τοποθετήθηκαν οριζοντιογραφικά και υψομετρικά με "απόλυτη" ακρίβεια καλύτερη από 30 mm,
- η «σχετική» θέση των σιδηροτροχιών εφαρμόσθηκε σε κάθε περίπτωση με ακρίβεια καλύτερη από +2/-1 mm για το εύρος γραμμής και ±3 mm για την υπερύψωση ακόμη και για μικρές ακτίνες καμπυλότητας (r [50 m).

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των ελέγχων η γεωδαιτική μεθοδολογία και η επιλογή των παραμέτρων ελέγχου στρώσης γραμμής που επιλέχθηκαν αποδείχθηκαν επιτυχείς. Ειδικότερα, η εφαρμογή της μεθόδου κατά τα τελευταία στάδια της κατασκευής παρέχει δυνατότητα να εντοπίζονται και να αποκαθίστανται σφάλματα στην τοποθέτηση των σιδηροτροχιών πριν τη σκυροδέτηση με προφανή οφέλη στο κόστος κατασκευής και στην ποιότητα του έργου. Η κατασκευή του σύγχρονου τροχιόδρομου της Αθήνας είναι το πρώτο παρόμοιο έργο που ολοκληρώνεται στην Ελλάδα. Υπό αυτή την έννοια η τεχνογνωσία που αποκτήθηκε στο αντικείμενο αποτελεί μοναδική και πολύτιμη εμπειρία.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Carels P., Dirven S., Vogiatzis C., Argyropoulos J. : Implementation of a **'Prefarail-Comfort' Vibration Isolation Embedded Track Solution for Athens Tramway**, International Conference Contemporary Tram and L.R.T. Systems, Patra, 2003.

2. CDM – YES AG – PREFARAIL: Association for the tramway Athens Project, CYPTRAMAT, ref. Qc2489-B/GR, 2001.

3. Esveld C.: Modern Railway Track, MRT Productions, 2001.

 European Committee for Standardization, Railway Applications / Track – Track Geometry Quality, European Standard prEN 13848-1/2/5. 2002-2004.

5. Kóhr G.: Προσωπική πληροφόρηση, 2003.

6. Kuhlmann H.: Alignment of Rails on Slab Track with Robotic Tacheometers, 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, Cairo, 2001.

Αγατζά-Μπαλοδήμου Α., Μπαλοδήμος Δ-Δ., Αραμπατζή Ο., Σταθάς
 Δ.: Γεωδαιτικά Δίκτυα Ελέγχου Βιομηχανικών Παραγώγων. Εφαρμογή

σε Σκάφος του Π-Ν, Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Σειρά Ι, τομ. 20 τευχ.1, σελ. 135-147.

8. Γκίκας Β., Σοιλεμέζογλου Γ.: Γεωμετρικός Υπολογισμός Κοπής και Κάμψης Σύγχρονων Συστημάτων Τραμ, International Conference Contemporary Tram and L.R.T. Systems, Patra, 2003.

9. Κάτσιος Δ.: Περιγραφή και Υποχρεώσεις στον Σχεδιασμό του Νέου Συστήματος Τραμ της Αθήνας, International Conference Contemporary Tram and L.R.T. Systems, Patra, 2003.

10. Μάλαμας Ν.: Προσωπική Πληροφόρηση, 2004.

11. Νικολαρέας Β.: Προσωπική Πληροφόρηση, 2004.

12. ΤΡΑΜ ΑΕ: Κατασκευή Έργων Πολιτικού Μηχανικού, Προμήθεια, Εγκατάσταση και θέση σε Λειτουργεία των Ηλεκτρομηχανολογικών Συστημάτων του Σύγχρονου Τροχιόδρομου (ΤΡΑΜ) και Μελέτες Εφαρμογής τους στη Μείζονα Περιοχή της Αθήνας, Τεχνική Περιγραφή Έργου, 2001.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστίες εκφράζονται στους κ. Σοϊλεμέζογλου Γ. και Κάτσιο Δ. από την εταιρεία μελετών ΝΑΜΑ Α.Ε. και στον κ. Περδικάρη Γ. από την κοινοπραξία TEPNA Α.Ε. – IMPREGILO S.p.A. (TIJV) για την πολύ καλή συνεργασία κατά την εκπόνηση του έργου, τις εύστοχες παρατηρήσεις τους κατά τη συγγραφή αυτού του άρθρου και τη διάθεση υλικού. Επίσης, ευχαριστίες εκφράζονται στους κ. Νικολαρέα Β. από την κοινοπραξία TIJV για τη βοήθεια σε ζητήματα σχετικά με τη διεξαγωγή των ελέγχων, στον κ. Μάλαμα Ν. για τη συνεργασία σε ζητήματα σχετικά με τον υπολογισμό των γεωδαιτικών δικτύων καθώς και στον κ. Κόhr G. από την εταιρεία SPIEKERMANN GmbH για τη συνεισφορά του στη διαδικασία του γεωμετρικού υπολογισμού των σιδηροτροχιών. Extended summary

An Approach to Rail-Cutting & Bending Design and Geodetic QC & Documentation during Rail Laying for Modern LRT Systems

V. GIKAS Lecturer N.T.U.A.

Abstract

This paper describes a method for preparing rail cutting plans, for setting out and for accurately positioning tracks during rail laying of modern LRT systems. The approach offered for rail cutting and bending design is based on integrated and analytical expressions whereas the techniques and test parameters concerned with quality control (QC) and documentation of rail laying positioning are based on geodetic methodology. Detection and identification of blunders in rail positioning as well as adoption of the final rail shape and position are accomplished by means of advanced surveying methods and precise leveling techniques. Test results based on the implementation of this method during the construction of the modern tramway of Athens are discussed.

1. INTRODUCTION

The overall success of the construction of a new transport system depends heavily on the level of accuracy with which 'as built' alignment parameters meet design specifications. In the context of railway systems, QC and documentation of rail laying is determined and assessed by monitoring the absolute (with respect to an earth fixed system) and the relative (for opposite rails in the same track) rail positions. Deviations in predefined track surveying parameters computed during construction from their nominal values are used to evaluate rail laying procedures and final quality in positions. In LRT and tram construction projects, on which this article is focused, track geometry is subject to additional limitations that affect setting out procedures and final rail positions. In similar projects, the demand for using small track radius (50 m or less) requires the rails to be bent suitably, to a certain degree, in order to fit the alignment.

In the first part of this paper the concept and a method for preparing rail cutting and bending plans as preparatory work for track laying are given. A complete suite of surveying procedures (based on geodetic methodology), which are used to measure and to compute track surveying *Submitted: July. 6, 2004 Accepted: April 5, 2005* parameters, is offered in the later part of this work. Finally, sample results and comparisons of the implementation of the method during the construction of the modern tramway of Athens are given.

2. RAIL CUTTING AND BENDING DESIGN

In the technique discussed in this article, rail cutting design is accomplished in four basic steps [5, 8]. In the first step, track axis geometry is projected onto the rails (figure 2). This merely involves computation of rail length and their geometry (formulae 3.1, 3.2, 3.3). In the next step, the rail joints are defined by determining their stationing (formulae 3.5, 3.6, 3.7). This is important during rail laying on site. Finally, the third and fourth steps deal with the computation of the bending parameters. For rails with a radius less than 250 m, the inscribing of rail rise is generated as an approximate value (formula 3.14). However, in the case of spiral curves (clothoids) the geometry is cumbersome - hence, as shown in figure 3, a series of circles must be substituted for the spiral curves so that clothoid geometry is described with sufficient accuracy (formulae 3.12 and 3.13). Figure 4 depicts a sample rail cutting plan prepared for the new tramway of Athens.

3. THE ATHENS TRAM PROJECT

3.1. General Description

The new tramway of Athens is a 28 km long light rail transit system. One of the lines starts from the city centre and crosses urbanized, densely populated areas. It is connected to the other line, which runs along the sea coast. The coast line serves both residential as well as recreational areas, beaches and sport facilities to the north and south side of it respectively. Critical design parameters of the Athens tramway project are [9]:

- minimum radius of horizontal curves, $r_{Hmin} = 25 \text{ m}$,
- maximum longitudinal inclination, $g_{max} = 6\%$,
- maximum desired superelevation (cant), $u_{max} = 150$ mm.

3.2. Geodetic Networks and Setting out Parameters

A geodetic control network comprising a total number of 28 stations was established in the area to serve as a geodetic reference for the construction of the project – see figure 6 [10]. The triangulation network expands in the greater area of the construction site, having its nodes evenly distributed along the tram corridor with an average distance between nodes of 1 km. The network was measured by means of static GPS techniques. Four dual frequency GPS receivers were used to increase production efficiency and to minimize observation sessions. Finally, the network solution was tied to the National Geodetic Network and grid coordinates were produced in the EGSA 87 reference system. Precise leveling techniques were used to provide vertical control. A total number of 68 reperes were established along the new tramway path at an average distance of about 400 m apart. In order to exploit observation redundancy and to improve the overall quality of the solution, final orthometric heights were derived from an integrated least squares solution.

Once both horizontal and vertical control networks were established and verified, rail laying was performed from reference points established within or at a short distance from the tram corridor (figures 7, 8, 9). The rails were laid to fit their nominal positions by means of precise leveling techniques and the implementation of the PREFARALE system [1, 2].

3.3. Geodetic Documentation of Rail Laying

Figures 10 and 11 depict slew and lift values, respectively, computed for a complex curve consisting of a straight line, an arc of a circle and two clothoid elements.

Mean differences in horizontal and vertical displacements are -3 mm and -1 mm with standard deviations of 6.3 mm and 6.7 mm respectively. The resulting differences in track gauge and superelevation are shown in figure 12. They have an approximately zero mean and only occasionally reach 2 mm in track gauge and 2 mm in superelevation. Finally, it can be seen from figure 13 that the differences in rise to chord length (which correspond to 10 m long rail segments) exhibit a mean difference of 1 mm with a standard deviation of 4 mm.

4. CONCLUSIONS

Key conclusions pertaining to this study can be summarized as follows: the rail cutting and bending technique as well as the specific parameters adopted in this project to simulate spiral curves shape by circular arcs were proved to be satisfactory still for very small curve radius ($r\leq 50$ m). The surveying techniques implemented during rail laying and the parameters used to monitor rail laying positioning accuracy were proved to be successful. This is of great importance, especially in highlighting blunders in rail laying in the final stages of the construction; consequently, the contractor can be sufficiently confident that the rails are placed successfully to their nominal position prior to concreting. This LRT project is the first ever conducted in Greece. In that sense, the expertise and the experience gained is unique.

Slew (δx) and lift (δh) are used to verify rail laying positioning quality in absolute terms. They refer to the horizontal and vertical displacements, respectively, of the actual (constructed) rail location from its nominal (designed) location. Misclosures in track gauge (δs) and in superelevation (δu) between actual and nominal values determine, to some extent, the quality of relative rail positioning [6]. Another parameter which is important in evaluating continuity in rail curvature along the track is the difference in rise to chord length derived from the designed elements compared to that surveyed at the construction site. Usually, rise to chord values refer to rail segments of constant length (e.g. 10 m).

V. Gikas

Lecturer N.T.U.A., Dept. of Rural and Surveying Engineering, 9 Heroon Polytechniou Str., 15780 Zographou, Athens.