

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ



**ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΕΠΙΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΞΗΣ ΓΙΑ
ΓΡΑΜΜΕΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΧΥΤΗΤΩΝ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΖΑΒΑΛΑΣ ΘΕΟΔΩΡΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

ΛΥΜΠΕΡΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2006

ΣΥΝΟΨΗ

Τίτλος : « Ανάλυση τεχνικών χαρακτηριστικών επιδομής και χάραξης για γραμμές συμβατικών και υψηλών ταχυτήτων »

Όνομα : Τζαβαλάς Θεόδωρος

Επόπτης: Λυμπέρης Κωνσταντίνος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

2006 Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να επισημανθούν και να αναλυθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά τόσο της επιδομής όσο και της χάραξης σε γραμμές μικτής κυκλοφορίας συρμών, συμβατικούς, εμπορευματικούς και συρμούς υψηλών ταχυτήτων. Προς τούτο, έγινε ανάλυση των δυο συστημάτων επιδομής που επικρατούν σήμερα, της Σταθερής Επιδομής και της Σκυρογραμμής με βάση την δομή της κατασκευής τους και τις ιδιότητες των στοιχείων από τα οποία αποτελούνται. Έγινε σύγκριση των βασικών χαρακτηριστικών της επιδομής των συστημάτων αυτών και της συμπεριφοράς τους στην καταπόνηση από συρμούς διαφορετικών ταχυτήτων. Αναλύθηκαν τα βασικά στοιχεία για την χάραξη της σιδ/κης γραμμής και έγινε κατάλληλος διαχωρισμός στις τιμές των στοιχείων αυτών με κριτήριο την ταχύτητα, την άνεση, την ασφάλεια και την αποδοτικότητα του κόστους των συρμών στην γραμμή.

Λέξεις κλειδιά: Σταθερή Επιδομή, Σκυρογραμμή, υψηλές ταχύτητες, δείκτης αντίδρασης εδάφους, έρμα, στρωτήρες, ελαστικό υπόθεμα, σύνδεσμος, τύπος Rheda, 4^η δύναμη, υπερύψωση, ανεπάρκεια υπερύψωσης, ακτίνα καμπύλης, κυβική παραβολή, καμπύλη συναρμογής, μήκος σύνδεσης.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να εντοπισθούν και να αναλυθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά της επιδομής και χάραξης σε γραμμές συμβατικών και υψηλών ταχυτήτων, ώστε να δοθούν οι διαφοροποιήσεις στη κατασκευή και λειτουργία της γραμμής ανάλογα με την ταχύτητα, την άνεση και την ασφάλεια. Έγινε αρχικά μια αναδρομή στην ιστορία των σιδ/μων και ακολούθησε αναφορά στους παράγοντες που οδήγησαν στην πραγματοποίηση των υψηλών ταχυτήτων και τον ρόλο της υψηλής ταχύτητας.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας έγινε η ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών της επιδομής της γραμμής, δόθηκαν τα στοιχεία που την συνθέτουν, οι ιδιότητες αυτών και ο ρόλος τους στην περίπτωση συμβατικών και υψηλών ταχυτήτων. Αναλύθηκαν τα δυο κυριότερα συστήματα επιδομής της γραμμής, η Σταθερή Επιδομή (Σ.Ε.) και η Σκυρογραμμή και πραγματοποιήθηκε σύγκριση αυτών ως προς το κόστος και την ποιοτική απόδοσή τους. Αποτυπώθηκαν οι διάφοροι τύποι Σταθερής Επιδομής σε Ευρωπαϊκές χώρες και δόθηκε σημασία περισσότερο στον πλέον διαδομένο τύπο Σ.Ε. στην Ευρώπη για γραμμές υψηλών ταχυτήτων, την Σ.Ε. τύπου RHEDA.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύθηκαν εκείνα τα χαρακτηριστικά που συμβάλουν στην πραγματοποίηση της χάραξης της σιδ/κης γραμμής. Με βάση το Ευρωπαϊκό Πρότυπο και τους κανόνες για τον σχεδιασμό των γραμμών, αντλήθηκαν τα περισσότερα στοιχεία και παρατηρήθηκαν διαφορές ως προς τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές αυτών σε σχέση με την ταχύτητα των συρμών και την ασφάλεια. Αναλύθηκε η συμπεριφορά των συρμών στις καμπύλες και στην κίνηση ενός αμαξώματος σε καμπύλη συναρμογής.

Τέλος δόθηκαν τα συμπεράσματα και γενικά σχόλια για συμβατικούς και συρμούς υψηλών ταχυτήτων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για την πραγματοποίηση αυτής της εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω πρώτα από όλα τον επιβλέπων καθηγητή μου τον **κ. Λυμπέρη Κωνσταντίνο ΛΕΚΤΟΡΑ** του **Ε.Μ.Π.** που χωρίς την βοήθειά του η εργασία θα ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στον **κ. Ταλαμπέκο Γεώργιο, Διπλ. Πολ. Μηχ.** και **Σύμβουλο Σιδ/κων Έργων της ΕΡΓΟΣΕ**, για τις πολύτιμες βιβλιογραφίες που μου παρείχε και τις πολύωρες συζητήσεις μας στα θέματα Σταθερής Επιδομής και Σκυρογραμμής υψηλών ταχυτήτων.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την **κ. Ασημακοπούλου Τασία, Πολ. Μηχ.** στην Διεύθυνση Γραμμής, για τις βιβλιογραφίες και τις απαντήσεις σε διάφορες απορίες μου.

Τον **κ. Τσουκαντά Σ., Πολ. Μηχ.** και καθηγητή του **Ε.Μ.Π.**, για τις βιβλιογραφίες του.

Και τέλος, τους συμφοιτητές μου για την όποια βοήθειά τους σε μεταφράσεις ξενόγλωσσων κειμένων.

Για οποιαδήποτε ατέλεια της εργασίας αυτής, κανείς από τους προαναφερόμενους δεν φέρει ευθύνη.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή

- 1.1 Ιστορική αναδρομή.....σελ.1
- 1.2 Πρώτες κατασκευές υψηλών ταχυτήτων.....σελ.1
- 1.3 Έννοια υψηλής ταχύτητας.....σελ.3
- 1.4 Προβλεπόμενη ανάπτυξη του δικτύου υψηλών ταχυτήτων στην Ευρώπησελ.7
- 1.5 Σύγκριση με άλλα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς (MMM).....σελ.9
- 1.6 Ποιες κρίνονται σαν κύριες απαιτήσεις για την εφαρμογή δικτύων υψηλών ταχυτήτωνσελ.13
- 1.7 Σχεδιασμός δικτύου υψηλών ταχυτήτων στην Ελλάδα –Γεωγραφική σπουδαιότητα του δικτύου.....σελ.14
- 1.8 Προσφορά – επιτυχία των συρμών υψηλών ταχυτήτων.....σελ.15
- 1.9 Το κόστος κατασκευής γραμμών υψηλών ταχυτήτων.....σελ.16
- 1.10 Μεθοδολογία προσέγγισης και ανάπτυξης του θέματος της εργασίας.....σελ.17

2. Τεχνικά χαρακτηριστικά συμβατικών γραμμών και υψηλών ταχυτήτων (Επιδομή /Υποδομή)

- 2.1 Γενικά στοιχεία – Ορισμοί επιδομής / υποδομής.....σελ.20
- 2.2 Τύποι επιδομής για υψηλές ταχύτητες –Σύγκριση.....σελ.21
- 2.3 Τύποι Σταθερής Επιδομής (Σ.Ε.) –Δοκιμαστικές στρώσεις - Αντικατάσταση κλασσικής σκυρογραμμής από Σ.Ε.....σελ.24

2.4	Γιατί και πως επιλέγει η Σ.Ε. για να αντικαταστήσει την κλασσική Σκυρογραμμή	σελ.29
2.5	Χαρακτηριστικά Σταθερής Επιδομής (Σ.Ε.) – Υποδομής.....	σελ.34
2.6	Σταθερή Επιδομή τύπου <i>RHEDA</i>	σελ.43
2.7	Γενική περιγραφή Σ.Ε. με προκατασκευασμένες πλάκες προεντεταμένου σκυροδέματος (σύστημα Σ.Ε. <i>BÖGL</i>).....	σελ.47
2.8	Σύγκριση κατασκευαστικού κόστους Σ.Ε. με Σκυρογραμμή.....	σελ.51
2.9	Σκυρογραμμή υψηλών ταχυτήτων – Σύγκριση με συμβατικούς σιδ/μους.....	σελ.52
2.9.1	Ο ρόλος του <i>ελαστικού υποθέματος</i> και του <i>συνδέσμου</i> στην συμπεριφορά της γραμμής.....	σελ.53
2.9.2	Γενικά αίτια επιδείνωσης της κατάστασης της γραμμής.....	σελ.66
2.9.3	Αξιολόγηση της μακράς διάρκειας διατήρησης της κατάστασης της γραμμής.....	σελ.67
2.9.4	Αποτίμηση με την εκθετική μέθοδο των διαφόρων τύπων επιδομής.....	σελ.68
2.10	Έρμα – Χαρακτηριστικά έρματος και ο ρόλος του στην συμπεριφορά της γραμμής.....	σελ.80
2.10.1	Εισαγωγή των δονήσεων (ταλαντώσεων) στο έρμα	σελ.83
2.10.2	Επιρροή της κοκκομετρικής διαβάθμισης του έρματος.....	σελ.84
2.11	Είδη φορτίσεων στο σύστημα στρωτήρα – σιδηροτροχιά	σελ.87
2.11.1	Υπολογισμός φορτίου για διαστασιολόγηση επιδομής.....	σελ.89
2.11.2	Σύγκριση διάφορων τύπων στρωτήρων με βάση τα φορτία που δέχονται.....	σελ.92
2.12	Θεωρία στην οποία στηρίχθηκε η έρευνα των Γερμανών για τις ασκούμενες δυνάμεις και τις συχνότητες.....	σελ.95

2.13	Σχέση ταχύτητας και δύναμη επαφής όνυχα τροχού και σιδηροτροχιάς.....	σελ.98
------	---	--------

3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά συμβατικών γραμμών και υψηλών ταχυτήτων (χάραξη - διαστασιολόγηση)

3.1	Γενικά στοιχεία.....	σελ.101
3.2	Κατηγορίες κίνησης.....	σελ.103
3.3	Παράμετροι σχεδιασμού χάραξης της γραμμής.....	σελ.104
3.4	Προτεινόμενες οριακές τιμές και μέγιστες (ή ελάχιστες) οριακές τιμές για τις παραμέτρους σχεδίασης γραμμών.....	σελ.106
3.4.1	Ακτίνα οριζόντιας καμπύλης R.....	σελ.106
3.4.2	Υπερύψωση D.....	σελ.109
3.4.3	Υπερύψωση σε καμπύλες – θεωρητική απόδειξη υπερύψωσης.....	σελ.111
3.4.4	Ανεπάρκεια υπερύψωσης l.....	σελ.120
3.4.5	Ρυθμός μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου dD/dt	σελ.133
3.4.6	Ρυθμός μεταβολής υπερυψώσεων συναρτήσει του μήκος dD/dl	σελ.136
3.4.7	Ρυθμός μεταβολής της ανεπάρκειας υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου dl/dt	σελ.137
3.4.8	Μήκος στοιχείων ευθυγράμμισης L_i (κυκλικές καμπύλες και ευθείες).....	σελ.140
3.5	Κάθετες καμπύλες.....	σελ.142
3.5.1	Ακτίνες κάθετης καμπύλης R_v	σελ.142
3.6	Καμπύλες συναρμογής	σελ.147
3.6.1	Κυβική παραβολή για συμβατικές γραμμές και γραμμές υψηλών ταχυτήτων.....	σελ.147
3.6.2	Ανάλυση της τρισδιάστατης κίνησης ενός σιδ/κου αμαξώματος (βαγόνι) κατά μήκος της κυβικής παραβολής.....	σελ.154
3.6.3	Ασυνέχεια κυβικής παραβολής – τιμές σχεδιασμού για	

	δυσμενή κατάσταση γραμμών υψηλών ταχυτήτων	σελ.163
3.7	Σύνδεση δυο αντίρροπων κυκλικών καμπυλών με ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα.....	σελ.166
3.8	Κατά μήκος κλίσεις.....	σελ.169
3.9	Η σημασία της διατήρησης της υφιστάμενης χάραξης στα σιδ/κα δίκτυα – Συρμοί με ανακλινόμενο αμάξωμα.....	σελ.173

4. Συμπεράσματα

4.1	Γενικά σχόλια για την ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών συμβατικών και συρμών υψηλών ταχυτήτων.....	σελ.176
-----	--	---------

5. Παράρτημα

5.1	Γενικός πίνακας συμβολών.....	σελ.181
5.2	Τυπολόγιο.....	σελ.182

6. Βιβλιογραφία

σελ.194

ΕΙΚΟΝΕΣ

1. Σ.Ε. συστήματος PACT στους Αγγλικούς σιδ/μους.....σελ.25
2. Rheda, άνευ σκάφης, σε μήκος 400m.....σελ.26
3. Προκατασκευασμένες φέρουσες πλάκες σκυροδέματος με εγκάρσια προένταση , σε μήκος 430 m.....σελ.27
4. Προκατασκευασμένα πλαίσια εκ σκυροδέματος.....σελ.27
5. Hochtief/Schreck-Mieves.....σελ.28
6. Heitkamp.....σελ.28
7. Züblin BTE.....σελ.28
8. System Clailsheim FFC.....σελ.29
9. Betonschwellen auf ATS.....σελ.29
10. Heilit-Woerner.....σελ.29
11. Διάταξη στρώσεων Σ.Ε. επάνω σε επίχωμα.....σελ.30
12. Εσχάρα γραμμής σε σκυρογραμμή.....σελ.31
13. Κενά που μετρήθηκαν κάτω από αφόρτιστους στρωτήρες στο Σ. Σταθμό Licherode (1995) της νέας γραμμής Hannover – Würzburg.....σελ.33
14. Σύνδεσμος σιδ/χίας -στρωτήρα Ioarv 300-1 με τα επιμέρους στοιχεία.....σελ.35
15. Παραδείγματα για δυνατότητα ρύθμισης στην έδραση της σιδ/χίας του συνδέσμου Ioarv 300-1.....σελ.37
16. Διάταξη στρώσεων Σ.Ε. και μέτρο ελαστικότητας αυτών.....σελ.41
17. Σύνδεσμος Ioarv 300-1 των DB με ελατηριωτά αγκύρια SKL.....σελ.42
18. Εσχάρα γραμμής Σ.Ε. τύπου Rheda.....σελ.45

19. Τύπος Σταθερής Επιδομής RHEDA 2000 και κλασσικός τύπος RHEDA.....σελ.46	σελ.46
20. Σταθερή Επιδομή με προκατασκευασμένες πλάκες (σύστημα Bögl).....σελ.49	σελ.49
21. Σύνδεσμος E14 → σήμερα Skl 14.....σελ.56	σελ.56
22. Σύνδεσμος Skl 12 της Vossloh σε μεταλλική πλάκα τύπου K, επί ξύλινου στρωτήρα.....σελ.60	σελ.60
23. Τομή συνδέσμου Skl 12 σε μεταλλική πλάκα τύπου K, επί ξύλινου στρωτήρα.....σελ.60	σελ.60
24. Σύνδεσμος Skl 14 της Vossloh σε στρωτήρα από σκυρόδεμα.....σελ.61	σελ.61
25. Τομή συνδέσμου Skl 14 της Vossloh σε στρωτήρα από σκυρόδεμα.....σελ.62	σελ.62
26. Διπλή ελατηριωτή ροδέλα.....σελ.64	σελ.64
27. Συνήθη «σφάλματα» σε γραμμή επί έρματος.....σελ.66	σελ.66
28. Στρωτήρας B75 (Spannbetonschwelle).....σελ.68	σελ.68
29. Πιέσεις των IC και ICE αντίστοιχα στην κλίσης έρματος.....σελ.69	σελ.69
30. Κεφαλή στρωτήρα και πλάτος κατάληψης c.....σελ.85	σελ.85
31. Δυνάμεις στην επιδομή.....σελ.88	σελ.88
32. Κατανομή φορτίο τροχού στους στρωτήρες.....σελ.89	σελ.89
33. Δίνεται το πάχος h μεταξύ επαφής όνυχα τροχού και σιδ/χιας σε διάφορες φάσεις από την t_1 , αρχική φάση, μέχρι την εμφάνιση του πάχους στην φάση t_6 (τελική φάση).....σελ.99	σελ.99
34. Απεικόνιση των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε συμβατικό (αριστερά) και ανακλινόμενο (δεξιά) συρμό. Στην τελευταία περίπτωση, η συνιστώσα του βάρους $G \sin(\alpha + \gamma)$ αντισταθμίζει ένα σημαντικότερο ποσοστό της φυγόκεντρης δύναμης F που ασκείται στους επιβάτες, λόγω της πρόσθετης κλίσης του αμαξώματος προς το εσωτερικό της καμπύλης κατά γωνία γσελ.175	σελ.175

ΣΧΗΜΑΤΑ

- 1)ΣΧΗΜΑ 1. Ρεκόρ ταχύτητας στον σιδηρόδρομο (km/h).....σελ.6
- 2)ΣΧΗΜΑ 2. Χρόνοι διαδρομής (με αφετηρία το Παρίσι) μετά την υλοποίηση του Ευρωπαϊκού σιδηροδρομικού δικτύου υψηλής ταχύτητας.....σελ.8
- 3)ΣΧΗΜΑ 3. Σιδηροδρομική γραμμή: «σιδερένια» οδός μεταφοράς – Δομή σιδ/κης γραμμή.....σελ.20
- 4)ΣΧΗΜΑ 4.Εγκάρσια τομή σιδ/κης γραμμής στη θέση σιδ/χιας.....σελ.22
- 5)ΣΧΗΜΑ 5. Σταθερή Επιδομή τύπου Rheda.....σελ.44
- 6)ΣΧΗΜΑ 6α. Δυνάμεις που ασκούνται στο αμάξωμα σε κυκλική κίνηση ενός συρμού.....σελ.112
- 7)ΣΧΗΜΑ 6β. Υπερύψωση της εξωτερικής σιδ/χιας και αρχή της ισορροπίας σε καμπύλη.....σελ.112
- 8)ΣΧΗΜΑ 7. Εγκάρσιες και οριζόντιες δυνάμεις ψευδό-ολίσθησης σε καμπύλη τροχιά ενός σιδ/κου αμαξώματος.....σελ.114
- 9)ΣΧΗΜΑ 8. Σύστημα δισδιάστατο Oxy για την εύρεση της εξίσωσης της καμπύλης μετάβασης.....σελ.148
- 10)ΣΧΗΜΑ 9. Μοντέλο απλοποιημένο του σιδ/κου αμαξώματος στην περίπτωση κίνησής του στην καμπύλη μετάβασης σε τρισδιάστατο σύστημα αξόνων.....σελ.155
- 11)ΣΧΗΜΑ 10. Μοντέλο απλοποιημένο του σιδ/κου αμαξώματος στην περίπτωση κίνησής του στην καμπύλη μετάβασης σε τρισδιάστατο σύστημα αξόνων σε κυλινδρική κίνηση.....σελ.158
- 12)ΣΧΗΜΑ 11. Μοντέλο απλοποιημένο του σιδ/κου αμαξώματος στην περίπτωση κίνησής του στην καμπύλη μετάβασης σε τρισδιάστατο σύστημα αξόνων σε ταλαντωτική κίνηση.....σελ.160
- 13)ΣΧΗΜΑ 12. Μοντέλο απλοποιημένο του σιδ/κου αμαξώματος στην περίπτωση κίνησής του στην καμπύλη μετάβασης σε τρισδιάστατο σύστημα αξόνων σε περιστροφική κίνηση γύρο από τον άξονα του αμαξώματος.....σελ.162
- 14)ΣΧΗΜΑ 13. Σύνδεση κυκλικής καμπύλης και καμπύλης μετάβασης με μια καθυστέρηση m σε δισδιάστατο σύστημα αξόνων.....σελ.164

**15)ΣΧΗΜΑ 14. Σύνδεση δυο αντίρροπων κυκλικών καμπυλών με
ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα.....σελ.166**

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ

- 1)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1. Η εμπορική εξέλιξη των συρμών υψηλών ταχυτήτων στην Ευρώπη και την Ιαπωνία.....σελ.5
- 2)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2. Προβλεπόμενη ανάπτυξη του δικτύου υψηλών ταχυτήτων στην Ευρώπη.....σελ.7
- 3)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3. Τα όρια ανταγωνιστικότητας των συμβατικών συρμών, συρμών υψηλών ταχυτήτων και αεροπλάνου.....σελ.11
- 4)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4. Η μείωση του χρόνου διαδρομής σε συνάρτηση με την αύξηση της ταχύτητας.....σελ.12
- 5)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5. Έρευνα ικανοποίησης πελατών – σύγκριση υπηρεσιών συρμών AVE / Ισπανία – Αεροπορικό ταξίδι.....σελ.16
- 6)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. Το κόστος κατασκευής γραμμών υψηλών ταχυτήτωνσελ.17
- 7)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7. Ελαστικότητα των διαφόρων μερών της επιδομής σκυρογραμμής στην επιφάνεια καταστρώματος νέων γραμμών....σελ.54
- 8)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8. Απόκριση ελαστικού υποθέματος Zw 700 (P) για 20°C.....σελ.58
- 9)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9. Καμπύλες απόκρισης αγκυρίου K (Fe6) σε σύγκριση με τα αγκύρια Sk14 και Sk12.....σελ.59
- 10)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10. Βύθιση του αγκυρίου K σε εκατοστά του mm.....σελ.63
- 11)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11. Μεταβολή της κατάστασης της γραμμής με 4^η δύναμη.....σελ.70
- 12)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12. Μεταβολή της κατάστασης της γραμμής με 2^α δύναμη.....σελ.71
- 13)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13. Τάση στο πέλμα της σιδ/χιας σ^* συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C.....σελ.75
- 14)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14. Βύθιση γ^* του στρωτήρα στο έρμα συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C.....σελ.77
- 15)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15. Πίεση p^* στην επιφάνεια κάτω από τον στρωτήρα συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C.....σελ.77

- 16)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16. Απεικόνιση της συνισταμένης πραγματικής δονητικής ταχύτητας με διαφορετικές ταχύτητες συρμών.....σελ.83
- 17)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17. Η επιρροή της κοκκομετρικής διαβάθμισης του έρματος στην εγκάρσια αντίσταση της γραμμής..... σελ.86
- 18)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18. Σύγκριση πλευρικής αντίστασης τύπων στρωτήρων όπως προκύπτει από την ερευνά D117 του ORE.....σελ.94
- 19)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19. Απόκριση της γραμμής στη συχνότητα του φορτίου.....σελ.96
- 20)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20. Επιρροή της ταχύτητας στην δύναμη επαφής όνυχα τροχού και σιδ/χιας (ακτίνα εκτροπής της αλλαγής 7000m, φορείο κεντρικό, γωνία περιστροφής γύρω από τον άξονα μηδενική, $h=38mm$σελ.98
- 21)ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21. Μέγιστη ταχύτητα V συναρτήσει της ακτίνας R και της μη αντισταθμισμένης πλευρικής επιτάχυνσης a_q σε καμπύλη τροχιά..... σελ.120
- 22) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22. Υπερύψωση για μικτή κυκλοφορία συρμών διάφορων ταχυτήτων ($V_{max}=300km/h$, $V_{min}=100km/h$).....σελ.126
- 23) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23. Καθορισμός της κανονικής υπερύψωσης D_kσελ.128
- 24) ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24. Διάγραμμα ταχύτητας – κατά μήκος κλίσης, για διάφορους τύπους σιδ/κων οχημάτων.....σελ.172

ΠΙΝΑΚΕΣ

- 1) ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Μειώσσει του χρόνου διαδρομής για την γραμμή Παρίσι – Λυών (511 Km/h).....σελ.9
- 2) ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Μειώσσει του χρόνου διαδρομής για την γραμμή ΤΟΚΥΟ- OSAKA(515km).....σελ.9
- 3) ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Συγκριτικοί χρόνοι διαδρομής από το κέντρο μιας πόλης στο κέντρο μιας άλλης μεταξύ σιδηρόδρομου, αεροπλάνου, αυτοκίνητου για τον άξονα Παρίσι-Λυών.....σελ.10
- 4) ΠΙΝΑΚΑΣ 4. Εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων από τα διάφορα σιδηροδρομικά δίκτυα της Ευρώπης πριν κάποια χρόνια.....σελ.13
- 5) ΠΙΝΑΚΑΣ 5. Δείκτης αντίδρασης εδάφους για παλαιές, ανακαινισμένες και νέες γραμμές.....σελ.52
- 6) ΠΙΝΑΚΑΣ 6. Η μεταβολή της καταπόνησης για την τάση στην σιδ/χια, την βύθιση του στρωτήρα στο έρμα και την πίεση στην επιφάνεια κάτω από τον στρωτήρα ,στην μεταβολή του δείκτη αντίδρασης εδάφους.....σελ.76
- 7) ΠΙΝΑΚΑΣ 7. Ο ρόλος της αύξησης του πάχους του έρματος (ανύψωση) γραμμής, σε περίπτωση κακής υποδομής.....σελ.82
- 8) ΠΙΝΑΚΑΣ 8. Τιμές που παίρνει η υπερύψωση με βάση τον διαχωρισμό των συρμών ανάλογα με το είδος τους και την ταχύτητά τους.....σελ.110
- 9) ΠΙΝΑΚΑΣ 9. Η οριακές τιμές της ανεπάρκειας υπερύψωσης ανάλογα με τον διαχωρισμό των συρμών ως προς τις ταχύτητες.....σελ.122
- 10) ΠΙΝΑΚΑΣ 10. Τιμές του ρυθμού μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικά είδη ταχυτήτων σε υπερύψωση με γραμμική μεταβολή της κλίσης εδάφουςσελ.134
- 11) ΠΙΝΑΚΑΣ 11. Τιμές του ρυθμού μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικά είδη ταχυτήτων σε υπερύψωση με μη γραμμική μεταβολή της κλίσης εδάφουςσελ.135
- 12) ΠΙΝΑΚΑΣ 12. Τιμές του ρυθμού μεταβολής της ανεπάρκειας της υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικά είδη ταχυτήτων.....σελ.139

13) ΠΙΝΑΚΑΣ 13. Τιμές για το μήκος των στοιχείων ευθυγράμμισης.....σελ.141

14) ΠΙΝΑΚΑΣ 14. Τιμές ακτίνας κάθετης καμπύλης για διαφορετικές ταχύτητες συρμών.....σελ.144

15) ΠΙΝΑΚΑΣ 15. Τιμές της κάθετης επιτάχυνσης ανάλογα με τις ταχύτητες των συρμών.....σελ.146

16) ΠΙΝΑΚΑΣ 16. Μέγιστη υπερύψωση της εξωτερικής σιδ/χιας για ταχύτητες συμβατικών συρμών.....σελ.152

17) ΠΙΝΑΚΑΣ 17. Δυσμενής τιμές για γραμμές υψηλών ταχυτήτων στα μεγέθη R_d , L_S , $y(F_{\text{παρ.}})$, $y(F_{\text{κύκλου}})$, Δyσελ.165

18) ΠΙΝΑΚΑΣ 18. Τιμές των R_d , L_S , L_t , $v_{\text{παρ.}}$, $\kappa_{\text{κύκλου}}$, Δy για γραμμές υψηλών ταχυτήτωνσελ.166

19) ΠΙΝΑΚΑΣ 19. Τιμές που παίρνει το τριγωνομετρικό C, για διαφορετικές θέσεις στην σύνδεση κυκλικής καμπύλης και παραβολής.....σελ.169

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ιστορική αναδρομή

Από την εμφάνιση της ανθρώπινης δραστηριότητας μέχρι σήμερα, η ταχεία και ασφαλής μεταφορά ανθρώπων και αγαθών υπήρξε επιδίωξη κάθε οργανωμένης κοινωνίας. Κατά γενική αναγνώριση βασικές καινοτομίες στην ανάπτυξη των μεταφορών υπήρξαν οι ανακαλύψεις του τροχού, του σιδηρόδρομου και του αεροπλάνου. Ο σιδηρόδρομος με την σημερινή του μορφή εμφανίσθηκε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα στα Αγγλικά ορυχεία.

Η ανάπτυξη του σιδηρόδρομου επηρεάσθηκε καθοριστικά από τη βιομηχανική επανάσταση του ατμού και την εντατική εκμετάλλευση των ορυχείων άνθρακα και σιδήρου. Έτσι οι πρώτες σιδηροδρομικές μεταφορές άρχισαν να λειτουργούν στις περισσότερες Ευρωπαϊκές χώρες περί στο 1830 (στην χώρα μας αυτό θα γίνει πολύ αργότερα, το 1869, με την γραμμή Αθήνα -Πειραιά) και στα περισσότερα σιδηροδρομικά δίκτυα η μέγιστη πυκνότητά τους παρατηρείται στις αρχές του εικοστού αιώνα. Μοχλό για την εντυπωσιακή εξέλιξη του σιδηρόδρομου αποτέλεσε η υψηλή (για την τότε εποχή) ταχύτητα που έδινε τη δυνατότητα γρήγορων συνδέσεων. Ήδη, οι ατμοκίνητες μηχανές κατάφεραν (σε δοκιμαστικές διαδρομές) μέγιστες ταχύτητες εντυπωσιακές: 100 km/h το 1835 στην Αγγλία, 144 km/h το 1890 στην Γαλλία, 213 km/h το 1903 στην Γερμανία. Παρόλο που οι μέγιστες ταχύτητες εκμετάλλευσης ήταν αρκετά μικρότερες (το $1/2 \div 2/3$ της μέγιστης δοκιμαστικής), συνέβαλαν στην αλματώδη ανάπτυξη των σιδηροδρομικών μεταφορών.

Η εφαρμογή της ηλεκτροκίνησης στις αρχές του εικοστού αιώνα επέτρεψε την περαιτέρω ανάπτυξη των σιδηροδρόμων, ενώ η ανάπτυξη της σηματοδότησης και κεντρικής τηλεδιοίκησης ήδη από το τέλος του μεσοπολέμου έδωσε κατά τη δεκαετία του 1950 στο σιδηρόδρομο τη σημερινή μορφή. [1]

1.2 Πρώτες κατασκευές υψηλών ταχυτήτων

Από νωρίς ο σιδηρόδρομος κατάφερε να πετύχει εντυπωσιακές ταχύτητες. Θα πρέπει να αναφερθούν και δυο μέγιστες τιμές ταχυτήτων που επιτεύχθηκαν χάρη στην ηλεκτροκίνηση σε δοκιμαστικές διαδρομές: το 1955 οι Γαλλικές αμαξοστοιχίες BB 9004 και CC 7107 ξεπερνούσαν το φράγμα των 330 km/h και 380 km/h στις 26 Φεβρουάριου 1981. Οι ταχύτητες αυτές, που επιτεύχθηκαν κατά την διάρκεια δοκιμαστικών διαδρομών πάνω στο κοινό σιδηροδρομικό δίκτυο, δείχνουν τις μεγάλες δυνατότητες του σιδηροδρόμου. Από την πραγματοποίηση όμως μιας μέγιστης τιμής μέχρι την καθιέρωση μιας ταχύτητας εκμετάλλευσης που να πλησιάζει αυτό την τιμή, υπάρχει μεγάλη απόσταση που

καλύπτεται μόνο από τις πολλές έρευνες και δοκιμές. Γι' αυτό και οι ταχύτητες που εφαρμόζουν τα διάφορα δίκτυα είναι μικρότερες από τις τιμές που δόθηκαν πριν.

Στον τομέα της καθιέρωσης εντυπωσιακά μεγάλων ταχυτήτων εκμετάλλευσης τα δίκτυα που είχαν την πρωτοπορία με τους διάφορους τύπους τροχαίου υλικού είναι:

- Το Ιαπωνικό, με τη δρομολόγηση την 1^η Οκτωβρίου 1964 του συρμού υψηλής ταχύτητας "*Shinkansen JR 0*" ανάμεσα στο *Tokyo* και την *Osaka* με μέγιστη ταχύτητα 230 km/h ως την σειρά *JR 800* με ταχύτητες άνω των 300 km/h, διάφορων κατασκευαστών.
- Στην Γαλλία, το 1967 το τρένο "*Capitole*" εκινείτο στην γραμμή Παρίσι-Τουλούζη με 200 km/h, καθώς και με τη δρομολόγηση στις 22 Σεπτεμβρίου 1981 του τρένου υψηλής ταχύτητας "*TGV*" ανάμεσα στο Παρίσι και τη Λυών με μέγιστη ταχύτητα 260 km/h, που ήδη το 1983 αυξήθηκε σε 270 km/h.
- Οι Αγγλικοί σιδηρόδρομοι εισήγαγαν το 1976 στη γραμμή *London-Bristol* την ταχύτητα τον 200 km/h.
- Το 1979 οι Ιταλοί εφάρμοζαν στη γραμμή *Roma-Firenze* την ταχύτητα των 180 km/h και πολύ αργότερα με την εμφάνιση των συρμών *ETR 500* αναπτύχθηκε ταχύτητα 300km/h, και *ETR 480* με ανακλινόμενο αμάξωμα κατασκευής *Alstom* (πρώην *Fiat*).
- Στην Γερμανία, συρμοί *ICE 1^{ης}*, *2^{ης}* και *3^{ης}* γενιάς με ανωτάτη ταχύτητα τα 330 km/h, συρμοί με ανακλινόμενο αμάξωμα *ICT (class 411 and 415)* για ταχύτητα 230 km/h και δηζελοκίνητοι συρμοί *ICT -VT (class 605)* *ICT (class 411 and 415)* για ταχύτητα 200 km/h.
- Στην Ισπανία, συρμοί *AVE class 100 trains* κατασκευής *Gec - Alstom* (παρόμοιοι με τους Γαλλικούς συρμούς *TGV Atlantique*) των 300 km/h, συρμοί *Talgo 200* για ταχύτητα 260 km/h για την γραμμή *Madrid* και *Cádiz* και *Huelva* και *Talgo 350* για την γραμμή *Μαδρίτης - Βαρκελώνης* (η οποία κατασκευάζεται και έχει εν μέρη αποδοθεί στην κυκλοφορία) κατασκευής *Talgo* και *ICE* της *Siemens*.
- Στην Σουηδία, συρμοί *X2000*, με ανωτάτη ταχύτητα τα 330 km/h, κατασκευής *ASEA, ABB (Schweden)*. [2] ,[39]

1.3 Έννοια υψηλής ταχύτητας

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών ο σιδηρόδρομος παρουσίασε στις χώρες της Ευρώπης μια σταθερή αύξηση μεταφορικού έργου που ήταν ιδιαίτερα έντονη μετά το 1980. Στο πλαίσιο της προσπάθειας που διεθνώς καταβάλλεται για τη βελτίωση της απόδοσης του σιδηρόδρομου στις χώρες της Ευρώπης, εντάσσεται και η εμφάνιση των συρμών υψηλής ταχύτητας, που έδωσε μια νέα μορφή στο όλο σύστημα των συγκοινωνιακών μέσων.

Στον τομέα των μεγάλων ταχυτήτων μπορεί να διακρίνει κανείς δυο «φιλοσοφίες»:

★ στην πρώτη από αυτές, οι νέες γραμμές υψηλής ταχύτητας θα διατρέχονται μόνο από επιβατικούς συρμούς, με μικρές τιμές φορτίου ανά άξονα, πολύ μικρά όρια ανοχών σφαλμάτων γραμμής. Η αντιμετώπιση αυτή εφαρμόστηκε στην γραμμή Παρίσι-Λυών και προϋποθέτει σημαντική κίνηση επιβατικών τρένων ώστε να είναι αποδοτική η κατασκευή και εκμετάλλευση της νέας γραμμής.

★ στη δεύτερη, οι νέες γραμμές υψηλής ταχύτητας διατρέχονται τόσο από επιβατικούς όσο και από εμπορευματικούς συρμούς, των οποίων η συνύπαρξη συνεπάγεται αυξημένες δαπάνες συντήρησης. Οι περισσότερες γραμμές υψηλής ταχύτητας κατασκευάζονται σήμερα ώστε να δέχονται μικτή κυκλοφορία (και επιβατικά και εμπορευματικά τρένα).

Η έννοια του σιδηρόδρομου υψηλής ταχύτητας προσδιορίζεται διεθνώς από το καθιερωμένο όριο των 200 km/h. Το όριο αυτό αναφέρεται τόσο σε συρμούς που κινούνται σε παραδοσιακές γραμμές όσο και στα σύγχρονα «γρήγορα τρένα» που κινούνται σε ειδικά διαμορφωμένη υποδομή και επιδομή. Η ταχύτητα αυτή των 200 km/h φαίνεται ωστόσο να αποτελεί ένα όριο για τα κλασικά σιδηροδρομικά δίκτυα, το οποίο είναι δύσκολο να ξεπερασθεί. Αυτό συμβαίνει για διαφορετικούς λόγους:

1. η δυναμική της κίνησης των συρμών στις καμπύλες προσδιορίζει την γεωμετρία της γραμμής στις θέσεις αυτές. Η φυγόκεντρος δύναμη που αναπτύσσεται καθορίζει το μέγεθος της υπερύψωσης της εξωτερικής σιδηροτροχιάς και τις τάσεις που ασκούνται στην σιδηροτροχιά αυτή. Στις παραδοσιακές γραμμές, η διαμόρφωση της γραμμής προκύπτει από ένα συγκερασμό των απαιτήσεων των επιβατικών και εμπορικών συρμών. Στις κατ' αυτόν τον τρόπο διαμορφωμένες καμπύλες η υψηλή ταχύτητα είναι δυνατόν να δημιουργήσει δυσάρεστο συναίσθημα στους επιβάτες και, σε οριακή περίπτωση, να προκαλέσει εκτροχιασμό. Το πρόβλημα είναι δυνατόν να αντιμετωπισθεί ωστόσο, για συρμούς υψηλών ταχυτήτων που διαθέτουν βαγόνια με ειδική ανάρτηση.
2. το μήκος πέδησης αυξάνεται σημαντικά με την ταχύτητα. Το μήκος αυτό διπλασιάζεται για έναν συρμό που κινείται με 200 km/h αντί των 140 km/h.

Άμεσες επιπτώσεις έχει το φαινόμενο αυτό στο σύστημα σήμανσης-σηματοδότησης, το οποίο θα πρέπει κατάλληλα να τροποποιηθεί.

Σε κάθε περίπτωση, ανάλογα με τα τεχνικά και ειδικά χαρακτηριστικά κάθε δικτύου, ένας από τους παραπάνω παράγοντες είναι δυνατόν να εμφανίζεται ως ο πλέον καθοριστικός. [1]

Ορισμ'ς υψηλής ταχύτητας

Υπάρχουν αρκετοί ορισμοί για τις υψηλές ταχύτητες. Η UIC, η Διεθνής Ένωση Σιδηροδρόμων, χρησιμοποιεί διάφορους ορισμούς για να δείξει ότι δεν υπάρχει ένα ορισμός που καλύπτει την υποδομή, το τροχαίο υλικό και την εκμετάλλευση, δεδομένου ότι το σύστημα των υψηλών ταχυτήτων είναι πολύ σύνθετο.

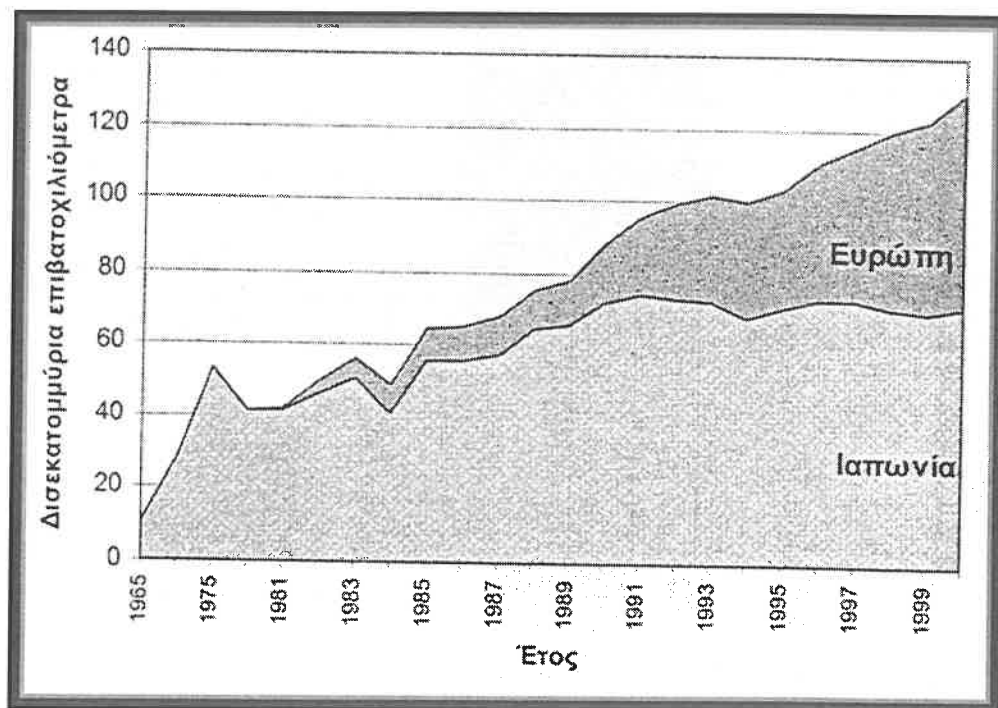
Η Ευρωπαϊκή Ένωση δίδει στην Οδηγία 96/48 έναν ευρύ ορισμό που περιλαμβάνει έναν μεγάλο πλήθος συστημάτων.

Σε κάθε περίπτωση, οι υψηλές ταχύτητες αποτελούν έναν συνδυασμό όλων των στοιχείων που συνθέτουν το «σύστημα»: **υποδομή** (νέες γραμμές για ταχύτητες άνω των 250 km/h, και αναβαθμισμένες γραμμές για ταχύτητες 200 έως 220 km/h), **τροχαίο υλικό** και **εκμετάλλευση**. Γραμμές για ταχύτητες άνω των 300 km/h μπορεί να χαρακτηρισθούν γραμμές υπερυψηλών ταχυτήτων (*very high speed lines*).

Το συμπέρασμα πάντως είναι ότι για τις συμβατικές γραμμές, το ανώτερο όριο των 200 km/h αποτελεί μια πραγματικότητα. Στην Ευρώπη το σύστημα των 200 km/h σε συμβατικές γραμμές λειτουργεί σε τρεις χώρες: Γαλλία, Μ. Βρετανία, Γερμανία. Το μήκος του συμβατικού αυτού δικτύου υψηλών ταχυτήτων παραμένει σχετικά μικρό: ξεπερνά τα 1000 km για την Γαλλία, ενώ είναι μικρότερο για την Γερμανία και Μ. Βρετανία. Οι συρμοί διαθέτουν ηλεκτροκίνηση και συμβατικά βαγόνια αξονικού φορτίου 22,5t.

Οι υψηλές ταχύτητες με την εμπορική τους επιτυχία στην Ευρώπη και την Ιαπωνία απέδειξαν ότι ο σιδ/μος μπορεί να γίνει ελκυστικό μέσο (βλέπε Διαγρ.1). Την δεκαετία του '60 πολλά δίκτυα πειραματίσθηκαν με τεχνολογίες που θα επέτρεπαν την αύξηση ταχυτήτων στα υφιστάμενα δίκτυα (σχ.1). Η ανάγκη κατασκευής σιδ/κου δικτύου υψηλών ταχυτήτων τονίζεται και στην Λευκή Βίβλο¹ για τις μεταφορές, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα αποτελεσματικό δίκτυο ταχείας μεταφοράς επιβατών. [39]

¹ Λευκή Βίβλος : Η Ευρωπαϊκή Πολιτική Μεταφορών με Ορίζοντα το Έτος 2010: η ώρα των Επιλογών



Διαγραμμα 1 Η εμπορική εξέλιξη των συρμών υψηλών ταχυτήτων στην Ευρώπη και την Ιαπωνία πηγή [39]

Μέχρι και το 1993 είχαν αναπτυχθεί δυο ολοκληρωμένα δίκτυα προορισμένα αποκλειστικά για τρένα υψηλής ταχύτητας, στην Ιαπωνία και στην Γαλλία. Το Γαλλικό σύστημα TGV (*trains a grande vitesse*) που συνδέει το Παρίσι με την Λυών, την Μασσαλία, τη Ναντ και άλλες πόλεις, εγκαινιάσθηκε στις αρχές της δεκαετίας του '80 και επεκτάθηκε γρήγορα στην γαλλική ενδοχώρα. Κύριος λόγος για τη δημιουργία του συστήματος αυτού υπήρξε ο κορεσμός της διπλής γραμμής Παρίσι – Λυών μέγιστης χωρητικότητας 250 τρένων ανά ημέρα. Η μέση ταχύτητα κατά την διαδρομή κυμαίνεται γύρω στα 270 km/h, ενώ η εμπορική ταχύτητα ξεπερνά τα 210 km/h. Ήδη, για την εποχή εκείνη, είχε καταγραφεί ταχύτητα 380 km/h ενώ θεωρούνταν οριστική η μέση ταχύτητα 300 km/h. Ο απολογισμός του 1984 κατέγραψε για το σύστημα TGV:

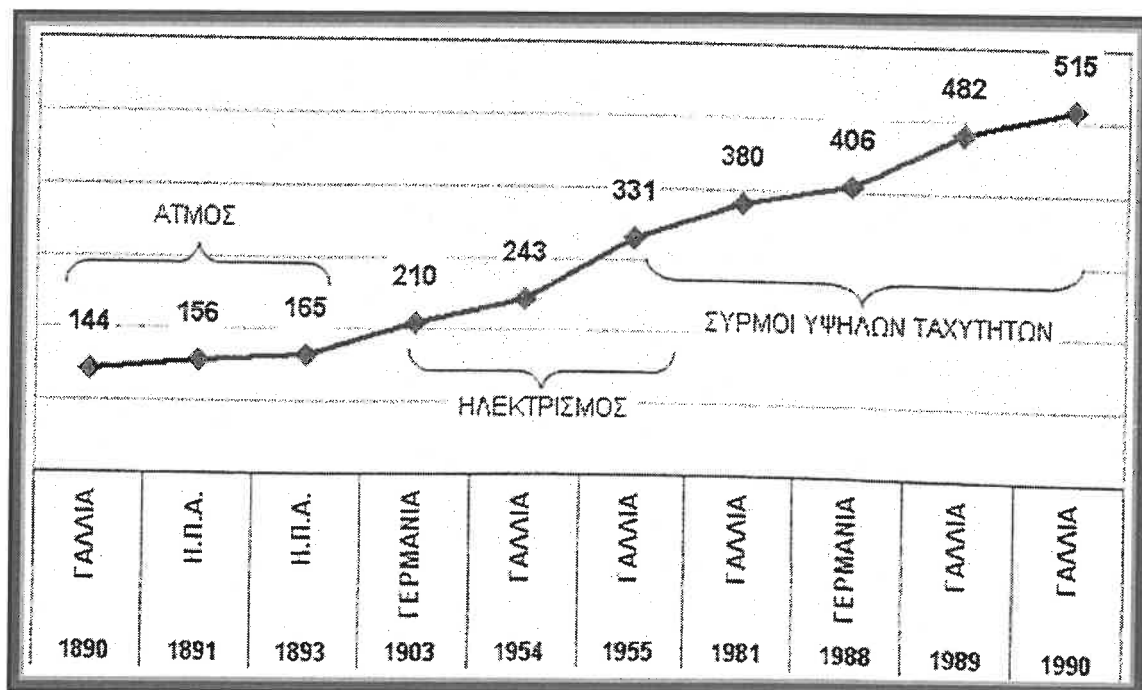
-13,3 εκ. επιβάτες από και προς το Παρίσι, ήτοι το 17% του συνόλου της επιβατικής κίνησης σε γαλλικό έδαφος.

-μεταξύ 1981 και 1984 παρατηρήθηκε αύξηση της κίνησης κατά 50%.

-2 εκ. επιβάτες αποσπάσθηκαν από την χρήση του αεροπλάνου

-σύνολο εσόδων 3 δις. FF λειτουργικές δαπάνες 40%, πλεόνασμα 1,8 δις FF και αφαιρούμενων των επιτοκίων αποσβέσεων κλπ, ένα καθαρό κέρδος 370εκ. FF.

[3]



σχήμα 1 Ρεκόρ ταχύτητας στον σιδηρόδρομο (km/h)

πηγή [39]

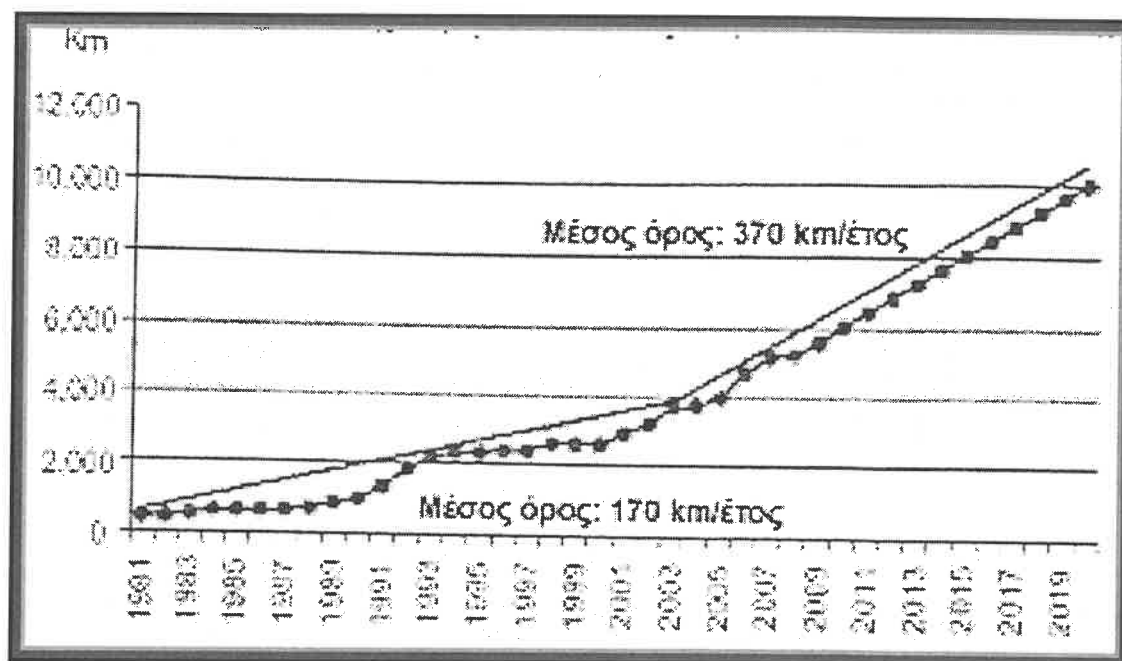
Μετά την επιτυχία της γραμμής του *TGV PSE*, η *SNCF* άρχισε την κατασκευή της γραμμής του *TGV Atlantique* το 1985 και το οποίο τέθηκε σε κυκλοφορία το 1989. Η διαφορά που παρουσιάστηκε ήταν στην κλίση της γραμμής αυτής, 25‰, έναντι του *TGV PSE* με κλίση 35‰ εξαιτίας της μορφολογίας του εδάφους που διέσχιζε το *TGV Atlantique*.

Στης 18 Μαΐου 1990 στη *SNCF* αναπτύχθηκε η υψηλότερη ταχύτητα παγκοσμίως, 515 km/h (βλέπε σχ.1). Περίπου 60 *TGVs* κινούνται καθημερινά με την ταχύτητα των 300 km/h στην γραμμή των *TGV Atlantique* στην περίοδο εκείνη. Ο σιδηρόδρομος υψηλών ταχυτήτων συνδέει την Γαλλία με την υπόλοιπη Ευρώπη το 1994.

Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι στην Ισπανία, μόλις το 1992, όταν φιλοξένησε τους Ολυμπιακούς Αγώνες και την διεθνή έκθεση, άρχισε η λειτουργία των *AVE* μεταξύ των Μαδρίτης και Σεβίλλης με μέγιστη ταχύτητα 250 km/h που συνδέει τις δυο πόλεις σε 2 ώρες και 45 λεπτά σε μια νέα γραμμή που είναι 471 km η οποία είναι 103 km πιο σύντομη από την συμβατική γραμμή. Τότε η μέγιστη ταχύτητα υπηρεσιών έφθανε στα 270 km/h. [8]

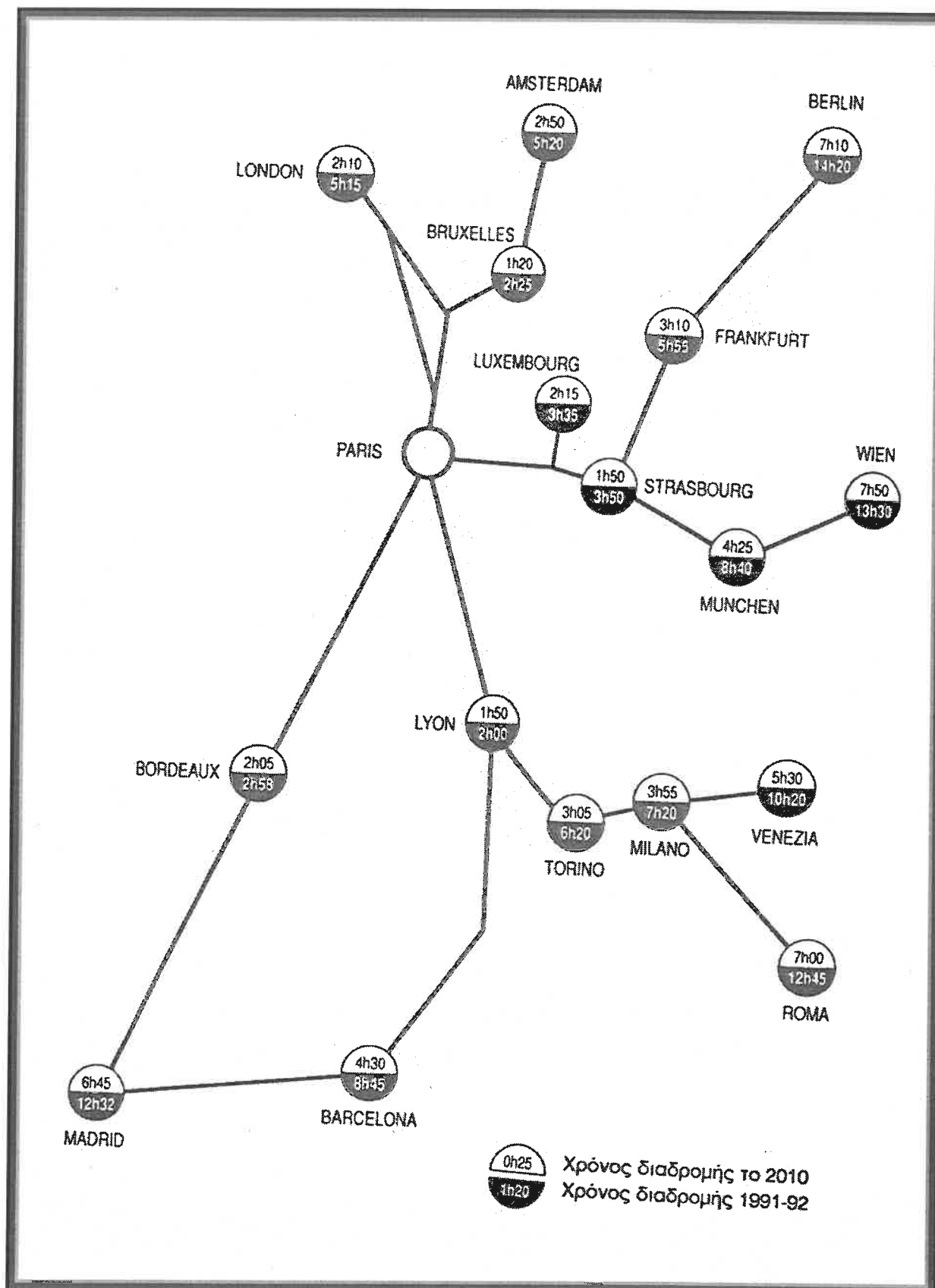
1.4 Προβλεπόμενη ανάπτυξη του δικτύου υψηλών ταχυτήτων στην Ευρώπη

Η επιτυχία των συρμών υψηλής ταχύτητας, που ενδείκνυται ιδίως για αποστάσεις της κλίμακας της κεντρικής και δυτικής Ευρώπης, οδήγησε την Ευρωπαϊκή επιτροπή να εκπονήσει σχέδιο για την υλοποίηση ενός Ευρωπαϊκού σιδηροδρομικού δικτύου μεγάλων ταχυτήτων. Το δίκτυο αυτό θα περιλαμβάνει τόσο νέες γραμμές (με ταχύτητα σχεδιασμού μεγαλύτερη από 250 km/h) όσο και υπάρχουσες γραμμές στις οποίες θα γίνουν βελτιώσεις στη χάραξη, ώστε να μπορούν να διανυθούν με ταχύτητα 200 km/h. Το δίκτυο υψηλών ταχυτήτων στην Ευρώπη κατά το 2003 ανέρχονταν σε 3.751 km, ενώ είναι σε εξέλιξη ή προγραμματίζονται και αλλά έργα, με στόχο περί το 2020 το δίκτυο υψηλών ταχυτήτων ν' ανέλθει σε 10.000 km (διαγρ. 2). [39]



Διαγραμμα 2 Προβλεπόμενη ανάπτυξη του δικτύου υψηλών ταχυτήτων στην Ευρώπη
πηγή [39]

Το σχήμα 2 δίνει τις επιπτώσεις στην μείωση των χρόνων διαδρομής που θα υπάρξουν μετά την υλοποίηση του Ευρωπαϊκού δικτύου υψηλών ταχυτήτων περί το 2010.



Σχ. 2 Χρόνοι διαδρομής (με αφετηρία το Παρίσι) μετά την υλοποίηση του Ευρωπαϊκού σιδηροδρομικού δικτύου υψηλής ταχύτητας. πηγή[2]

Ήδη στα πλαίσια του σχεδιασμού αυτού, η επέκταση των νέων σιδηροδρομικών δικτύων υψηλών ταχυτήτων στα Ευρωπαϊκά Κράτη γίνεται με πολύ γρήγορους ρυθμούς, ενισχύοντας το ρόλο του σιδηρόδρομου σαν μέσο μεταφοράς γρήγορου, ασφαλούς, ενεργειακός αποδοτικού και φιλικού προς το περιβάλλον. Εντυπωσιακά αυξημένες είναι και οι μέγιστες ταχύτητες που επιτυγχάνονται στις γραμμές αυτές, κυρίως στον τομέα του τροχαίου υλικού, που έχουν σημειωθεί τα τελευταία χρόνια, σε συνδυασμό βέβαια με την κατάλληλη υποδομή της γραμμής.

Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις, η μείωση των χρόνων διαδρομής αποτέλεσε μόνιμο στόχο των σιδηροδρόμων, όπως προκύπτει και από τους πίνακες 1,2 :

ΠΑΡΙΣΙ-ΛΥΩΝ (511km)

1937	1950	1960	1980	1983 (γραμμή TGV, μήκος 427 km)	1987
5h15min	5h05min	4h00min	3h50min	2h00min	1h50min

Πίνακας 1

πηγή:SNCF

TOKYO-OSAKA (515km)

1963	1965 (Shinkansen)
5h30min	3h10min

Πίνακας 2

πηγή SNCF

1.5 Σύγκριση με άλλα Μέσα Μαζικής Μεταφοράς (MMM)

Πράγματι, με τις μεγάλες ταχύτητες ο σιδηρόδρομος αξιοποιεί το πλεονέκτημα που έχει να διεισδύει μέχρι το κέντρο των πόλεων και έτσι οι χρόνοι διαδρομής με σιδηρόδρομο από το κέντρο μιας πόλης είναι πολύ μικρότεροι από το αυτοκίνητο αλλά και μικρότεροι σε αρκετές περιπτώσεις και από το αεροπλάνο.

Ακολουθεί ,πίνακας 3, με συγκριτικούς χρόνους διαδρομής από το κέντρο μιας πόλης στο κέντρο μιας άλλης μεταξύ σιδηρόδρομου, αεροπλάνου, αυτοκινήτου για τον άξονα Παρίσι-Λυών:

TGV χρόνος διαδρομής	TGV χρόνος διαδρομής + χρόνοι προσπέλασης στο σιδηροδρομικό σταθμό	Αεροπλάνο*	Αυτοκίνητο ^{**} (σε αυτοκινητόδρομο με μέγιστη ταχύτητα 120km/h)
2h	2h 30min	2h30-3h	5h

Πίνακας 3

πηγή SNSF

* ο χρόνος αυτός είναι το άθροισμα του χρόνου πτήσεως, των χρόνων διαδρομής από το κέντρο της πόλης στο αεροδρόμιο, την παράδοση και την παραλαβή των αποσκευών.

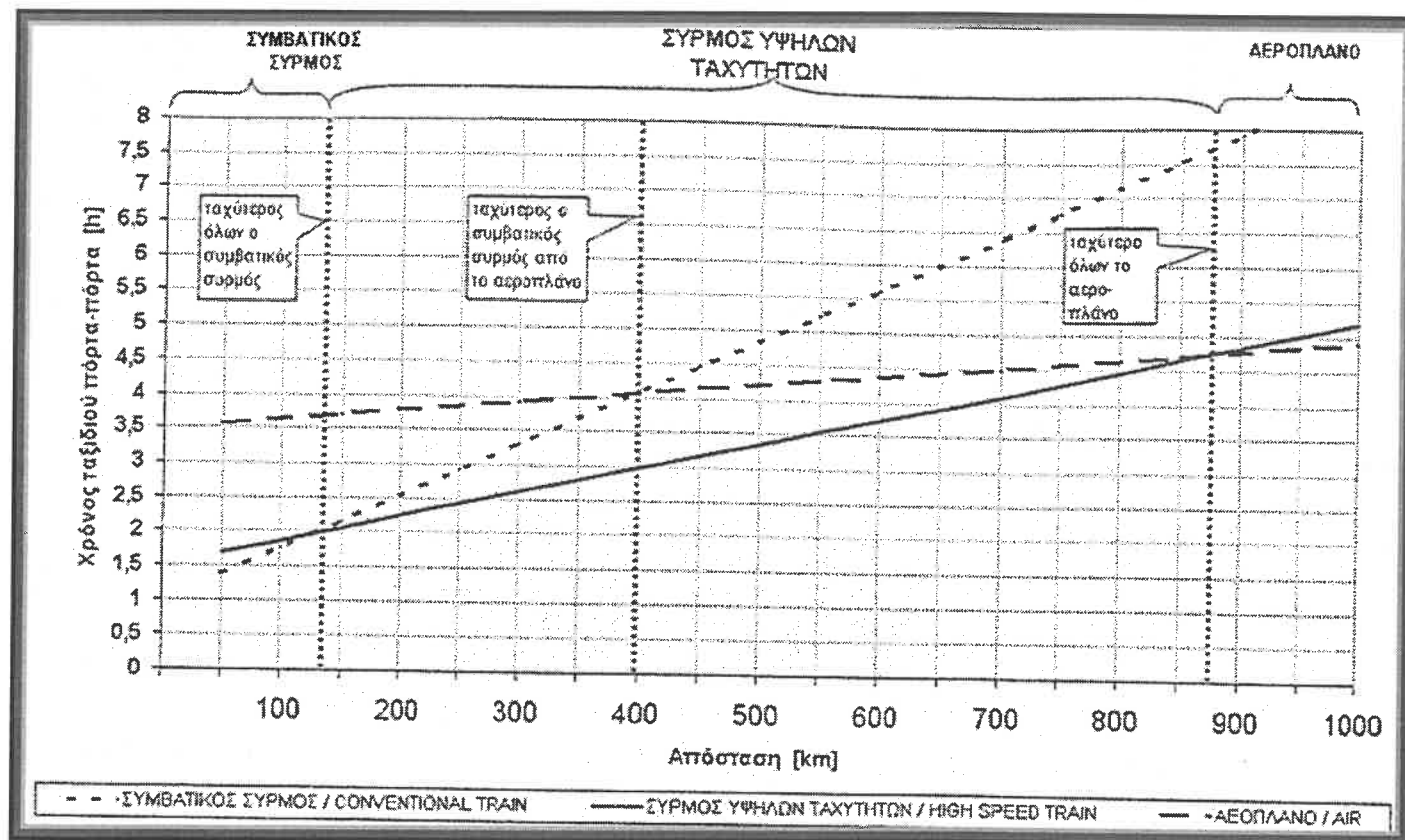
** ο χρόνος αυτός είναι από το κέντρο της μιας πόλης στην άλλη, περιλαμβάνει το χρόνο που απαιτείται (περίπου 30 min) για να φθάσει το αυτοκίνητο από το κέντρο της πόλης στον αυτοκινητόδρομο **[1]**

Με βάση το διάγραμμα 3 μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα, συγκρίνοντας τους χρόνους διαδρομής «πόρτα – πόρτα²» για συμβατικούς συρμούς, συρμούς υψηλών ταχυτήτων και αεροπλάνο:

- Για μετακινήσεις μικρών αποστάσεων (έως τα 150 Km περίπου) οι συμβατικοί συρμοί προσφέρουν το συντομότερο ταξίδι. Για διαδρομές έως περίπου τα 400 km, οι συμβατικοί συρμοί είναι ταχύτεροι ακόμη και από το αεροπλάνο.
- Για μετακινήσεις μεσαίων αποστάσεων (150 έως 900 περίπου χιλιόμετρα) οι συρμοί υψηλών ταχυτήτων προσφέρουν το συντομότερο ταξίδι.
- Για μετακινήσεις πάνω από τα 900 χιλιόμετρα περίπου το αεροπλάνο είναι το ανταγωνιστικότερο ως προς τον χρόνο διαδρομής, μεταφορικό μέσο.

[39]

² στον χρόνο πόρτα – πόρτα λαμβάνεται υπόψη χρόνος 1 ώρας για την μετάβαση από το σπίτι στον σταθμό και αντίστροφα για συμβατικούς συρμούς, 1,5 ωρών για συρμούς υψηλών ταχυτήτων (δεδομένου ότι σε πολλές περιπτώσεις οι νέοι σταθμοί δεν είναι σε τόσο κεντρικά σημεία όσο οι σταθμοί για τους συμβατικούς συρμούς) και όσον αφορά το αεροπορικό ταξίδι χρόνο 3,5 ωρών για την μετάβαση από το σπίτι στο αεροδρόμιο + χρόνος επιβίβασης και αντίστροφα. Σαν μέση ταχύτητα ελήφθησαν υπόψη 130 km/h για συμβατικούς συρμούς, 270 km/h για συρμούς υψηλών ταχυτήτων και 700 km/h για το αεροπλάνο.

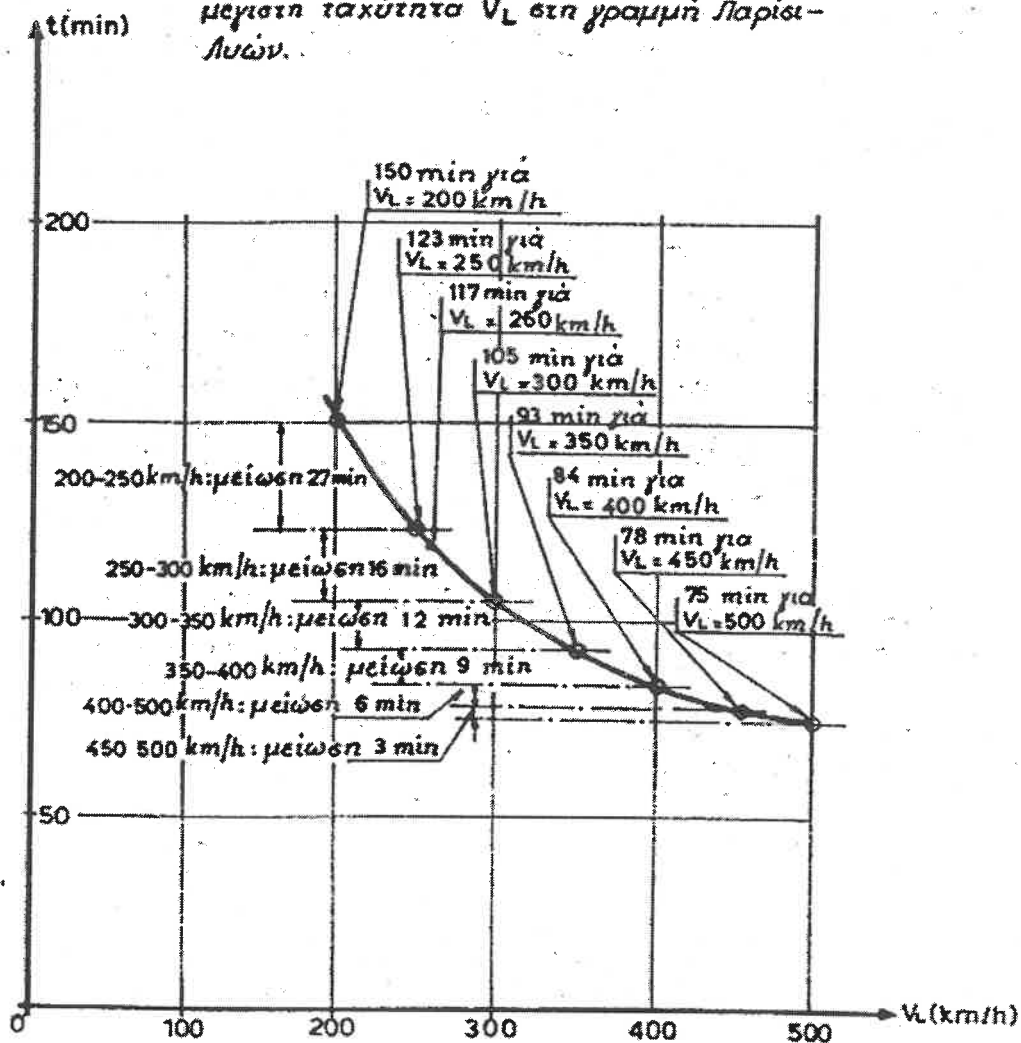


Διαγρ. 3 Τα όρια ανταγωνιστικότητας των συμβατικών συρμών, συρμών υψηλών ταχυτήτων και αεροπλάνου πηγή [39]

Σε διαδρομές μεγάλων αποστάσεων ανταγωνιστής του σιδηρόδρομου είναι οι αεροπορικές μεταφορές. Οι σημερινές αεροπορικές εταιρείες χαμηλού κόστους αυξάνουν περισσότερο τον ανταγωνισμό. Το πρόβλημα με την συμφόρηση σε πολλά αεροδρόμια της Ευρώπης μειώνει την πίεση αυτή του ανταγωνισμού.

Η ταχύτητα δεν αποτελεί αυτοσκοπό, αλλά μέσο για τη μείωση του χρόνου διαδρομής. Αυτό λοιπόν που πρέπει να εξετάζεται για τα κοινωνικοοικονομικά δεδομένα μιας χώρας είναι ως πιο όριο η μείωση του χρόνου διαδρομής δικαιολογεί τις δαπάνες για αύξηση της ταχύτητας. Στο διάγραμμα 4, που ακολουθεί, φαίνεται για την νέα γραμμή Παρίσι-Λυών η μείωση του χρόνου διαδρομής που προκύπτει από την αύξηση της ταχύτητας. Παρατηρείται ότι η περιοχή περί τα 300 km/h αποτελεί το όριο, πέρα από το οποίο δεν δικαιολογούνται οι πρόσθετες δαπάνες που θα απαιτούσε μια ενδεχόμενη αύξηση της ταχύτητας.

ο χρόνος διαδρομής σε συνάρτηση με τη μέγιστη ταχύτητα V_L στη γραμμή Παρίσι-Λυών.



Διάγραμμα 4. Η μείωση του χρόνου διαδρομής σε συνάρτηση με την αύξηση της ταχύτητας πηγή [3], SNCF

Στον πίνακα 4 παρατηρείται η εφαρμογή των υψηλών ταχυτήτων σε διάφορα σιδηροδρομικά δίκτυα της Ευρώπης πριν κάποια χρόνια .

ΧΩΡΑ	ΓΡΑΜΜΗ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ (km/h)
ΓΑΛΛΙΑ	“TGV Atlantique” Παρίσι -Ν. Δ. Γαλλία	300
ΓΕΡΜΑΝΙΑ	Μανχαϊμ-Στουτγκαρδη Αννόβερο-Βυρτζμπουργκ	250
ΕΛΛΑΔΑ	Αθηνά-Θεσσαλονίκη	200
ΙΣΠΑΝΙΑ	Μαδρίτη-Βαρκελώνη	300
ΙΤΑΛΙΑ	“Direttissima” Ρώμη-Φλωρεντία	250
Μ. ΒΡΕΤΑΝΙΑ	Λονδίνο-Bristol, Λονδίνο- Edinburg (μελέτη βελτιωμένου τροχαίου υλικού σε υπάρχουσα γραμμή)	250

Πίνακας 4

πηγή [4]

1.6 Ποιες κρίνονται σαν κύριες απαιτήσεις για την εφαρμογή δικτύων υψηλών ταχυτήτων

Παρατηρώντας τα παραπάνω, ένα σημαντικό ερώτημα που προκύπτει σχετικά με τον σιδηρόδρομο είναι:

Γιατί έχει καθιερωθεί η τόσο επίμονη απαίτηση για «γρήγορα τρένα» τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς, και ακόμα αν αυτή η απαίτηση έχει ρίζες κοινωνικές, οικονομικές η άλλες ;

Η απάντηση στο ερωτήμα αυτά έχει διάφορα σκέλη:

- Ο αρχικός ανταγωνισμός σιδηρόδρομου – άμαξας που αντικαταστάθηκε αργότερα από τον αντίστοιχο σιδηρόδρομο –αυτοκινήτου καλλιεργήθηκε πάνω σε πρότυπα που έφεραν σε αντιπαράθεση τη μαζική μεταφορά με την ιδιωτική, την ατομική. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το ιδιωτικό μεταφορικό μέσο πρέπει να αντισταθμισθούν από εκείνα του σιδηρόδρομου: ταχύτητα, ασφάλεια, οικονομία.
- Οι πολεοδομικές επεκτάσεις των σύγχρονων αστικών κέντρων στην Ευρώπη, Αμερική, Ιαπωνία κλπ., οδηγούσαν στην διαμόρφωση προαστίων με χρήση κατοικίας στην περιφερειακή ζώνη, σε σημαντική πολλές φορές, απόσταση από τους χώρους εργασίας. Ο κάτοικος της πόλης, λοιπόν, υποχρεωμένος να διανύει καθημερινά πολλά χιλιόμετρα, αναζητά δικαιολογημένα, μέσα μεταφοράς που να συντομεύουν τις αποστάσεις.

- Μια τελευταία διάσταση του ζητήματος θα πρέπει να αναζητηθεί στην αξιολόγηση των κριτηρίων ανταγωνιστικότητας μεταξύ τρένου-αεροπλάνου και αυτοκινήτου σε μέσες αποστάσεις.

Η επιλογή του συγκοινωνιακού μέσου για πόλεις που απέχουν 400-700 km, πραγματοποιείται συχνά, και υπό την προϋπόθεση ότι το κόστος δεν εμφανίζει σημαντικές διαφορές, με βάση την ταχύτητα. Η Ευρώπη σήμερα, και ακόμα περισσότερο στα αμέσως επόμενα χρόνια, έχει την δυνατότητα να αντιπαραθέσει ένα σιδηρόδρομο υψηλών απαιτήσεων και προδιαγραφών απέναντι στις κατά τεκμήριο γρήγορες αεροπορικές μεταφορές: Παρίσι-Λυών (Γαλλία), Παρίσι-Ναντ(Γαλλία), Αννόβερο – Βύρτζμπουργκ (Γερμανία), Ρώμη-Φλωρεντία (Ιταλία).

[3]

1.7 Σχεδιασμός δικτύου υψηλών ταχυτήτων στην Ελλάδα-Γεωγραφική σπουδαιότητα του δικτύου

Ο Σχεδιασμός του δικτύου υψηλών ταχυτήτων στον Ελληνικό χώρο περιλαμβάνει τον βασικό σιδηροδρομικό άξονα Αθήνας – Θεσσαλονίκης – Ειδομένης (μήκους 586 km), τον άξονα Αθήνας – Πάτρας (μήκους 220 km) και τον άξονα Θεσσαλονίκης – Προμαχώνα (μήκους 130 km).

Η πρόβλεψη υψηλών σιδηροδρομικών ταχυτήτων στον άξονα Αθήνας - Θεσσαλονίκης - Ειδομένης, έχει σημαντική Ευρωπαϊκή και εθνική διάσταση, καθώς στο τμήμα Αθήνας – Θεσσαλονίκης παρατηρούνται οι μεγαλύτερες ροές επιβατών και εμπορευμάτων στην Ελλάδα, με όλα τα μέσα μεταφοράς. Αυτό συμβαίνει, γιατί ο υπόψη άξονας συνδέει τους δυο κυριότερους πληθυσμιακούς πόλους της χώρας (Αθήνα και Θεσσαλονίκη), διέρχεται από εξαιρετικά παραγωγικές περιοχές, και ακόμη, γιατί αποτελεί την κυριότερη σύνδεση Βόρειας και Νότιας Ελλάδας, δεδομένων των δυσκολιών πρόσβασης προς Βορρά (τμήμα Θεσσαλονίκης – Ειδομένης), αποτελεί τον βασικό άξονα επικοινωνίας της χώρας μας με την υπόλοιπη Ευρώπη. Η ανάπτυξη του σιδηροδρομικού δικτύου στον άξονα αυτόν, θα επιτρέψει στο σιδηρόδρομο να ανταγωνιστεί τα υπόλοιπα μέσα μεταφοράς στο κυριότερο τμήμα του ελληνικού μεταφορικού συστήματος.

Η γραμμή υψηλών ταχυτήτων Θεσσαλονίκης – Προμαχώνα θα συνδέει το Ελληνικό δίκτυο υψηλών ταχυτήτων με τον Ευρωπαϊκό κλάδο Βελιγραδίου – Σόφιας – Κωνσταντινούπολις, αποτελώντας ταυτοχρόνως και εναλλακτική ελληνική χερσαία διέξοδο προς τις χώρες της Ευρώπης, πέραν αυτής της πρώην Γιουγκοσλαβίας.

Ομοίως, πολύ μεγάλης σπουδαιότητας είναι και ο άξονας Αθήνας – Πάτρας. Συνδέει και αυτός την Αθήνα με το μεγάλο αστικό κέντρο, την Πάτρα, που διέρχεται από τις εξαιρετικά παραγωγικές περιοχές της Βόρειας Πελοποννήσου και δίνει διέξοδο προς την μόνη σημερινή ελληνική εναλλακτική σιδηροδρομική “πύλη” (Λιμάνι Πάτρας) προς την υπόλοιπη Ευρώπη, μέσω αμιγούς κοινοτικού εδάφους, αποφεύγοντας τη διέλευση από τις τρίτες χώρες (πρώην

Γιουγκοσλαβία κλπ). Μεγάλο μειονέκτημα αποτελεί για τον άξονα αυτό η υπάρχουσα υποδομή της γραμμής. Πιο συγκεκριμένα η γραμμή είναι μονή, μετρικού (στενού) πλάτους με δυσμενή χάραξη που δεν επιτρέπει ταχύτητες ενός σύγχρονου μεταφορικού μέσου.

Ο σχεδιασμός του ΟΣΕ προβλέπει για όλους τους άξονες υψηλών ταχυτήτων διπλή γραμμή κανονικού πλάτους με χάραξη που να επιτρέπει ταχύτητα 200 km/h, αυτόματη ηλεκτρική σηματοδότηση, τηλεπικοινωνίες και ηλεκτροκίνηση. Οι γραμμές προβλέπονται για μικτή κυκλοφορία, τόσο για επιβατικές όσο και εμπορευματικές αμαξοστοιχίες. Με τις ταχύτητες αυτές, ο σιδηρόδρομος θα μπορεί να εκτελεί το δρομολόγιο Αθήνας –Πάτρας σε 2 ώρες, μετά την πλήρη ολοκλήρωση των έργων εκσυγχρονισμού που προβλέπονται στους άξονες αυτούς. [5]

1.8 Ποια είναι η προσφορά – επιτυχία των συρμών υψηλών ταχυτήτων

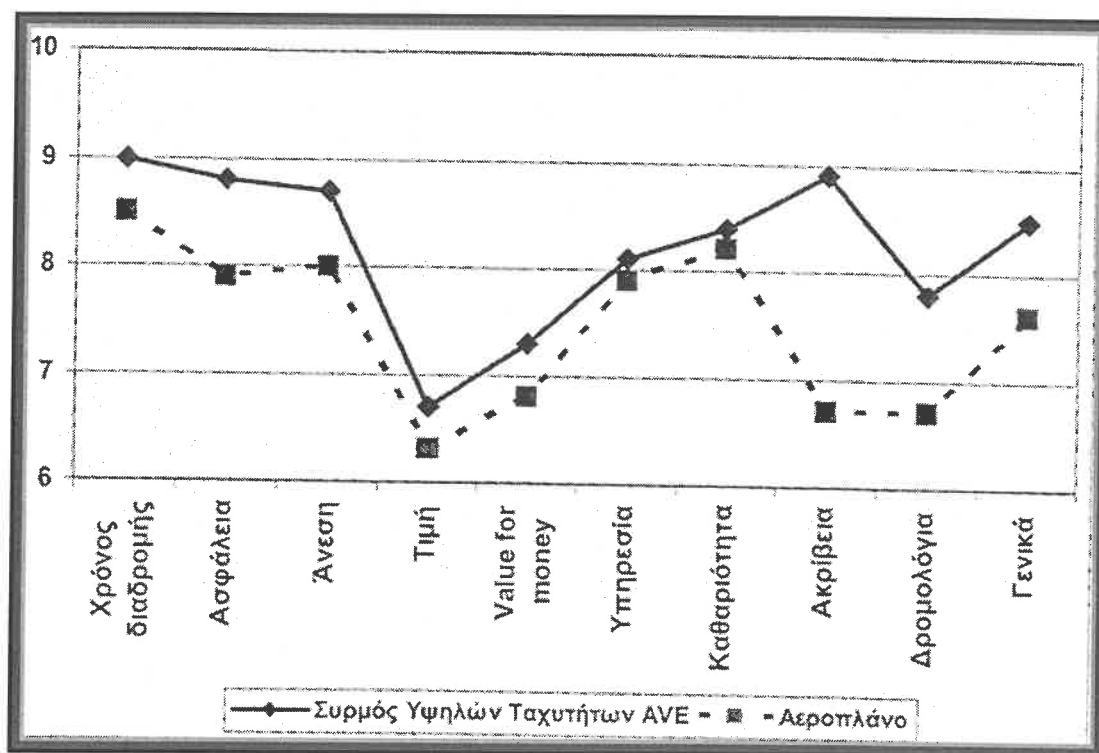
Το κυριότερο πλεονέκτημα των συρμών υψηλών ταχυτήτων είναι για τον επιβάτη η μείωση του χρόνου διαδρομής αλλά σημαντικό παράγοντα αποτελεί και η ποιότητα που προσφέρουν οι συρμοί υψηλών ταχυτήτων.

- μεγάλη συχνότητα σε τακτά διαστήματα
- υψηλή ποιότητα ταξιδιού
- τιμολογιακή πολιτική που ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις των πελατών
- συμπληρωματικότητα με άλλα μέσα μεταφοράς
- καλύτερο επίπεδο εξυπηρέτησης σε συρμούς και σταθμούς

Η επιτυχία του σιδηρόδρομου υψηλών ταχυτήτων οφείλεται σε πολλούς παράγοντες, όπως :

1. σύγχρονες γραμμές με προηγμένα συστήματα σηματοδότησης, ηλεκτροκινήτρες και τηλεπικοινωνιών
2. προηγμένος σχεδιασμός, τεχνολογία και εξοπλισμός του τροχαίου υλικού
3. σχεδιασμός λειτουργίας (εμπορική εκμετάλλευση)
4. τιμολογιακή πολιτική
5. ασφάλεια, αξιοπιστία δρομολογίων

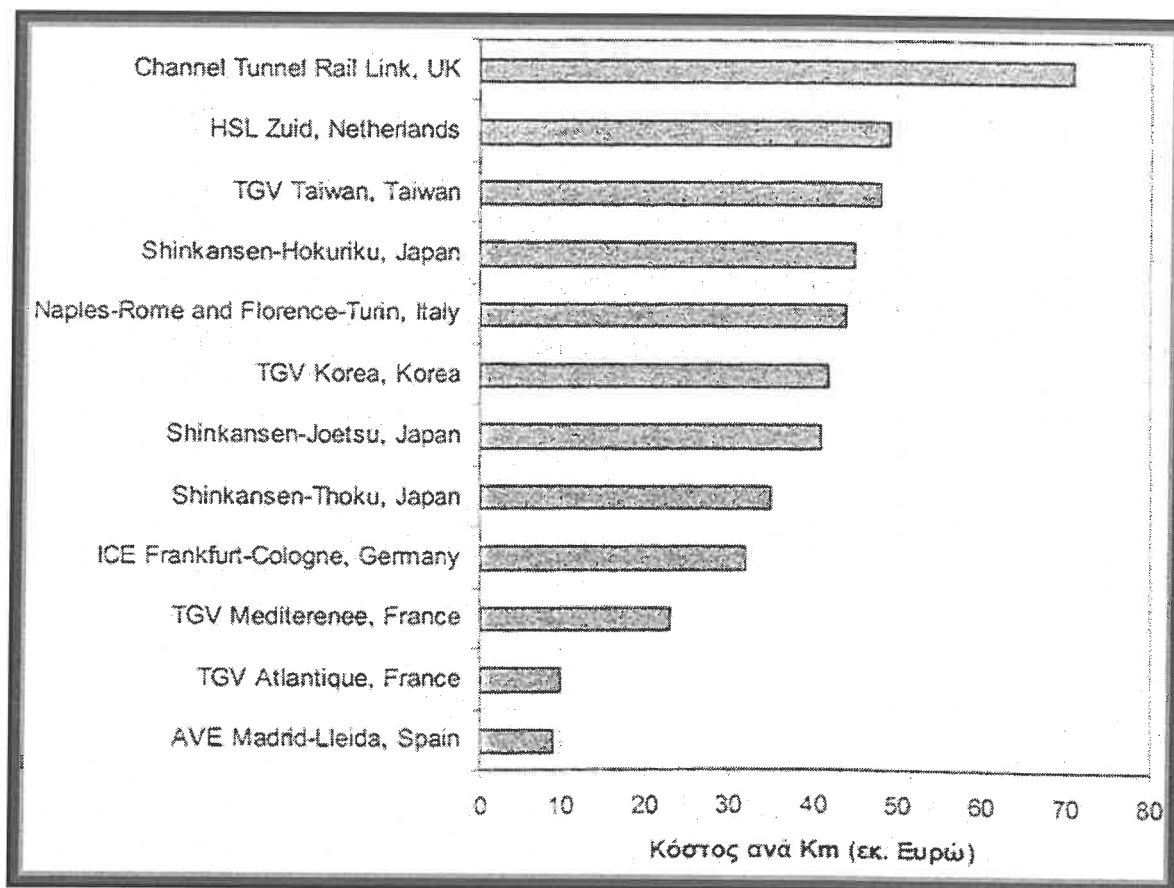
Έρευνες ικανοποίησης πελατών (π.χ. Ισπανία, βλέπε διαγρ. 5) δείχνουν ότι οι συρμοί υψηλών ταχυτήτων υπερτερούν σχεδόν σε όλα τα σημεία ως προς τα αεροπλάνα. [39]



Διαγρ. 5 Έρευνα ικανοποίησης πελατών – σύγκριση υπηρεσιών συρμών AVE / Ισπανία – Αεροπορικό ταξίδι
(πηγή :Opinion Poll, Spanish General Public November 2002)

1.9 Το κόστος κατασκευής γραμμών υψηλών ταχυτήτων

Το κόστος κατασκευής μιας γραμμής υψηλών ταχυτήτων εμφανίζεται στο διάγραμμα 6 και κυμαίνεται από περίπου 10 €/m έως 70 €/m για την περίπτωση της γραμμής της Μάγχης. [39]



Διαγρ .6 Το κόστος κατασκευής γραμμών υψηλών ταχυτήτων (πηγή: *High Speed Rail: International comparisons, 2/2004*)

Σε χώρες όπου η κατασκευή των γραμμών είναι πολύπλοκη αυξάνεται και το κόστος, δηλαδή ανάλογα με την μορφολογία του εδάφους σε κάθε χώρα και τις ανάγκες για επιπλέον κατασκευές όπως, σήραγγες, γέφυρες κτλ, παρατηρείται μια περαιτέρω αύξηση στο κόστος κατασκευής της σιδ/κης γραμμής.

1.10 Μεθοδολογία προσέγγισης και ανάπτυξης του θέματος της εργασίας

Με βάση την έννοια της υψηλής ταχύτητας, την πρόοδο που πραγματοποιήθηκε και ακόμη βρίσκεται σε εξέλιξη αλλά και τον ρόλο της ταχύτητας στο σιδηροδρομικό δίκτυο, πραγματοποιήθηκε ανάλυση - σύγκριση των τεχνικών χαρακτηριστικών της επιδομής και της χάραξης των συμβατικών και των γραμμών υψηλών ταχυτήτων .

Στο πρώτο κεφάλαιο έγινε μια ιστορική αναδρομή για την εμφάνιση του σιδηρόδρομου και την ανάπτυξή του με βάση την ταχύτητα σε διάφορες χώρες του κόσμου. Έγινε σύγκριση με τα άλλα ΜΜΜ σε σχέση με την ταχύτητα και τον χρόνο.

Στο δεύτερο κεφάλαιο επισημάνθηκαν τα γενικά στοιχεία και δόθηκαν οι ορισμοί των τεχνικών χαρακτηριστικών όσον αφορά την επιδομή και υποδομή της γραμμής και ακολούθησε ανάλυση των στοιχείων αυτών, ως προς τις ιδιότητές τους και το πώς συμβάλλουν στην πραγματοποίηση υψηλών ταχυτήτων. Έγινε διαχωρισμός, στην επιδομή της γραμμής, σε δυο μεγάλες ενότητες, την **Σταθερή Επιδομή** και την **Σκυρογραμμή υψηλών ταχυτήτων**.

Έγινε λεπτομερή εξέταση των στοιχείων που συνθέτουν τη Σταθερή Επιδομή, τις διαφοροποιήσεις που εμφανίζει σε σχέση με την Σκυρογραμμή, καθώς και τον τρόπο κατασκευής της. Αποτυπώθηκαν διάφοροι τύποι Σ.Ε. που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά καιρούς σε πολλά Ευρωπαϊκά δίκτυα και οι διαφοροποιήσεις αυτών. Αναλύθηκε επίσης ο τύπος Σ.Ε. RHEDA που είναι ο πλέον διαδεδομένος τύπος Σ.Ε. στην Ευρώπη για γραμμές υψηλών ταχυτήτων

Επίσης πραγματοποιήθηκε λεπτομερή εξέταση των στοιχείων που συνθέτουν τον δεύτερο τύπο επιδομής για υψηλές ταχύτητες, την Σκυρογραμμή και έγινε η σύγκριση με τα χαρακτηριστικά των συμβατικών συρμών ως προς τις ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιούνται κατά την κατασκευή της γραμμής όπως, σιδ/χιες, στρωτήρες, ελαστικά υποθέματα, σύνδεσμοι κτλ.

Αποδείχθηκε πόσο σημαντική είναι η απόκριση του ελαστικού υποθέματος και του κατάλληλου συνδέσμου στην προσπάθεια πραγματοποίησης μιας ελαστικής επιδομής ώστε ανάλογα με την διανυόμενη ταχύτητα να έχουμε και την κατάλληλη άνεση και ασφάλεια.

Αναφέρθηκαν τα γενικά αίτια καταπόνησης μιας γραμμής και πως αυτά συμβάλλουν στην συμπεριφορά της γραμμής ανάλογα με τον χρησιμοποιούμενο στρωτήρα και τις σιδ/χιες, με βάση τα φορτία που ασκούνται σε μια γραμμή και ανάλογα πάντα με την ταχύτητα των συρμών που κυκλοφορούν επί της γραμμής. Έγινε, επίσης, αναφορά και με βάση διαγράμματα προέκυψαν συμπεράσματα για την καταπόνηση του έρματος, τις δονήσεις που προκαλούνται με την ταχύτητα καθώς και την επιρροή που υφίσταται η κλίση του έρματος στην εκτίμηση μεταβολής της κατάστασης της γραμμής.

Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την χάραξη μιας σιδηροδρομικής γραμμής όπου έγινε λεπτομερή ανάλυση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γραμμής. Με βάση το Ευρωπαϊκό Πρότυπο και τους κανόνες που επικρατούν για τον σχεδιασμό και χάραξη των γραμμών αντλήθηκαν τα περισσότερα στοιχεία και παρατηρήθηκαν οι όποιες διαφοροποιήσεις των συμβατικών γραμμών με τις υψηλές ταχύτητες. Με διαγράμματα, σχήματα και πίνακες έγιναν πιο κατανοητές οι διαφοροποιήσεις, καθώς και οι οριακές προτεινόμενες και μέγιστες τιμές των μεγεθών που συμβάλλουν στην διαμόρφωση της γραμμής.

Κρίθηκε αναγκαίος ο λεπτομερής ορισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γραμμής για το σύνολο του δικτύου για να δοθεί πιο κατανοητά η έννοια των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για τις συγκρίσεις. Δόθηκε μεγάλη σημασία στην συμπεριφορά των συρμών στις καμπύλες, στις καμπύλες συναρμογής

καθώς και στις τιμές της υπερύψωσης, γιατί εκεί παρατηρούνται γενικά διαφοροποιήσεις όσον αφορά την διανυόμενη ταχύτητα των συρμών.

Τέλος, εφόσον πραγματοποιήθηκε μια γενική ανακεφαλαίωση, αναπτύχθηκαν τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα παραπάνω και κάποια γενικά σχόλια, όσον αφορά, γραμμές υψηλών ταχυτήτων και συμβατικές γραμμές

2. Τεχνικά χαρακτηριστικά συμβατικών γραμμών και υψηλών ταχυτήτων (Επιδομή / Υποδομή)

2.1 Γενικά στοιχεία - Ορισμοί Επιδομής / Υποδομής

Η σιδηροδρομική γραμμή, που με τα παράλληλα και συμπληρωματικά προς αυτήν έργα και εγκαταστάσεις αποτελεί την υποδομή του σιδηροδρόμου ως μεταφορικού μέσου, περιλαμβάνει δυο επιμέρους υποσυστήματα:

- Την επιδομή (σιδηροτροχιές, στρωτήρες, σύνδεσμοι, έρμα, υπόστρωμα)

a) Σιδηροτροχιές (υποστηρίζουν και κατευθύνουν τους τροχούς του συρμού)

b) Στρωτήρες (αποτελούν την συνιστώσα της σιδ/κης επιδομής μεταξύ σιδ/χιας και έρματος)

c) Σύνδεσμοι (το σύνολο των υλικών που εξασφαλίζουν την σύνδεση της σιδ/χιας – στρωτήρα)

d) Έρμα (σκύρο) (η στρώση από θραυστά σκύρα που βρίσκεται κάτω από τον στρωτήρα)

e) Άλλα υλικά:

1) Αλλαγές τροχιάς (το σύνολο των συσκευών και εξαρτημάτων μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αλλαγή κατεύθυνσης κίνησης του σιδ/κου οχήματος χωρίς διακοπή της πορείας του)

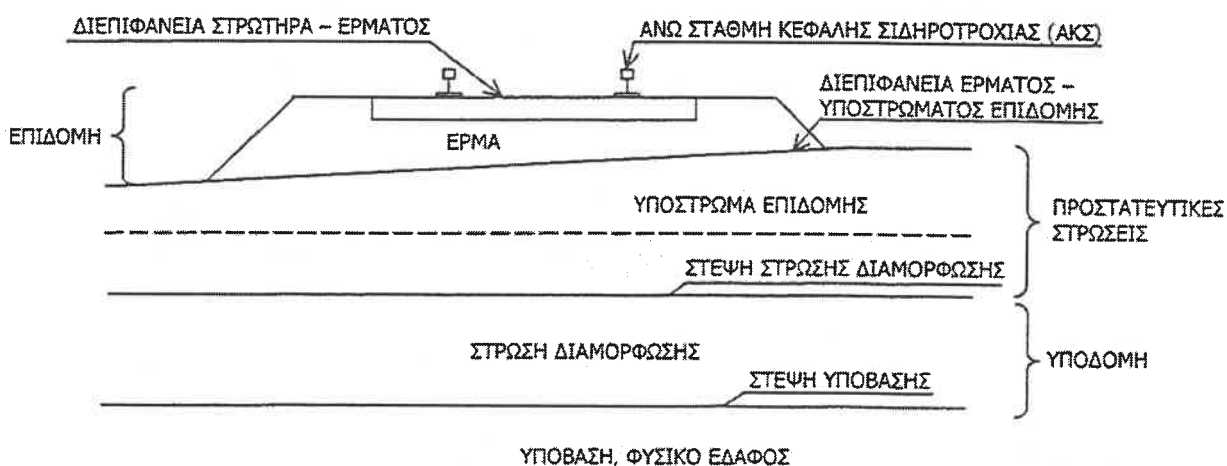
2) Συγκολλήσεις

- Την υποδομή (στρώση διαμόρφωσης, βάση ή υπόβαση).

Με τον όρο, λοιπόν, Υποδομή, στον σιδηρόδρομο αποδίδονται δυο έννοιες:

1. Η υποδομή του σιδηροδρόμου, με την έννοια «ο,τι αποτελεί την βάση για την εκτέλεση μιας εργασίας, για την δημιουργία ενός έργου» περιέχει το σύνολο των κατασκευών επί των οποίων κινείται ο σιδηρόδρομος. Στο Παράρτημα Ι του Κανονισμού (ΕΟΚ) 2598/70, υπάρχει πλήρης ορισμός των έργων υποδομής για τις μεταφορές και είναι «το σύνολο των οδών ή γραμμών και μονίμων εγκαταστάσεων των τριών μέσων μεταφοράς (οδού, σιδηρόδρομου, πλωτών), κατά το μέτρο που είναι αναγκαίες για την εξυπηρέτηση και την ασφάλεια της κυκλοφορίας».
2. Από αυτό το σύνολο των κατασκευών, που περιγράφεται στο (1), **εκείνο το επιμέρους υποσύστημα** που βρίσκεται κάτω από την επιδομή και μεταφέρει τα φορτία στο έδαφος. [6]

Στο σχήμα 3 φαίνεται σχηματικά η δομή μιας σιδηροδρομικής γραμμής και τα επιμέρους υποσυστήματα ή κατασκευές (επιδομή, προστατευτικές στρώσεις, υποδομή).



σχ.3 Σιδηροδρομική γραμμή: «σιδερένια» οδός μεταφοράς – Δομή σιδ/κης γραμμή πηγή [38]

Με τον όρο προστατευτικές στρώσεις εννοούνται εκείνες οι στρώσεις που χρησιμοποιούνται:

- για να παραλαμβάνουν μέρος της φόρτισης, έτσι ώστε να προστατεύεται το υπέδαφος από πολύ υψηλές τάσεις, ιδιαίτερα όταν αυτό είναι μειωμένης φέρουσας ικανότητας
- για να προστατεύουν το έδαφος από παγετό και επιφανειακά ύδατα

- ως φίλτρο και «διαχωριστικό» μεταξύ του έρματος και της υποδομής για να αποφευχθεί η ανάμειξή τους ή η άνοδος λεπτόκοκκου υλικού μέσα στο έρμα.

Για τις προστατευτικές στρώσεις χρησιμοποιούνται λεπτόκοκκα υλικά με διάμετρο κόκκου από 0,02 mm έως 20 mm.

Με βάση το σχ.3, οι σιδηροτροχιές μέσω συνδέσμων στερεώνονται επί των στρωτήρων ενώ μεταξύ σιδηροτροχιάς και στρωτήρα παρεμβάλλεται ελαστικό υπόθεμα. Οι στρωτήρες εδράζονται σε **στρώση έρματος** (~40cm), η οποία με την σειρά της εδραζόμενη σε υπόστρωμα (συμπυκνωμένο αμμοχάλικο) μεταφέρει τα φορτία της γραμμής στο έδαφος.

Σκοπός της διαμόρφωσης αυτής, είναι η ασφαλής ανάληψη και μεταφορά από την επιδομή στην υποδομή των στατικών και δυναμικών φορτίων τόσο σε ευθεία όσο και σε καμπύλη τροχιά, καθώς και ανάληψη, μεταφορά και απόσβεση δυναμικών κραδασμών που προκύπτουν από την επιρροή των αναρτημένων και μη αναρτημένων μαζών των συρμών, από την ανεπάρκεια υπερύψωσης των γραμμών σε καμπύλες, (σε σχέση με την εκάστοτε ταχύτητα συρμών), την τροχοπέδηση κλπ. Όλα τα παραπάνω με τρόπο που να εξασφαλίζουν και την άνεση του επιβάτη. [38]

2.2 Τύποι επιδομής για υψηλές ταχύτητες - Σύγκριση

Με βάση τα αποτελέσματα ερευνών - μελετών και δοκίμων που έχουν πραγματοποιηθεί ή ανατεθεί κατά καιρούς κυρίως από το Γερμανικό Σιδ/κο Δίκτυο (DB), το Αυστριακό (ÖBB) και το TU - München Prüfamt für Landverkehrswegebau, κατέληξαν σε δυο τύπους επιδομής κατάλληλους για υψηλές ταχύτητες:

a) Σκυρογραμμή με:

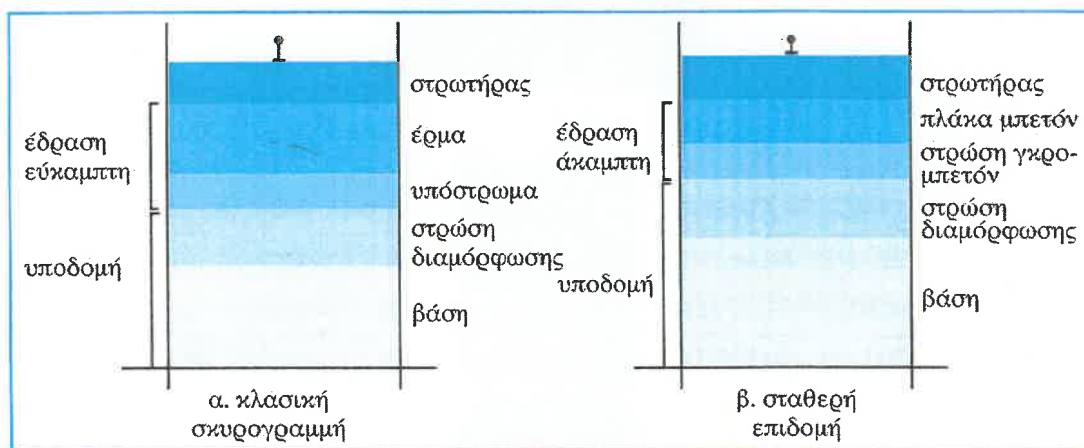
- Πάχος κλίνης έρματος 40 cm
- Σιδ/χιες UIC 60 (κατηγορία A)
- Στρωτήρες από προεντεταμένο σκυρόδεμα B 75 σε απόσταση 63 cm
- Σύνδεσμο υψηλής ελαστικότητας π.χ. IORV 300

- Επίστρωση αδιαπέρατου (άνευ πόρων) γεωφάσματος με μέτρο ακαμψίας $C=0,10\text{N/mm}^3$ στα επιχωματωμένα άκρα των γεφυρών κάτω από το έρμα και επέκταση αυτού 10 m επί του επιχώματος της γραμμής και

b) **Σταθερή επιδομή (Σ.Ε.)** με:

- Φέρουσα στρώση από οπλισμένο σκυρόδεμα ή
- Φέρουσα στρώση από Ασφαλτο.

Στο σχήμα 4 που ακολουθεί μπορούν να διακριθούν οι φάσεις από τις οποίες αποτελούνται οι δυο τύποι επιδομής σε μια εγκάρσια τομή σιδηροδρομικής γραμμής στη θέση της σιδ/χιας.



σχ. 4 εγκάρσια τομή σιδ/κης γραμμής στη θέση σιδ/χιας

πηγή [6]

Για πληρέστερη κατανόηση της τεχνικής και λειτουργικής διαφοράς μεταξύ των δυο τύπων επιδομής της γραμμής για υψηλές ταχύτητες (Σκυρογραμμή και Σ.Ε.) αναφέρουμε την παρακάτω πρακτική ανάλυση:

Σε μια σιδηροδρομική γραμμή για καλύτερη κατανομή των κυκλοφοριακών φορτίων (αξονικά φορτία) θα πρέπει η σιδηροτροχιά να έχει την δυνατότητα ελαστικής βύθισης στην θέση έδρασής της (θέση συνδέσμου) κατά την διέλευση του φορτίου, ώστε η κατανομή του φορτίου να γίνεται σε περισσότερους στρωτήρες. Αυτή η ελαστική βύθιση εξαρτάται τόσο από την υποδομή όσο και από την επιδομή.

Στη Σκυρογραμμή, η ελαστική βύθιση της σιδηροτροχιάς, ανάλογα με την ποιότητα της υποδομής - επιδομής, κυμαίνεται από 0,7 έως 1,0 mm περίπου και προέρχεται από την κλίση έρματος και υποδομή κατά 0,3 έως 0,7 mm και από την ελαστικότητα του συνδέσμου κατά 0.05 έως 0,35 mm.

Από τις συνεχείς ταλαντώσεις της κλίνης έρματος κατά την διέλευση των συρμών επέρχεται, όπως είναι φυσικό, μια σχετική φθορά του έρματος, διότι παρά την ελαστικότητα που παρουσιάζει η κλίση έρματος παραμένει σχεδόν πάντοτε μια μικρή παραμόρφωση της δομής της, με αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση της αρχικής ελαστικής βύθισης της σιδ/χίας με όλες τις αυτονόητες συνέπειες για τη γραμμή. Όλα αυτά θα μπορούσαν να αποφευχθούν ή να ελαχιστοποιηθούν αν την κλίση του έρματος δεν την επηρέαζαν οι προερχόμενες από τα κυκλοφορικά φορτία ταλαντώσεις. Με τη χρησιμοποίηση στρωτήρα με μεγαλύτερη επιφάνεια έδρασης και συνδέσμους μεγάλης ελαστικότητας μπορεί να αυξηθεί ο χρόνος που απαιτείται για την αντικατάσταση του έρματος.

Αναζητήθηκε λοιπόν αντικαταστατής της κλίνης έρματος αλλά με δυνατότητα ελαστικής βύθισης της σιδ/χίας για τους λόγους που προαναφέραμε. Αντικαταστάτης της κλίνης έρματος προϋπήρχε, στην Ευρώπη τουλάχιστον, και είναι η ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ (Σ.Ε.). Από το 1959 οι DB είχαν στρώση τη γραμμή στην σήραγγα *Hengstenberg* μήκους 233 m με Σ.Ε. Αυτή ήταν ίσως η πρώτη προσπάθεια αντικατάστασης της κλίνης έρματος.

Η δεύτερη επίσης δοκιμαστική στρώση Σ.Ε. έγινε από τους DB το 1972 στην περιοχή του σιδηροδρομικού σταθμού *RHEDA*, από τον οποίο πήρε και το όνομα της "ΣΤΑΘΕΡΗ ΕΠΙΔΟΜΗ RHEDA". Η τελειοποίηση της Σ.Ε. τύπου *RHEDA* έγινε το 1989 στη σήραγγα *Sengeberg*, μήκους στρώσης 554 m με συμμετοχή των *DB/BZA - München*, του *TU-München-Prüfamt für Landverkehrswegebau* και της εταιρίας *Dyckerhof und Widmann*. Ο τύπος Σ.Ε. *RHEDA* είναι στους DB επικρατέστερος όλων των άλλων τύπων με συνολικό μήκος στρωμένης γραμμής 153 km επί συνόλου 330 km περίπου.[7]

2.3 Τύποι Σταθερής Επιδομής (Σ.Ε.) – Δοκιμαστικές στρώσεις – Αντικατάσταση κλασσικής σκυρογραμμής από Σ.Ε.

Αρχικά η επιλογή από τα διάφορα σιδ/κα δίκτυα μιας περισσότερο σταθεροποιημένης επιδομής, έγινε για να αντιμετωπισθούν υφιστάμενα προβλήματα, όπως για παράδειγμα στο *Detroit* της Αμερικής την δεκαετία του 1920 κατασκευάστηκε, ίσως η πρώτη επιδομή γραμμής, από πλάκα σκυροδέματος μήκους 404,50 m, πλάτους 3,00 m και πάχους 53 cm με σκοπό την μεταφορά μεγαλύτερων φορτίων, ενώ για τα Ευρωπαϊκά σιδ/κα δίκτυα και κυρίως για το Γερμανικό, που θεωρείται πρωτοπόρο στην σημερινή Σ.Ε., η αρχική απόφαση αντικατάστασης της κλασσικής σκυρογραμμής ήταν για να αντιμετωπισθεί η αρκετά δύσκολη και δαπανηρή συντήρηση της γραμμής μέσα σε σήραγγες, αλλά και σε τουριστικές περιοχές λόγο του θορύβου που προκαλούν τα αυτοκινούμενα βαριά μηχανήματα συντήρησης σκυρογραμμής και του νέφους σκόνης που δημιουργείται κατά την εκτέλεση διάφορων

εργασιών συντηρήσεων σκυρογραμμής, όπως π.χ. καθαρισμός ή αντικατάσταση έρματος κλπ. Έτσι ξεκίνησε η αντικατάσταση της σκυρογραμμής από μια περισσότερο σταθεροποιημένη επιδομή, με την γνωστή πλέον ονομασία Σταθερή Επιδομή (Σ.Ε.)

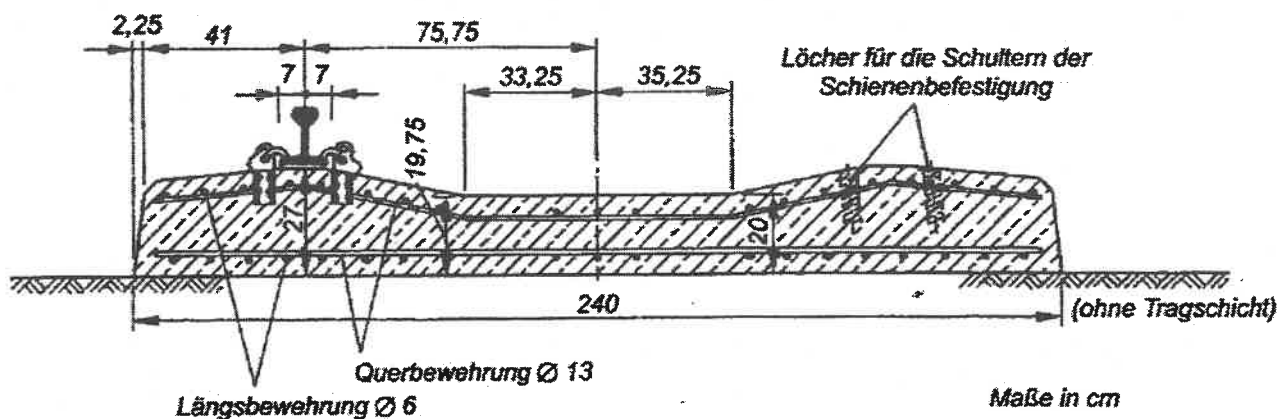
Δοκιμαστικές στρώσεις σε διάφορα δίκτυα

Το 1967 οι Αγγλικοί σιδ/μοι (BR) με την προτροπή της *ORE Komitee D78* της UIC και την συμμετοχή και άλλων σιδ/κων δικτύων πραγματοποίησαν δοκιμαστική στρώση Σ.Ε. Συνολικά στρώθηκαν στο *Radcliffe-on-Trent* 6 τμήματα των 72 m σε φέρουσα πλάκα σκυροδέματος πάχους 15 cm.

Τα σιδ/κα δίκτυα, NS (Ολλανδία), SNSF (Γαλλία) και LTE (*London Transport*) κατασκεύασαν σύστημα Σ.Ε. με οπλισμένη και διαμορφωμένη την άνω επιφάνεια της στρώσης σκυροδέματος και χρησιμοποίησαν πλάκες "Κ" με διαφορετικού τύπου συνδέσμους, CFF (Ελβετία) χρησιμοποίησε το σύστημα *RS-STEDEF* (ελαστική έδραση διμερούς στρωτήρα σε μπότα ελαστική), BR (Αγγλία) έστρωσε 2 τμήματα με Σ.Ε. συστήματος *PACT* (*Paved Concrete Track*), δηλαδή με προκατασκευασμένα τμήματα από προεντεταμένο σκυρόδεμα κλπ. Γενικά αυτού του είδους οι κατασκευές Σ.Ε. προσέφεραν μια περισσότερο άκαμπτη έδραση της σιδ/χιας έναντι της σκυρογραμμής. Οι BR εξασφάλιζαν βύθιση 1 mm σε καταπόνηση από φορτίο μεμονωμένου άξονα 250 KN. Προφανώς δεν ήταν ακόμα πλήρως γνωστά τα πλεονεκτήματα από μια καλύτερη κατανομή του φόρτου από την σιδ/χια και κατά δεύτερο λόγο δεν είχαν ακόμα κυκλοφορήσει τα κατάλληλα ελαστικά υποθέματα γραμμής με την μεγάλη ελαστικότητα ($C_{stat} = 20 \pm 25 \text{ KN/mm}$, $C_{dyn} = 40 \text{ KN/mm}$).

Το σύστημα Σ.Ε. *PACT* στρώθηκε σε σήραγγες στην Αγγλία και συνδυάστηκε με την μείωση του ύψους από κεφαλής σιδ/χιας που απαιτούσε η κατασκευή της ηλεκτροκίνησης. Το ίδιο σύστημα στρώθηκε σε επίχωμα το 1975 στην Ισπανία. Ακολούθησαν και άλλες δοκιμαστικές στρώσεις στην Ν. Ζηλανδία, Αυστραλία, Αγγλία και Καναδά. Με την στρώση του *Rogers-Pass* στον Καναδά (για αξονικά φορτία 30 τόνων και 60 εκατομμύρια τόνους / έτος) και μέχρι το 1988 είχαν στρωθεί συνολικά 78 km γραμμής με Σ.Ε. του συστήματος αυτού.

Η τελική μορφή του συστήματος Σ.Ε. *PACT* φαίνεται στην (εικόνα 1) και αποτελείται από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος, πλάτους 2,40 m, μεταβαλλόμενο πάχος 20 – 27 cm και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ανοιχτή γραμμή, σήραγγες, γέφυρες.



εικόνα 1 Σ.Ε. συστήματος PACT στους Αγγλικούς σιδ/μους

πηγή [40]

Στο σύστημα αυτό που χρησιμοποιεί σιδ/χίες με μέγιστο πλάτος πέλματος 150 mm, συνεχώς εδραζόμενες, δεν ήταν δυνατόν να επιτευχθεί η απαιτούμενη από τον κανονισμό των DB AG (*Anforderungskatalog der FF*), ελαστικότητα $C_{stat} = 20 - 25 \text{ KN/mm}$ (απόσταση στρωτήρων 650 mm), διότι η ελαστικότητα αυτή μεγάλωνε κατά πολύ το ενδεχόμενο εμφάνισης οριζόντιων μετακινήσεων με την κεφαλή της σιδ/χιας.

Σύμφωνα με τα εργοταξιακά στοιχεία η ημερήσια απόδοση για 8ωρη εργασία ήταν 350 m και σε ευνοϊκές περιπτώσεις στρώθηκαν μέχρι 700m.

Στην Ιαπωνία από το 1965, ένα χρόνο μετά από την στρώση της γραμμής *Tokaido* μεταξύ *Tokyo - Osaka* (1964), με κλασσική Σκυρογραμμή, μήκους 515 km είχαν αρχίσει οι μελέτες για το σύστημα Σ.Ε. με προκατασκευασμένες πλάκες προεντεταμένου σκυροδέματος. Το 46% του μήκους της γραμμής υψηλών ταχυτήτων *Tokaido* στρώθηκε επάνω σε τεχνικά έργα, όπου η φθορά του έρματος της σκυρογραμμής είναι αισθητά μεγαλύτερη και συντομότερη.

Οι Γερμανικοί σιδηρόδρομοι (DB) και οι πρώην Ανατολικογερμανικοί (DR) είχαν αρχίσει τις δοκιμαστικές στρώσεις διάφορων τύπων Σ.Ε. προ πολλών ετών. Το 1964 οι DR χρησιμοποίησαν προκατασκευασμένες πλάκες με την ένδειξη DR1 μήκους 3,24 m, πλάτους 2,20 m, και πάχους 18-21 cm και ως σύνδεσμοι χρησιμοποιήθηκαν οι ελατηριωτοί ή οι καρφωμένοι σε τάκους από ξύλο εντός του σκυροδέματος. Το 1977 στρώθηκαν από τους DB σε γραμμή μικτής κυκλοφορίας με μεγάλο ημερήσιο κυκλοφοριακό φόρτο και ταχύτητα $V=160 \text{ km/h}$ που βρίσκεται στη Βαυαρία μεταξύ *DACHAU-KARLSFELD*, πέντε (5) διαφορετικοί τύποι Σ.Ε., ήτοι:

1. RHEDA (άνευ σκάφης) σε μήκος 400 m (εικ. 2)
2. Προκατασκευασμένες φέρουσες πλάκες προεντεταμένου σκυροδέματος με εγκάρσια προένταση σε μήκος 430m (εικ. 3)
3. Προκατασκευασμένα πλαίσια εκ σκυροδέματος (εικ. 4)
4. Μικρά προκατασκευασμένα τμήματα εκ σκυροδέματος
5. Στρωτήρες εκ σκυροδέματος εντός ελαστικής μπότας.



εικ. 2 (Rheda, άνευ σκάφης, σε μήκος 400m)

πηγή [7]

Από τους πέντε (5) προαναφερόμενους δοκιμαστικούς τύπους Σ.Ε., οι δυο τελευταίοι (4 και 5) έχουν καταστραφεί ολοσχερώς στα δυο πρώτα χρόνια κυκλοφορίας και αντικαταστάθηκαν από Σκυρογραμμή. Των υπολοίπων τριών η σημερινή τους κατάσταση, και μετά από 26 χρόνια, εμφανίζεται στις εικόνες (2,3 και 4).



εικ.3 (Προκατασκευασμένες φέρουσες πλάκες σκυροδέματος με εγκάρσια προένταση , σε μήκος 430 m)

πηγή [7]

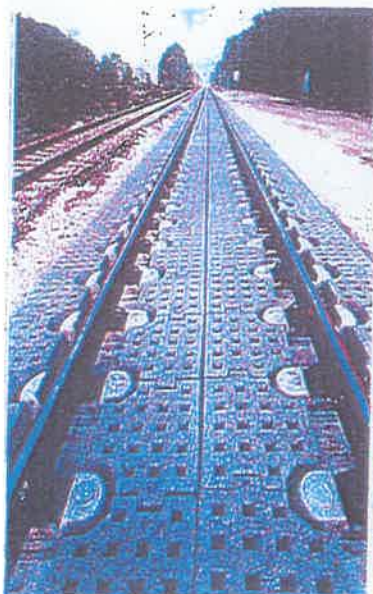


εικ. 4 Προκατασκευασμένα πλαίσια εκ σκυροδέματος

πηγή [7]

Το 1996 έγινε από τους *DB* η δεύτερη «μαζική» δοκιμαστική στρώση διαφόρων τύπων Σ.Ε. στην περιοχή *Waghausen* της γραμμής *Mannhei – Stuttgart*. Στην περιοχή αυτή στρώθηκαν δοκιμαστικά 7 διαφορετικοί τύποι Σ.Ε., ήτοι:

- *Rasengleis* σε μήκος 390 m
- *Hochtief / Schreck – Mieves* σε μήκος 390 m (εικ. 5)
- *Heitkamp* σε μήκος 390 m (εικ. 6)
- *Zublin BTE* σε μήκος 390 m (εικ. 7)



Εικ. 5
(Hochtief/Schreck-Mieves)



Εικ. 6
(Heitkamp)



Εικ. 7
(Züblin BTE)

πηγή [7]

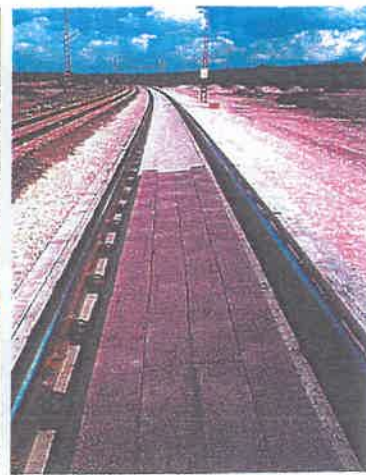
- *System Clailsheim FFC* σε μήκος 390 m (εικ. 8)
- *Betonschwellen auf ATS* σε μήκος 390 m (εικ. 9)
- *Heilit – Woerner* σε μήκος 390 m (εικ. 10)



Εικ. 8
(System Clailsheim FFC)



Εικ. 9
(Betonschwellen auf ATS)



Εικ. 10
(Heilit-Woerner)

πηγή [7]

Έχουν γίνει πολλές δοκιμαστικές στρώσεις Σ.Ε. σε διάφορα τμήματα των γραμμών των DB, όπως π.χ. πρόσφατα στο σιδηροδρομικό σταθμό ROT-MALSCH που στρώθηκε ο τύπος Σ.Ε. **Bögl** με προκατασκευασμένες πλάκες.

Η δυναμική επαναφορά στο προσκήνιο της Σ.Ε. τα τελευταία χρόνια και η ραγδαία εξέλιξη αυτής υπαγορεύτηκαν εκτός των άλλων και από την ανάγκη καλύτερης προσφερόμενης ποιότητας από τον σιδηρόδρομο με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης της γραμμής και τα δυο αυτά επιτυγχάνονται αναμφισβήτητα με την χρησιμοποίηση της Σ.Ε.

Για το Ελληνικό Σιδ/κο δίκτυο υπάρχει και τρίτος ιδιαίτερα σοβαρός λόγος χρησιμοποίησης της Σ.Ε. και αυτός είναι η κακή ποιότητα του χρησιμοποιημένου έρματος γραμμής η οποία οφείλεται ως γνωστόν στα ασβεστολιθικά πετρώματα. Αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός κατασκευής τύπου Σ.Ε. RHEDA στην περιοχή των Τεμπών που κατανοήθηκε εξ' αρχής η αναγκαιότητα της Σ.Ε. για τον ΟΣΕ.
[7]

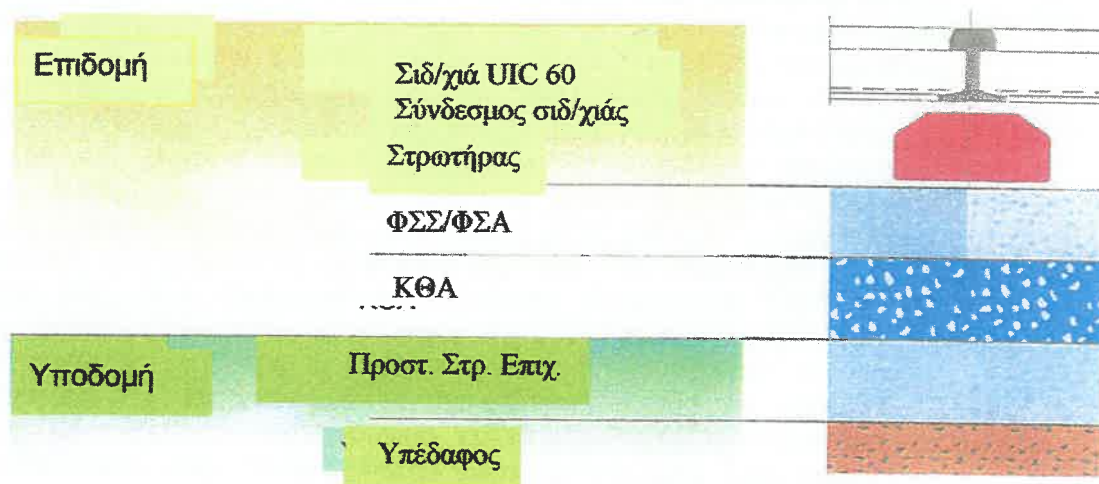
2.4 Γιατί και πως επιλέγει η Σ.Ε. για να αντικαταστήσει την κλασσική Σκυρογραμμή

Όπως προκύπτει και από τις προηγούμενες αναφορές, από την αρχή που ξεκίνησε η σκέψη/ανάγκη αντικατάστασης της κλασσικής σκυρογραμμής, ανεξάρτητα από την αιτία (ελαχιστοποίηση της συντήρησης ή μεταφορά μεγαλύτερων αξονικών φορτίων κλπ), στόχος ήταν η κατασκευή μιας περισσότερο σταθεροποιημένης επιδομής γραμμής με δυνατότητα – χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων στην υποδομή – μεταφοράς των στατικών και δυναμικών καταπονήσεων που προκαλούνται από την κυκλοφορία και μεταβιβάζονται από τους τροχούς στις σιδ/χίες και από εκεί στην υποδομή. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην χρησιμοποίηση του σκυροδέματος σαν κύριο υλικό για όλες τις περιπτώσεις. Με την πάροδο των ετών, τις αυξανόμενες ανάγκες κυρίως, λόγο της συνεχούς αύξησης των ταχυτήτων αλλά και της απαίτησης για ποιοτικό σιδ/μο, την θετική εμπειρία που είχε ήδη αποκτηθεί από την κυκλοφορία σε γραμμές με επιδομή σταθεροποιημένη με σκυρόδεμα, καθώς και τα υψηλά και συνεχώς αυξανόμενα κόστη συντήρησης της σκυρογραμμής, ανάγκασαν τα σιδ/κα δίκτυα, με την βοήθεια της επιστήμης και κυρίως των καθηγητών του Μονάχου κ. *Eisenmann* και κ. *Leykauf*, αλλά και της βιομηχανίας, να μελετήσουν σοβαρά το όλον θέμα και να καταλήξουν στην επιλογή του πολυστρωματικού συστήματος Σταθερής Επιδομής (γνωστό και από την οδοποιία).

Το σύστημα αυτό αποτελείται από τις στρώσεις (εικ.11) :

- Κατεργασμένο Θραυστό Αμμοχάλικο με τσιμέντο (ΚΘΑ) – στρώνεται επάνω στην προστατευτική στρώση επιχώματος (εξασφαλίζει ολόκληρο το πολυστρωματικό σύστημα από την αύξηση δυναμικών καταπονήσεων)

- Φέρουσα Στρώση Σκυροδέματος ή Ασφάλτου (ΦΣΣ ή ΦΣΑ) - στρώνεται επάνω στην στρώση ΚΘΑ και
- Εσχάρα γραμμής εγκιβωτισμένη ή επικαθήμενη στην φέρουσα στρώση



εικ 11 Διάταξη στρώσεων Σ.Ε. επάνω σε επίχωμα

πηγή [40]

Η επιλεγείσα πολυστρωματική Σ.Ε., η οποία αποδεδειγμένα πλέον αντιμετωπίζει τις αδυναμίες που παρουσιάζει η σκυρογραμμή γενικώς, αλλά και ειδικότερα στις υψηλές ταχύτητες, έχει βασικές διαφορές από την σκυρογραμμή όπως θα αναπτυχθεί παρακάτω, τόσο ως προς το θεωρητικό μέρος, όσο και ως το λειτουργικό και το κατασκευαστικό.

Εσχάρα γραμμής

Η σκυρογραμμή προσομοιάζεται ως «πλωτή» εσχάρα γραμμής η οποία εδράζεται εντός της κλίνης έρματος, σε αντίθεση με την Σ.Ε. της οποίας η εσχάρα γραμμής, (περνάνε μέσα από τις 4^{ες} οπές Φ50 των στρωτήρων οι κατά μήκος οπλισμοί 4Φ16 ή 4Φ20 προς εξασφάλιση της σύνδεσης αυτών με το σκυρόδεμα πληρώσεως εικ.18), είναι εγκιβωτισμένη εντός σκυροδέματος (μονολιθικό σύστημα) ή εδράζεται επάνω σε φέρουσα πλάκα σκυροδέματος ή ασφάλτου (επικαθήμενο σύστημα). Σε κάθε διέλευση συρμού η «πλωτή» έδραση της εσχάρας σκυρογραμμής οδηγεί στην αύξηση των κατακόρυφων και οριζόντιων δυναμικών φορτίων, τα οποία με τη σειρά τους οδηγούν στην περαιτέρω χαλάρωση της γραμμής με άμεση συνέπεια στην ποιοτική προσφορά, για την οποία όλα τα σιδ/κα δίκτυα καταβάλουν πολύ μεγάλες προσπάθειες να την διατηρήσουν σε υψηλά επίπεδα, καθώς και στην επέκταση της χαλάρωσης σε μεγαλύτερο μήκος της γραμμής (εικ. 12).



εικ. 12 Εσχάρα γραμμής σε σκυρογραμμή

πηγή [9]

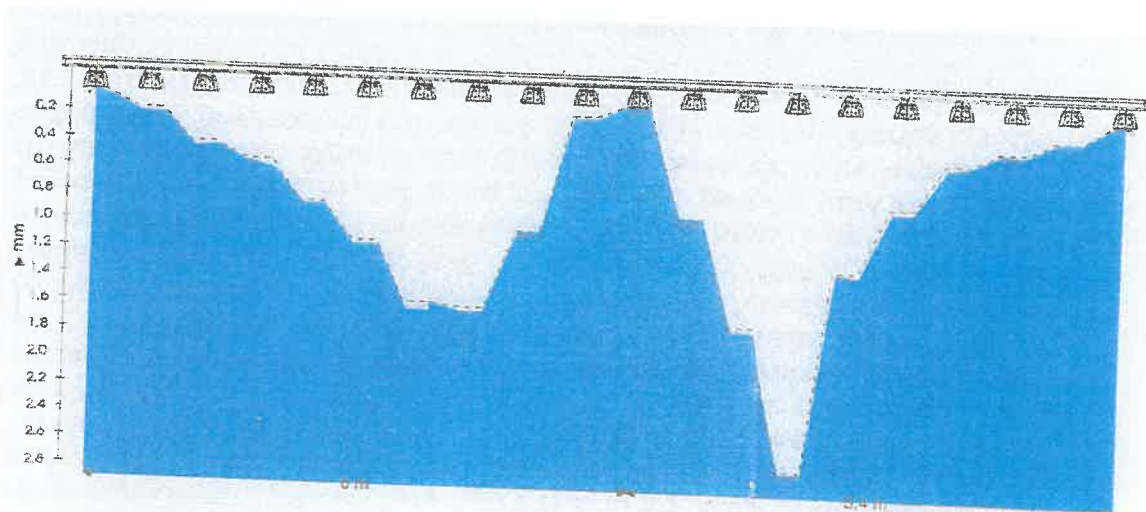
Ταλαντώσεις έρματος

Τα φορτία κυκλοφορίας και η εξ αυτών καταπόνηση της κλίνης του έρματος προκαλούν μετατοπίσεις (βυθίσεις) και μεταβολές στην μορφή των κόκκων του έρματος (θραύσεις και φθορές λόγω τριβών) οι οποίες πρέπει να αποκαθίστανται με την εκτέλεση, κατά τακτά διαστήματα, εργασιών συντήρησης της γραμμής. Όσο η ταχύτητα κυκλοφορίας παραμένει στην περιοχή, μέχρι περίπου 200 km/h οι προκαλούμενες από τα τρένα ταλαντώσεις ελάχιστα επηρεάζουν. Γενικώς ισχύει για την προωθούμενη ενεργειακή ροή, ότι αυτή παρουσιάζεται ως συνάρτηση της πίεσης του έρματος και των πραγματικών ταχυτήτων των ταλαντώσεων οι οποίες αυξάνουν με την αύξηση της ταχύτητας του τρένου. Μετρήσεις που έγιναν το 1993 με ICE και $V_{\max} = 250 \text{ km/h}$, στην νέα γραμμή *Hannover-Würzburg*, από την υπηρεσία ανάπτυξης των DB AG (*Dipl. Ing. Reinhold Rumb*) έδειξαν ταχύτητες ταλαντώσεων που εικάζεται ότι οι τιμές τους βρίσκονται επάνω από κρίσιμη περιοχή του έρματος η οποία ερευνάται. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, σε συνδυασμό με την μεγάλη πίεση του έρματος, προμηνύουν ότι το έρμα σε γραμμές υψηλών ταχυτήτων θα αντικαθίστανται πολύ γρηγορότερα από τον αναμενόμενο χρόνο. Βεβαίως η σκυρογραμμή καλύπτει ακόμα το μεγαλύτερο μήκος σιδ/κης γραμμής διεθνώς, αλλά έδειξε όμως με τις αυξημένες ταχύτητες ότι έχουν ήδη ξεπεράσει τα οικονομικά της όρια. Για παράδειγμα μετά την αύξηση ταχυτήτων διπλασιάστηκε το κόστος συντήρησης της γραμμής, λόγω μείωσης του χρόνου επανάλωσης της συντήρησης στο μισό.

Καταπόνηση έρματος και παραμόρφωση γραμμής

Θα πρέπει ακόμα να αναφερθεί ότι στη σκυρογραμμή η διάχυση (διασπορά) της καταπόνησης και της παραμόρφωσης της γραμμής αυξάνει με την αύξηση της ταχύτητας και το μέγεθος της είναι ανάλογο με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η επιδομή γραμμής. Στην πραγματικότητα δυο μπορούν να θεωρηθούν ως κύριες αιτίες για την πρόκληση της εν λόγω διάχυσης της καταπόνησης και της παραμόρφωσης :

- Τα κενά που παρουσιάζουν πολλοί στρωτήρες (σε αφόρτιστη γραμμή) κάτω από την επιφάνεια εδράσεώς τους (σάλτα), δηλαδή να κρέμονται από τις σιδ/χίες και όχι να εδράζονται επάνω στο έρμα. Η απεικόνιση 13 παρουσιάζει μια τέτοια κατάσταση, όπως αυτή μετρήθηκε και αποτυπώθηκε τον Οκτώβριο του 1995 σε σκυρογραμμή της γραμμής *Fulda– Kassel* (τμήμα της νεοκατασκευασμένης σκυρογραμμής *Hannover – Würzburg*) και
- Η διαφορετική ελαστικότητα που εμφανίζεται σε διάφορες θέσεις της σκυρογραμμής.



εικ. 13 Κενά που μετρήθηκαν κάτω από αφόρτιστους στρωτήρες στο Σ. Σταθμό *Licherode* (1995) της νέας γραμμής *Hannover – Würzburg* πηγή [40]

Είναι γνωστό ότι η σκυρογραμμή προβλημάτιζε πάντοτε τα σιδ/κα δίκτυα και τους ασχολούμενους με τα σιδ/κα, επιστήμονες κλπ. Η πρόκληση όμως δόθηκε όταν οι συρμοί άρχισαν να αυξάνουν την ταχύτητα τους και η σκυρογραμμή εμφάνισε αδυναμία να ανταποκριθεί πλήρως στις ταχύτητες αυτές. Έτσι βλέπουμε για παράδειγμα, στα τέλη της δεκαετίας του 60' τον τότε υπουργό συγκοινωνιών της Δ. Γερμανίας, να αναθέτει στην εταιρεία

HSB την μελέτη αναζήτησης ενός συγκοινωνιακού συστήματος υψηλών ταχυτήτων και επιδόσεων.

Η εταιρεία που ανέλαβε την μελέτη αυτή είχε από τότε διαπιστώσει, ότι οι υψηλές ταχύτητες σε συνδυασμό με μεγάλα αξονικά φορτία, που θα πρέπει να συνυπάρχουν σε ένα τέτοιο συγκοινωνιακό σύστημα, θα απαιτούσαν σημαντικές αλλαγές, στις μέχρι τότε γνωστές τεχνικές, προκειμένου να εξασφαλιστεί πλήρως η επιτυχία του συστήματος αυτού. Το αξιοπερίεργο σε όλο αυτό το εγχείρημα – εκτός από την γρήγορη σχεδίαση και τους υπολογισμούς μιας Σ.Ε. – δεν ήταν η κατασκευή μιας φέρουσας πλάκας σκυροδέματος με στρωτήρες, αλλά το πώς με την επιλογή και μόνον του κατάλληλου στοιχείου εξαλείφθηκαν αμέσως οι αδυναμίες που παρουσίαζε η σκυρογραμμή ως προς την αντιμετώπιση των υψηλών ταχυτήτων. Αντικαθιστώντας μόνον το έρμα που είναι το πιο ευαίσθητο τμήμα της σκυρογραμμής με άλλο κατάλληλο υλικό, το οποίο δεν παρουσίαζε καμία ελαστική και πλαστική παραμόρφωση, δημιουργείται ένα νέο σύστημα με αρκετά πλεονεκτήματα τα οποία επιτυγχάνονται πλήρως, μόνον όταν το συγκεκριμένο νέο σύστημα επιλέγεται από την αρχή του έργου, δηλαδή από την μελέτη της νέας γραμμής και όχι όταν παρεισφρήσει εκ των υστερών σε έργο που αρχικά είχε επιλεγεί και στρωθεί σκυρογραμμή.

Με την αύξηση ταχυτήτων διαπιστώθηκε, τόσο από τα Ευρωπαϊκά σιδ/κα δίκτυα όπως το Γαλλικό SNCF, το Γερμανικό DB AG κλπ όσο και από το Ιαπωνικό JR, ότι επέρχεται μια γρήγορη αποσταθεροποίηση της γραμμής η οποία προκαλεί μεγάλες δυναμικές καταπονήσεις στο έρμα σε περιοχές χαμηλής συχνότητας (25 Hz) και υψηλής (60 έως 80 Hz). Οι καταπονήσεις αυτές οι οποίες αυξάνουν με την αύξηση της ταχύτητας έχουν σαν συνέπεια την πλήρη καταστροφή του έρματος, πάρα την χρησιμοποίηση πετρωμάτων μεγάλης σκληρότητας (βασαλτικά, γρανιτικά, κλπ) και την μεγάλη αύξηση του κόστους συντήρησης της γραμμής. Όλα αυτά συνηγορούσαν υπέρ της άποψης ότι η σκυρογραμμή έχει φθάσει πλέον στα όρια της.

Οι δυνατότητες της Σ.Ε. τόσο ως προς την σιδ/κη εκμετάλλευση και την ασφάλεια της κυκλοφορίας όσο και ως προς την ποιοτική προσφορά και την ελαχιστοποίηση του κόστους συντήρησης της γραμμής ήταν αναμφίβολα δεδομένες και επειδή στόχος όλων των σιδ/κων δικτύων ήταν και είναι η μείωση του γενικού κόστους σιδ/κης κυκλοφορίας (το οποίο αποτελείται από τα κόστη κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας), χωρίς βεβαίως να επηρεασθεί η ασφάλεια της κυκλοφορίας και η ποιοτική πρόσφορα, η επιλογή της Σ.Ε. σε αντικατάσταση της σκυρογραμμής ήταν πλέον επιβεβλημένη.

Όλα αυτά συντέλεσαν ώστε τα σιδ/κα δίκτυα διεθνώς (Γερμανία, Αυστρία, Ιταλία, Γαλλία, Ταϊβάν, Κινά, Κορέα κλπ) να έχουν στραφεί πλέον προς την Σ.Ε. Αξίζει να σημειωθεί ότι η Κίνα, είχε προγραμματίσει για το 2005 κατασκευή Σ.Ε. 1000 km. **[40]**

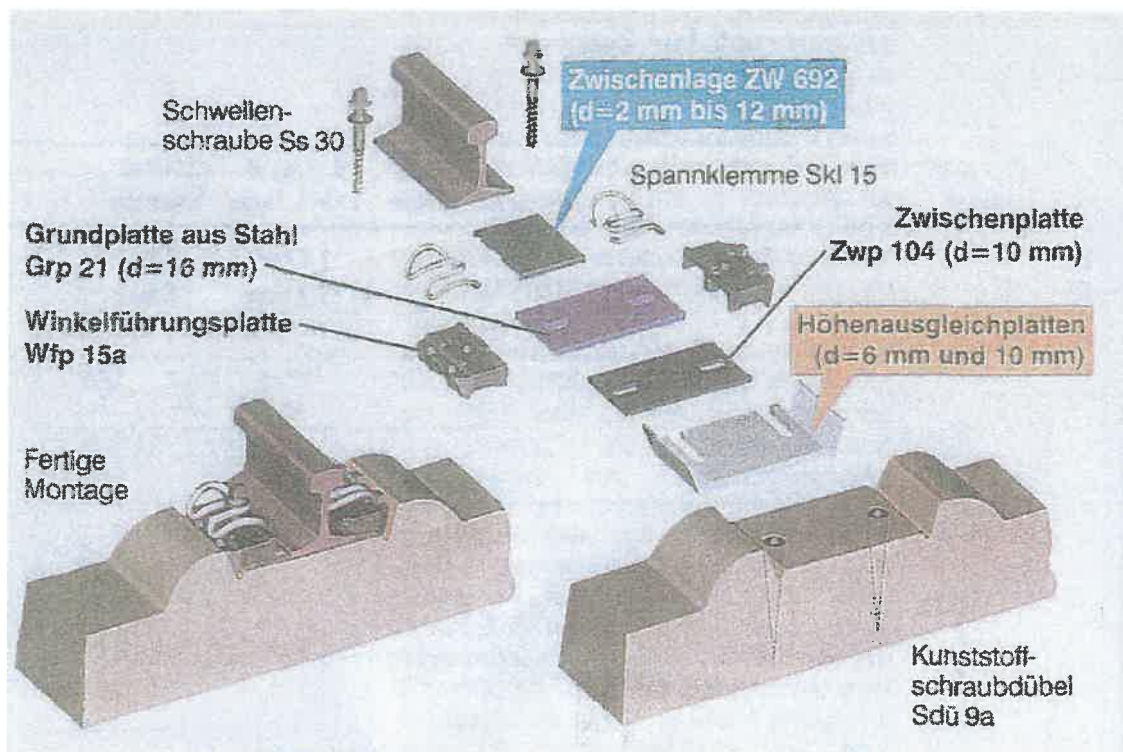
2.5 Χαρακτηριστικά Σταθερής Επιδομής (Σ.Ε.) - Υποδομής

Η στρώση γραμμής σε Σ.Ε. αρχικά ξεκίνησε για τις σήραγγες, επεκτάθηκε στη συνέχεια σε επίχωμα, και σήμερα στρώνεται ήδη και σε γέφυρες.

Στους Γερμανικούς Σιδηρόδρομους (DB) η Σταθερή Επιδομή (Σ.Ε.) έχει καθιερωθεί για:

- Τούνελ με $L > 500$ m
- Η G.S.=γραμμή υψηλών ταχυτήτων
- Γραμμές για τις οποίες απαιτείται ιδιαίτερη μεταχείριση όπως π.χ. τουριστικές περιοχές κλπ που πρέπει να αποφεύγονται οι συχνές εργασίες συντήρησης της γραμμής προς αποφυγή θορύβων κλπ.

Η δυσκολία επίτευξης στην άκαμπτη φέρουσα στρώση της Σ.Ε. ελαστικής βύθισης της σιδ/χίας αντιμετωπίστηκε με την χρησιμοποίηση ειδικής ελαστικής πλάκας μεγαλύτερων διαστάσεων από εκείνες του ελαστικού υποθέματος και με μέτρο ακαμψίας $C_{st}=20-22$ N/mm και $C_{dym}=40$ N/mm περίπου, (με $C_{dym} > C_{st}$ πάντα). Η ελαστική πλάκα προσδίδει βύθιση 1,5mm περίπου, και τοποθετείται στο σημείο έδρασης της σιδ/χίας (σε στρωτήρα ή σε φέρουσα πλάκα) επάνω στο οπλισμένο σκυρόδεμα και ακολουθούν κατά σειρά μεταλλική πλάκα ιδίων διαστάσεων με την ελαστική (προς αποφυγή ενδεχόμενης ανατροπής της σιδ/χίας), ελαστικό υπόθεμα και η σιδ/χια μετά των συνδέσμων και των μονωτικών και διευθέτησης εύρους πλακιδίων. (βλέπε εικ. 14)



εικ. 14 σύνδεσμος σιδ/χιας -στρωτήρα Ioarv 300-1 με τα επιμέρους στοιχεία πηγή [40]

όπου :

Zwischenlage ZW : Υπόθεμα ZW
Spannklemme SKL 15 : Ελατηριωτό αγκύριο
Zwischenplatte : Ελαστική πλάκα
Höhenausgleichplatten : Εξισωτική πλάκα
Kunststoffschraubdübel Sdu : Πλαστικά Uρα
Schwellenschraube Ss : Ελικωτό Ss
Grundplatte aus Stahl : Μεταλλική πλάκα
Winkelführungsplatte : Εξισωτική πλάκα
Fertige Montage : Έτοιμη συναρμολόγηση

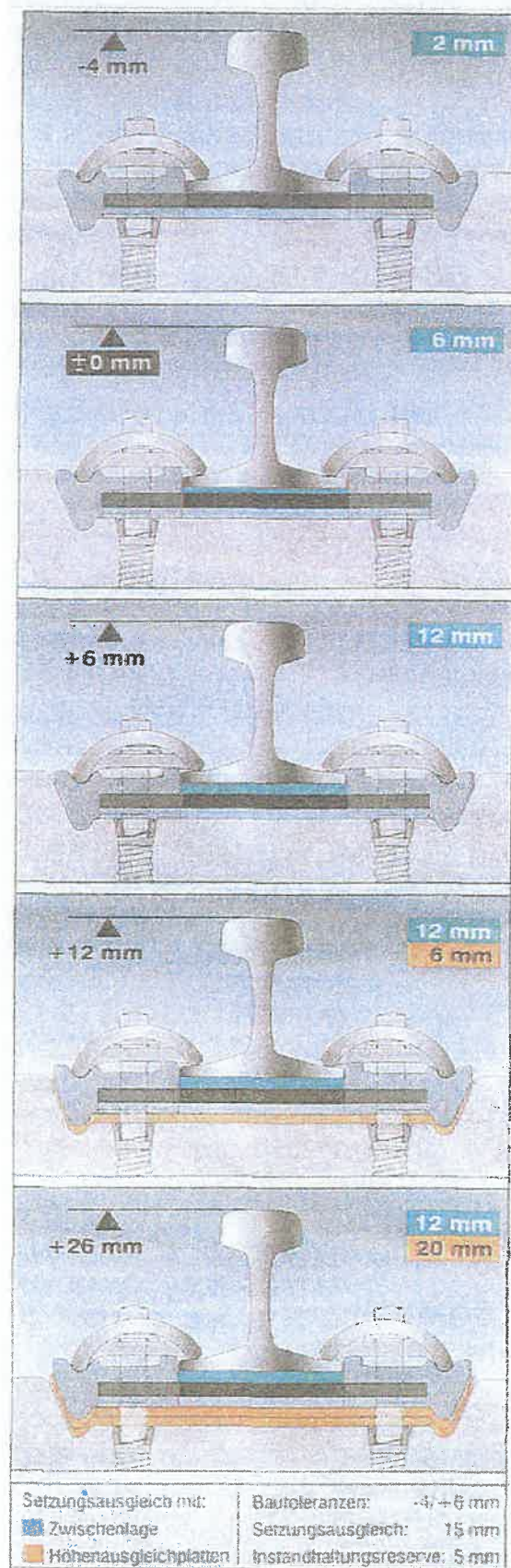
Ως γνωστόν οι εκ των υστέρων ρυθμίσεις σε γραμμές στρωμένες με Σ.Ε. είναι περιορισμένες και είναι δυνατές μόνον δια του χρησιμοποιούμενου στην Σ.Ε. συνδέσμου **Ioarv 300-1** (εικ.14). Για την διόρθωση των σφαλμάτων ή των παρουσιαζόμενων βυθίσεων υπάρχει η δυνατότητα μικρής ρύθμισης από τους συνδέσμους των σιδηροτροχιών της Σ.Ε., όπως φαίνεται στην εικ.15, ήτοι:

- a) -4mm έως $+26\text{mm}$ για το ύψος (υψομετρικά)
- b) $\pm 5\text{mm}$ για το εύρος (οριζοντιογραφικά)

Για κατασκευαστικό σφάλμα επιτρέπεται να χρησιμοποιηθούν, από τις παραπάνω ποσότητες, μόνον:

- 10mm για το ύψος (υψομετρική διευθέτηση)
- 2mm για το εύρος (οριζοντιογραφική διευθέτηση)

Στην περίπτωση ρύθμισης του συνδέσμου, όπως φαίνεται στην εικόνα 15, χρησιμοποιούμε κάποια ειδικά υποθέματα για τη αύξηση του ύψους ή και για το εύρος, δηλαδή, με χρώμα μπλε δίνεται το ελαστικό υπόθεμα ενώ με το πορτοκαλί δίνεται η ειδική πλάκα που αυξάνει το υψόμετρο της σιδ/χίας μέχρι και 20 mm περίπου. Με τον τρόπο αυτό διορθώνουμε τυχόν υψομετρικά ή οριζοντιογραφικά σφάλματα επί της γραμμής μέχρι τα όρια που έχουν αναφερθεί.



εικ. 15 παραδείγματα για δυνατότητα ρύθμισης στην έδραση της σιδήχιας του συνδέσμου Ioarv 300-1 πηγή [40]

Για την φέρουσα στρώση σκυροδέματος (BTS) χρησιμοποιείται σκυρόδεμα κατηγορίας B 35 και οπλισμός 0,8 έως 0,9% της διατομής του σκυροδέματος ώστε να ελέγχεται η ρηγμάτωση του σκυροδέματος.

Όταν πρόκειται για χρησιμοποίηση της σταθερής επιδομής (Σ.Ε.) επί επιχωμάτων, τότε θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη, ότι επιτρέπεται μόνον όταν:

- Είναι βέβαιο ότι οι τυχόν εμφανιζόμενες υποχωρήσεις του επιχώματος μετά την κατασκευή της (Σ.Ε.), ή λόγω της σταθεροποίησης του υπεδάφους, είναι δυνατόν να εξισωθούν στα πλαίσια των δυνατοτήτων που παρέχουν οι σύνδεσμοι.
- Η επιφάνεια των υπόγειων υδάτων είναι τουλάχιστον 1.50m κάτω από την κεφαλή της σιδηροτροχιάς.

Στις περιπτώσεις αυτές απαιτούνται περισσότερες πληροφορίες για το υπέδαφος ώστε να διαπιστωθούν οι παραμορφωτικές αντιδράσεις του. Για τον σκοπό αυτό πρέπει να ελέγχεται το υπέδαφος σε απόσταση 50,0 m από το μέσον και σε 6,0 m βάθος. Από τα αποτελέσματα των ελεγχών αυτών είναι δυνατόν να απαιτηθεί η λήψη και άλλων πρόσθετων μέτρων.

Στην άνω επιφάνεια του επιχώματος ή της στρώσης άμμου θα πρέπει, ακόμα και με αντικατάσταση στρώσεων από υλικό καλύτερης ποιότητας (εξυγίανση), να επιτυγχάνονται οι παρακάτω αντοχές:

- Για νέες γραμμές η συμπίκνωση του επιχώματος είναι $E_{v2} = 60 \text{ N/mm}^2$ επί της επιφάνειας του επιχώματος ή $E_{v2} = 120 \text{ N/mm}^2$ επί της επιφάνειας της άμμου.
- Για ανακαινισμένες γραμμές η συμπίκνωση του επιχώματος είναι $E_{v2} = 45 \text{ N/mm}^2$ επί της επιφάνειας του επιχώματος ή $E_{v2} = 100 \text{ N/mm}^2$ επί της επιφάνειας της άμμου.

(όπου E_v είναι το μέτρο παραμόρφωσης στην επιφάνεια του κάθε στρώματος)

Θα πρέπει επίσης να προσεχθεί πολύ και να ληφθούν ιδιαίτερα μέτρα για τις ενώσεις (σημεία συνάντησης) της σταθερής επιδομής (Σ.Ε.) με Σκυρογραμμή ή τεχνικό έργο (Γέφυρα, τούνελ κλπ), λόγω της διαφορετικής ελαστικότητας που έχει η Σ.Ε. έναντι των παραπάνω αναφερόμενων και ενδεχομένως των διαφορετικών υποχωρήσεων.

Είναι αυτονόητο ότι προ των εργασιών αυτών θα πρέπει η Σκυρογραμμή να είναι πλήρως τακτοποιημένη (υψομετρικά, οριζοντιογραφικά), να έχει γίνει η υπογόμευση, ο ενδεχόμενος καθαρισμός του έρματος, η σύσφιξη των συνδέσμων κλπ.

Ως προς την υποδομή της Σ.Ε. (λόγο της αδυναμίας επεμβάσεως εκ των υστέρων) θα πρέπει να είναι πολύ καλής ποιότητας τόσο ως προς τα

χρησιμοποιούμενα υλικά όσο και ως προς την εργασία κατασκευής της (στρώση, συμπίκνωση κλπ). Δεν επιτρέπεται μετά τη στρώση της Σ.Ε. να παρουσιαστούν προβλήματα στην υποδομή (καθιζήσεις, ρωγμές μεγάλου βάθους και πλάτους κλπ). Η άνω επιφάνεια της σταθερής επιδομής (Σ.Ε.) πρέπει να κατασκευάζεται κατά τρόπον που να εξασφαλίζει την άνευ εμποδίων κανονική ροή των όμβριων και λοιπών υδάτων και να αποφεύγονται διαβρώσεις πρανών.

Δεν επιτρέπεται κατασκευή σταθερής επιδομής (Σ.Ε.) γραμμής σε υποδομή κακή ή αμφιβόλου ποιότητας.

Η κατασκευή της Σ.Ε., όπως αναφέρθηκε, είναι ένα άκαμπτο πολυστρωματικό σύστημα με ανεξάρτητες φέρουσες στρώσεις των οποίων το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται από την επάνω στρώση προς την κάτω ήτοι $E_1 > E_2 > E_3 > E_4$. (εικ. 16)

Η κατασκευαστική δομή της Σ.Ε. σε επίχωμα έχει την παρακάτω αναφερόμενη διάταξη στρώσεων και υλικών αρχίζοντας από επάνω προς τα κάτω.

- Σιδηροτροχιές
- Σύνδεσμοι σιδ/χιας - στρωτήρα
- Στρωτήρες ή απλές εδράσεις διαμορφωμένες στη ΦΣΣ
- Φέρουσα Στρώση Σκυροδέματος (ΦΣΣ) ή Ασφάλτου (ΦΣΑ)
- Κατεργασμένο Θραυστό Αμμοχάλικο με τσιμέντο (ΚΘΑ)
- Προστατευτική (αντιπαγετική) στρώση επιχώματος (ΠΣΕ)
- Υπέδαφος

Οι φέρουσες στρώσεις αποτελούν την ολοκλήρωση της Σ.Ε. και διακρίνονται σε :

- Στρώσεις σταθεροποιημένες και
- Στρώσεις μη σταθεροποιημένες

Η κατασκευαστική σειρά των στρώσεων ακολουθεί την αρχή μειωμένης ακαμψίας από την επάνω στρώση προς την κάτω, δηλαδή:

Στρώσεις σταθεροποιημένες

► Η επάνω φέρουσα στρώση σκυροδέματος (ΦΣΣ), η οποία κατασκευάζεται επιτόπου οπλίζεται για έλεγχο της ρηγμάτωσης σε όλο το μήκος της, στο μέσον της διατομής με διαμήκη και εγκάρσιο οπλισμό 0,8 έως 0,9 του εμβαδού της διατομής, δεν φέρει αρμούς διαστολής και η διατομή της προέρχεται από διαστασιολόγηση ή σκαφοειδούς διατομής. Στην άνευ στρωτήρων κατασκευή

Σ.Ε. θα πρέπει να αποφεύγονται ρηγματώσεις της ΦΣΣ στην περιοχή έδρασης των σιδ/χιων, οφειλόμενες στην διάτρηση των οπών για *υρα* ή μπουλόνια που θα χρησιμοποιηθούν για τους συνδέσμους της γραμμής. Οπότε πριν σκληρύνει το σκυρόδεμα, γίνονται τομές στην άνω επιφάνεια του σκυροδέματος βάθους 5cm και πλάτους 2 –3 cm σε κάθε 3^η έδραση (απόσταση 1,95 m).

► Η ΦΣΑ χρησιμοποιείται κυρίως σε επικαθήμενα συστήματα Σ.Ε. και αποτελείται από μίγμα ορυκτών υλικών κοκκομετρικά διαβαθμιζμένων και ασφάλτου. Το πάχος της ΦΣΑ το οποίο προκύπτει από τη διαστασιολόγηση, στρώνεται σε πολλές επιμέρους στρώσεις πάχους κατ'ελάχιστον 2,5 φορές μεγαλύτερο από τη διάμετρο του μεγαλύτερου κόκκου του μίγματος.

Γενικά οι απαιτήσεις, για την χρησιμοποίηση ασφάλτου σε σιδ/κες κατασκευές, είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της οδοποιίας. Οι επιτρεπόμενες ανοχές στην άνω επιφάνεια της ΦΣΑ είναι $\pm 2\text{mm}$. Αυτό επιτυγχάνεται, κατά κανόνα, μόνον με την κατασκευή σε πολλές επιμέρους στρώσεις. Η επάνω στρώση απαιτεί μεγαλύτερη συμπίκνωση από την αντίστοιχη των κάτω στρώσεων. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η παρεμπόδιση διείσδυσης οξυγόνου (που συντελεί στην γήρανση της ασφάλτου) και νερού.

► Η στρώση ΚΘΑ είναι μια σταθεροποιημένη στρώση που χρησιμοποιείται σε όλα τα συστήματα Σ.Ε. Η στρώση αυτή εξασφαλίζει ολόκληρο το πολυστρωματικό σύστημα από αύξηση της δυναμικής καταπόνησης.

Το πάχος της προσδιορίζεται από την διαστασιολόγηση ολόκληρου του φέροντος συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη ως μέτρο παραμόρφωσης της άνω επιφάνειας της μη σταθεροποιημένης προστατευτικής στρώσης $E_v \geq 120\text{N/mm}^2$.

Στρώσεις μη σταθεροποιημένες

► Αντιπαγετική Προστατευτική Στρώση, η οποία αποτελείτε από κατάλληλο για τις καιρικές συνθήκες αμμοχάλικο προστατεύοντας το ευαίσθητο στην παγωνιά υπέδαφος. Επίσης παρεμποδίζει την άνοδο των υδάτων στις υπερκείμενες σταθεροποιημένες στρώσεις της Σ.Ε. Για την ανεμπόδιση και γρήγορη διοχέτευση των επιφανειακών υδάτων στο υπέδαφος, η προστατευτική στρώση θα πρέπει να έχει συντελεστή διαπερατότητας $k \geq 1 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ και στην επάνω στρώση των 20 cm $k \geq 1 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$.

► Υπέδαφος, όπου εκεί πραγματοποιούνται πολλοί έλεγχοι προκειμένου για την έδραση Σ.Ε. Τα αποτελέσματα αυτών των ελέγχων θα καθορίσουν αν είναι αναγκαία η λήψη πρόσθετων μέτρων βελτίωσης του υπεδάφους. Για τους ελέγχους είναι δυνατή η χρησιμοποίηση γεωφυσικών μεθόδων, όπως π.χ. το *Georadar*.

Κατά την διαστασιολόγηση των στρώσεων της Σ.Ε. λαμβάνεται γωνία κατανομής των φορτίων $\varphi=45^\circ$ και ως ελάχιστο μήκος στρωτήρα $b_1 = 2,20 \text{ m}$. Για τις γραμμές υψηλών ταχυτήτων και μεγάλης κυκλοφορίας το πλάτος της στρώσης ΚΘΑ λαμβάνεται 3,80 m. Με πάχος ΚΘΑ 30 cm και γωνία κατανομής φορτίων $\varphi=45^\circ$ προκύπτει πλάτος της ΦΣΣ ή ασφάλτου, που βρίσκεται επάνω από την στρώση ΚΘΑ, 3,20 m.

Συμπεριφορά γέφυρας λόγω θερμοκρασιακών μεταβολών

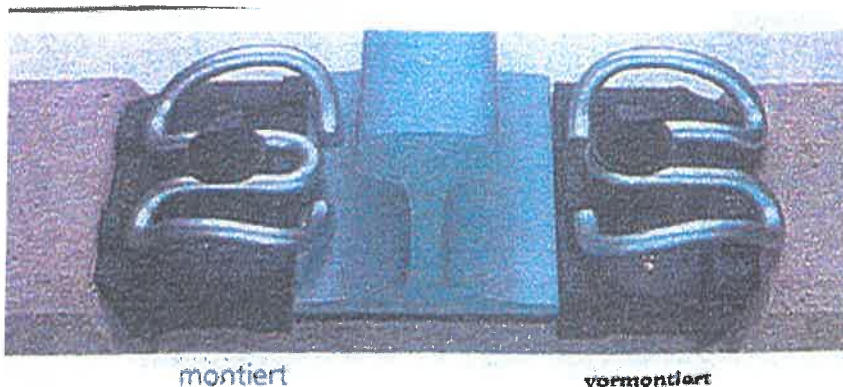
- Η μετακίνηση της γέφυρας να εξισώνεται με την χρησιμοποίηση συνδέσμων μειωμένης δύναμης συσφίξεως της σιδ/χιας. Αυτό για τις περιπτώσεις που ο στρωτήρας είναι σταθερά συνδεδεμένος με το σώμα της γέφυρας δια μέσου της φέρουσας στρώσης εκ σκυροδέματος (BTS) περίπτωση RHEDA, ή για κατασκευή ελεύθερων στρωτήρων με σιδ/χίες που είναι απ' ευθείας συνδεδεμένες με την φέρουσα στρώση (BTS).
- Η γέφυρα να κινείται ελεύθερα (ανεξάρτητα) κάτω από την φέρουσα στρώση (BTS) η οποία τοποθετείται επί της γέφυρας, κατά τρόπο που να επιτρέπει την κατά μήκος μετακίνηση (τύποι *Zublin* και *Rheda*). Αυτή η κατασκευή επιτρέπεται μόνο για απόσταση στηριγμάτων (βάθρων) της γέφυρας μέχρι 25,00 m

- Η γραμμή να τοποθετείται ελεύθερα κινούμενη επί μιας φέρουσας στρώσης από σκυρόδεμα (BTS) ή ασφαλτό (ATS). Αυτή η κατασκευή, λόγω του κινδύνου παραγωνιάσματος των στρώσεων εξ αιτίας της κίνησης της, επιτρέπεται μόνο μέχρι 10,0 m απόσταση στηριγμάτων για γέφυρα και 20,00 m πλαισιωτή κατασκευή.
- Οι σιδηροτροχιές επί συνεχόμενου εφεδράνου να είναι σταθερά συνδεδεμένες με το σώμα της γέφυρας. Αυτή η κατασκευή απαιτεί χρήση Συσκευών Διαστολής (Σ.Δ.) για ανοίγματα γεφυρών μεγαλύτερα των 15 m. Για το βέλος κάμψης της γέφυρας κατά την καταπόνηση και στροφή αυτής από τα φορτία δίδονται οριακές τιμές (*Grenzwerte*) για κατασκευές Σ.Ε. επί γεφυρών.

Με τον όρο Συσκευή Διαστολής (Σ.Δ.) εννοούμε εκείνη την ειδική κατασκευή αρμών που επιτρέπει την μετακίνηση των άκρων των ΣΣΣ (Συνεχούς Συγκολλημένες Σιδ/χίες) χωρίς να διακόπτεται η συνεχεία κυλίσεως της γραμμής. Οι Σ.Δ. τοποθετούνται στα άκρα μιας γραμμής με ΣΣΣ και δεν επιτρέπεται η στρώση τους σε καμπύλες με $R < 800$ m καθώς και σε παραβολικές συναρμογές.

Όσον αφορά το είδος των σιδηροτροχιών που έχουν αναφερθεί, **θα πρέπει οι χρησιμοποιούμενες σε Σ.Ε. σιδ/χίες να είναι UIC 60** σύμφωνα με UIC Kodex και την TL 918254 των DB.

Για την σύνδεση σιδ/χιας- στρωτήρα χρησιμοποιούνται ελατηριωτά αγκύρια SKL (*Spannklemme*) διαφόρων τύπων ανάλογα με το χρησιμοποιούμενο σύνδεσμο π.χ. *Ioarv 300-1* των DB (εικ. 17)



εικ. 17 Σύνδεσμος *Ioarv 300-1* των DB με ελατηριωτά αγκύρια SKL 15 πηγή [7]

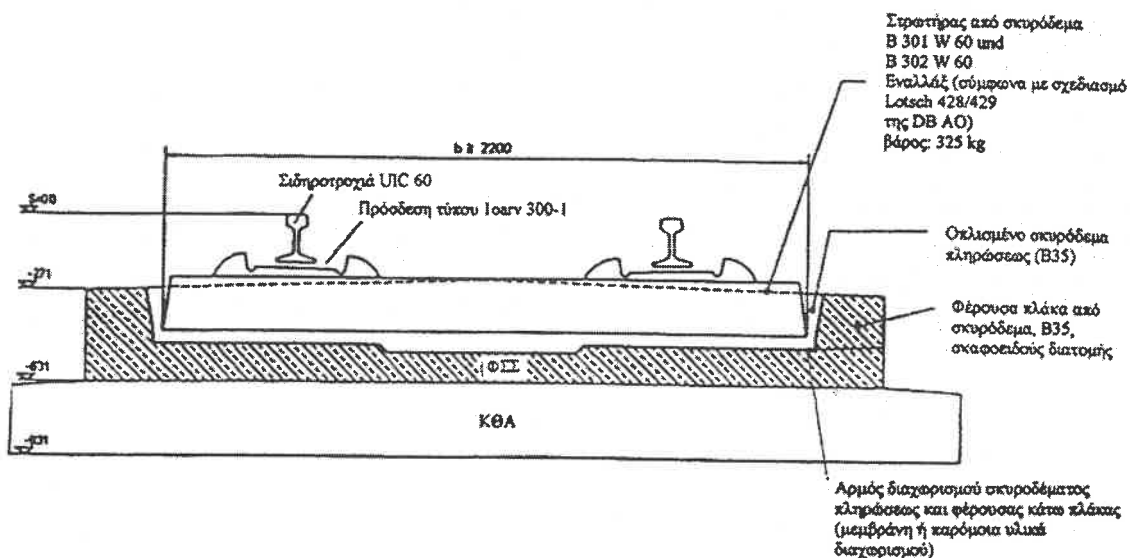
Συνεχώς Συγκολλημένες Σιδηροτροχιές

Καταρχάς, με τον όρο Συνεχούς Συγκολλημένες Σιδ/χίες (ΣΣΣ) εννοούμε κάθε γραμμή της οποίας ένα κεντρικό τμήμα ≥ 300 m, μπορεί να παραμένει αμετακίνητο σε κάθε μεταβολή της θερμοκρασίας εντός συγκεκριμένου θερμοκρασιακού εύρους, εκτός από τα τελευταία ≤ 150 m ΣΣΣ, προ των 2 Σ.Δ. , τα οποία καλούνται ζώνες εκτονώσεως ή αναπνοής και «θεωρητικά» κινούνται. Στην περίπτωση των ΣΣΣ κάθε σημείο στήριξης της (ΣΣΣ) απαιτείται ο σύνδεσμος να εξασκεί επ'αυτού ελαστική δύναμη συγκράτησης της σιδηροτροχιάς 20 KN (2 x 10). Με τη δύναμη αυτή σύσφιξης της σιδ/χίας επί του στρωτήρα επιτυγχάνεται αντίσταση ολισθήσεως της σιδ/χίας > 7 KN σε αφόρτιστη γραμμή. Η αντίσταση ολισθήσεως σιδ/χίας στρωμένης επάνω σε γέφυρα δε θα πρέπει να υπερβαίνει τα 8KN/στήριξη, ώστε να είναι ελεύθερη η διαστολή, λόγω θερμοκρασιακής μεταβολής, του φέροντος στοιχείου της γέφυρας κάτω από τις (ΣΣΣ).

Η Συνεχώς Συγκόλληση Σιδηροτροχιών (ΣΣΣ) σε Σ.Ε. γίνεται όταν η γραμμή είναι στην κανονική της θέση (ερυθρά), το σκυρόδεμα έχει αποκτήσει την πλήρη αντοχή του και γενικά το πλαίσιο της γραμμής είναι σε θέση να παραλαμβάνει τα κυκλοφοριακά φορτία. Εάν για την απελευθέρωση των τάσεων σε (ΣΣΣ) επί Σ.Ε. χρησιμοποιηθεί συσκευή θέρμανσης θα πρέπει να απομακρυνθούν από την σιδ/χια και τη γραμμή όλα τα ευαίσθητα στη θερμοκρασία υλικά όπως καλώδια, ηχομονωτικά υλικά κλπ. Η συγκόλληση των σιδ/χιων θα πρέπει να γίνεται με το μηχάνημα ηλεκτροσυγκόλλησης αποφεύγοντας τη χρήση ειδικών ηλεκτροδίων. Επίσης όταν κατά την σταθεροποίηση της σκυρογραμμής με το μηχάνημα σταθεροποίησης συναντούμε Σ.Ε. πρέπει 30m προ αυτής να αρχίζει κατασκευή ράμπας διακοπής της σταθεροποίησης και η διακοπή θα πραγματοποιείται 5 m προ της Σ.Ε. Για έναρξη εργασιών σταθεροποίησης σκυρογραμμής μετά από Σ.Ε. ενεργούμε αντίστροφα. [7]

2.6 Σταθερή Επιδομή τύπου *RHEDA*

Όπως προαναφέραμε ο Σ.Ε. τύπου *RHEDA* είναι ο επικρατέστερος τόσο στην Γερμανία όσο και σε πολλές ακόμα Ευρωπαϊκές χώρες. Χρησιμοποιείται σαν πρότυπο για κατασκευές σιδ/μων για υψηλές ταχύτητες. Στον τύπο *RHEDA* της σταθερής επιδομής (Σ.Ε.) η συνεχής φέρουσα πλάκα από οπλισμένο σκυρόδεμα κατασκευάζεται με πάχος 18 cm και μορφή διατομής **U** (σκαφοειδή) ώστε να μην επιτρέπει την πλάγια μετατόπιση της γραμμής (σχ.5)



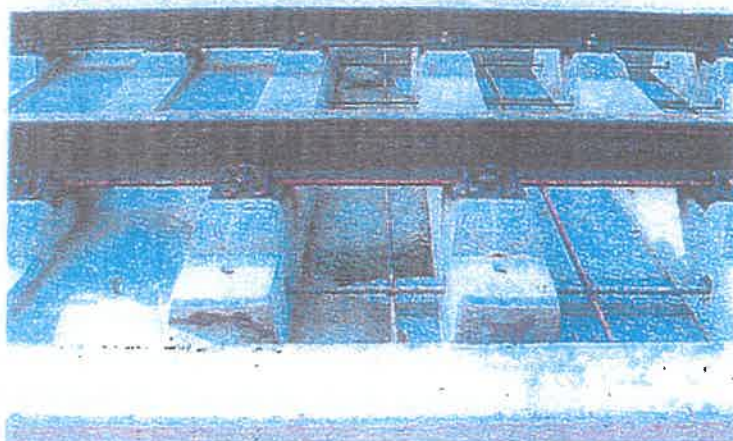
σχ. 5 Σταθερή Επιδομή τύπου Rheda

πηγή [7]

Η φέρουσα πλάκα είναι οπλισμένη με κατά μήκος οπλισμό $\Phi 20/20$ cm και εγκάρσιο $\Phi 16/40$ cm. Εντός της σκαφοειδούς πλάκας τοποθετούνται οι εσχάρες της γραμμής και περνάνε μέσα από τις 4^{ες} οπές ($\Phi 50$) των στρωτήρων οι κατά μήκος οπλισμοί (4 $\Phi 16$ ή 4 $\Phi 20$) προς εξασφάλιση της σύνδεσης αυτών με το σκυρόδεμα πληρώσεως (βλέπε εικ.12 πριν και 18). Η ακριβής υψομετρική και οριζοντιογραφική θέση της γραμμής γενικά επιτυγχάνεται με οριζόντια και κατακόρυφη ρύθμιση, ρεγουλάρισμα, με ειδικούς συσφιγκόμενους ρεγουλατόρους τοποθετημένους σε κάθε δεύτερο στρωτήρα. Με το σύστημα αυτό μειώνονται οι απαιτήσεις ως προς την ακριβή υψομετρική θέση της φέρουσας στρώσης και του στρωτήρα που ισχύουν για άλλους τύπους Σ.Ε.

Κατά την εφαρμογή χρησιμοποιήθηκαν για διευκόλυνση της κατασκευής διάφορες παραλλαγές όπως οι στρωτήρες εν μέρει να εδράζονται αρχικά σε ενσωματωμένα κατά μήκος της σκάφης δοκαράκια τα οποία κατασκευάζονται με προσέγγιση υψομετρική. Σε άλλη περίπτωση τα δοκαράκια αυτά τοποθετούνται στην επιφάνεια της πλάκας πάνω σε *Geotextil* και στην ακριβή υψομετρική θέση της γραμμής ώστε να αποφεύγεται η χρησιμοποίηση των ειδικών ρεγουλατόρων. Ιδιαίτερης σημασίας είναι μια επιλεγμένη κατασκευή απορροής υδάτων: Στη σκάφη κατασκευάζονται στα πλάγια τοιχώματα τρύπες οι οποίες καλύπτονται με *Geotextil* έτσι ώστε το νερό που ενδεχόμενα συγκεντρώνεται, δια μέσου του αρμού πίεσεως των παρειών σκάφης / σκυροδέματος πληρώσεως, να απορρέει χωρίς την δημιουργία προβλημάτων.

Σε σύγκριση με την παραδοσιακή Σκυρογραμμή η Σ.Ε. είναι θορυβώδες γι' αυτό θα πρέπει σε συγκεκριμένες περιοχές να καλύπτεται με ειδικό υλικό ικανό να μειώνει τη στάθμη κατά 3 dB περίπου.



εικ.18 (Εσχάρα γραμμής Σ.Ε. τύπου Rheda) πηγή [7]

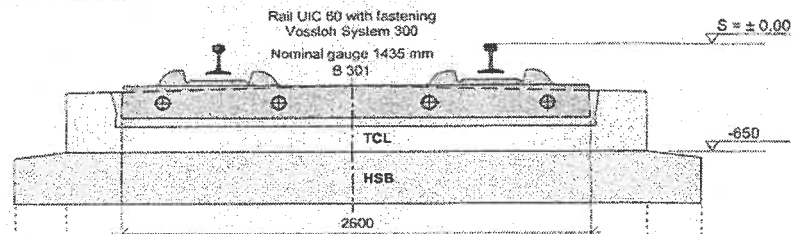
Από την μείωση του ύψους του τούνελ ή του τεχνικού έργου λόγω χρησιμοποίησής της Σ.Ε. *RHEDA* (έχουμε μειωμένο ύψος επιδομής έναντι σκυρογραμμής κατά 25 – 30 cm) το κόστος της Σ.Ε. εξισώνεται με το κόστος της σκυρογραμμής.

Η πολλών στρώσεων κατασκευή της Σ.Ε. επιτυγχάνει μια πολύ καλή κατανομή φορτίων με ταυτόχρονα πολύ μικρή καταπόνηση της υποδομής προϋπόθεση για μακρόχρονη διατήρηση της καλής κατάστασης της γραμμής (εικ. 19 νέοι τύποι Σταθερής Επιδομής τύπου Rheda).

Σε σύγκριση με τη Σκυρογραμμή η Σταθερή Επιδομή λόγω της άνευ ανωμαλιών έδρασης των σιδ/χιων εμφανίζει μικρότερη δυναμική καταπόνηση εκ του τροχού. Η δυναμική καταπόνηση από τον τροχό εξαρτάται κατά κύριο λόγο, από την επιπεδότητα της επιφάνειας κύλισης της σιδ/χίας.

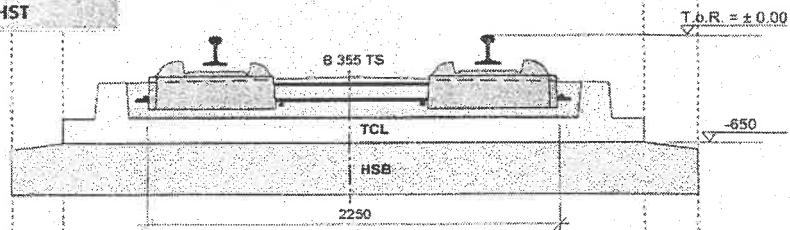
Με λείανση της νεοστρωθείσας σιδ/χίας η ανωμαλία αυτή, που είναι αρκετά υπολογίσιμο μέγεθος για τις γραμμές υψηλών ταχυτήτων, μπορεί να διατηρηθεί σε χαμηλές τιμές.

Rheda (Classic)

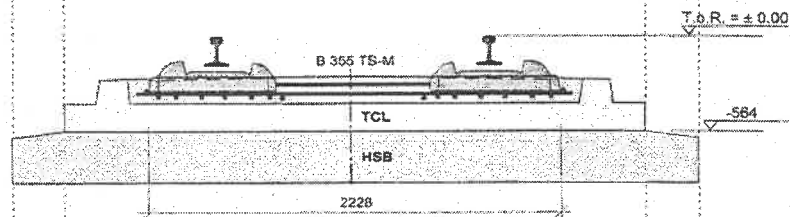


Rheda-Berlin HST

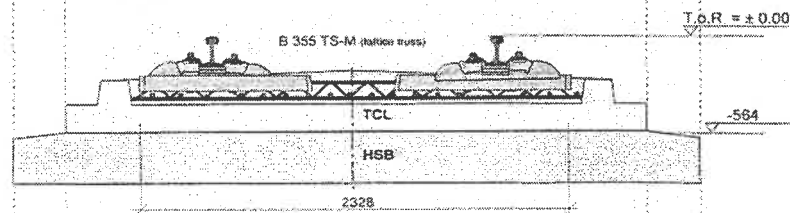
V1



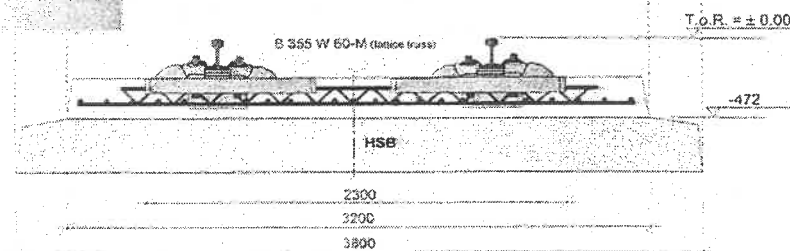
V2



V3



Rheda 2000



εικ 19 τύπος Σταθερής Επιδομής RHEDA 2000 και κλασσικός τύπος RHEDA
πηγή [42]

Θόρυβος

Ως προς την προσφερόμενη ποιότητα (κομφόρ) θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι περιοδικές ιδιοσυχνότητες του αμαξώματος λόγω αιώρησης ελατηρίων. Η τιμή των ιδιοσυχνοτήτων αυτών, κατά κανόνα κυμαίνεται μεταξύ 1 Hz και 2 Hz. Για ταχύτητα 250 km/h αυτό αντιστοιχεί σε μήκος κύματος 35 έως 70 m που είναι δύσκολο να διαπιστωθεί από το μετρητικό όχημα.

Οι μετρήσεις που έγιναν στη Σ.Ε. στο Σταθμό *RHEDA* και στην συνορεύουσα Σκυρογραμμή απέδειξαν ότι η Σ.Ε. στην περιοχή συχνοτήτων 10 Hz έως 40 Hz προκαλεί θόρυβο μικρότερο της σκυρογραμμής, ενώ στην περιοχή συχνοτήτων 40 Hz έως 70 Hz η Σκυρογραμμή εμφανίζει μειωμένη στάθμη θορύβων. Η καλύτερη συμπεριφορά της Σ.Ε. στις χαμηλές συχνότητες οφείλεται στην κατανομή του φορτίου από την φέρουσα πλάκα όπου οι αιτιάσεις λόγω της κάμψης της σιδ/χίας μειώνονται αισθητά. Η κάπως υψηλότερη στάθμη θορύβων μεταξύ 40 Hz και 70 Hz και το κάπως υψηλότερο άθροισμα στάθμης (10 Hz έως 250 Hz) μπορούν να μειωθούν με μια μαλακότερη έδραση της σιδ/χίας. Σε περαιτέρω χρησιμοποίηση της (Σ.Ε.) *RHEDA* συνιστάται η ελαστικότητα της χρησιμοποιούμενης ελαστικής πλάκας στην περιοχή των συνδέσμων από 30 KN/mm να μειωθεί στα 20 KN/mm. Με τον τρόπο αυτό θα ελαττωθούν και οι περιοδικές αιτιάσεις λόγω της στιγμιαίας κάμψης.

Από τα αποτελέσματα μέτρησης των συχνοτήτων σε απόσταση 2.5 m πλησίον της γραμμής διαπιστώθηκε ότι η καμπύλη της στάθμης θορύβων ενός μικτού συρμού D και IC ($V=150$ km/h) με μηχανή έλξης σειράς 103 στη συχνότητα των 60 Hz και για τους δυο τύπους γραμμής (Σκυρογραμμή και Σ.Ε.) παρουσίασε άλμα (Σκυρογραμμή dB 82, Σ.Ε. dB 88) το οποίο μειώθηκε γρήγορα με την αυξανόμενη συχνότητα. Το άλμα της στάθμης θορύβων στη συχνότητα των 60 Hz οφείλεται στη διέγερση από την στιγμιαία κάμψη της σιδ/χίας. Το άθροισμα της στάθμης (10 Hz έως 250 Hz) κυμαίνεται μεταξύ 83 dB και 91 dB.

Σε μια μέτρηση με τον ίδιο συρμό ελέγχων και την ίδια μηχανή έλξης αλλά με $V=250$ km/h διαπιστώθηκαν στη γραμμή Σταθερής Επιδομής (Σ.Ε.) άλματα στην καμπύλη συχνοτήτων στις συχνότητες μεταξύ 30 και 40 Hz, 70 και 80 Hz καθώς και μεταξύ 100 και 110 Hz. Η διέγερση στην συχνότητα των 100 έως 110 Hz οφείλεται στην απόσταση των στρωτήρων και στην εξ αυτής δημιουργούμενη στιγμιαία κάμψη της σιδ/χίας. Η διέγερση των 30 Hz και 80 Hz δημιουργείται από περιοδικά μεγέθη ανωμαλιών με μήκος κύματος 0,80 m έως 2,5 m τα οποία οφείλονται σε σφάλματα γραμμής και κυματοειδείς φθορές σιδ/χιων και τροχών. Η επιρροή των αξονικών σχηματισμών (αξονική απόσταση μεταξύ 2,25 m και 19,00 m) επενεργεί σε περιοχή συχνοτήτων μικρότερη των 30 Hz.

Δεν είναι δυνατόν να διαπιστωθούν διεγέρσεις σε συχνότητες μικρότερες των 10 Hz οι οποίες προκαλούνται από τις αποστάσεις των φορέων και των μεγάλου μήκους κύματος σφαλμάτων γραμμής λόγω της παραμετρικής μέτρησης των θορύβων. [7]

2.7 Γενική περιγραφή Σ.Ε. με προκατασκευασμένες πλάκες προεντεταμένου σκυροδέματος (σύστημα Σ.Ε. BÖGL)

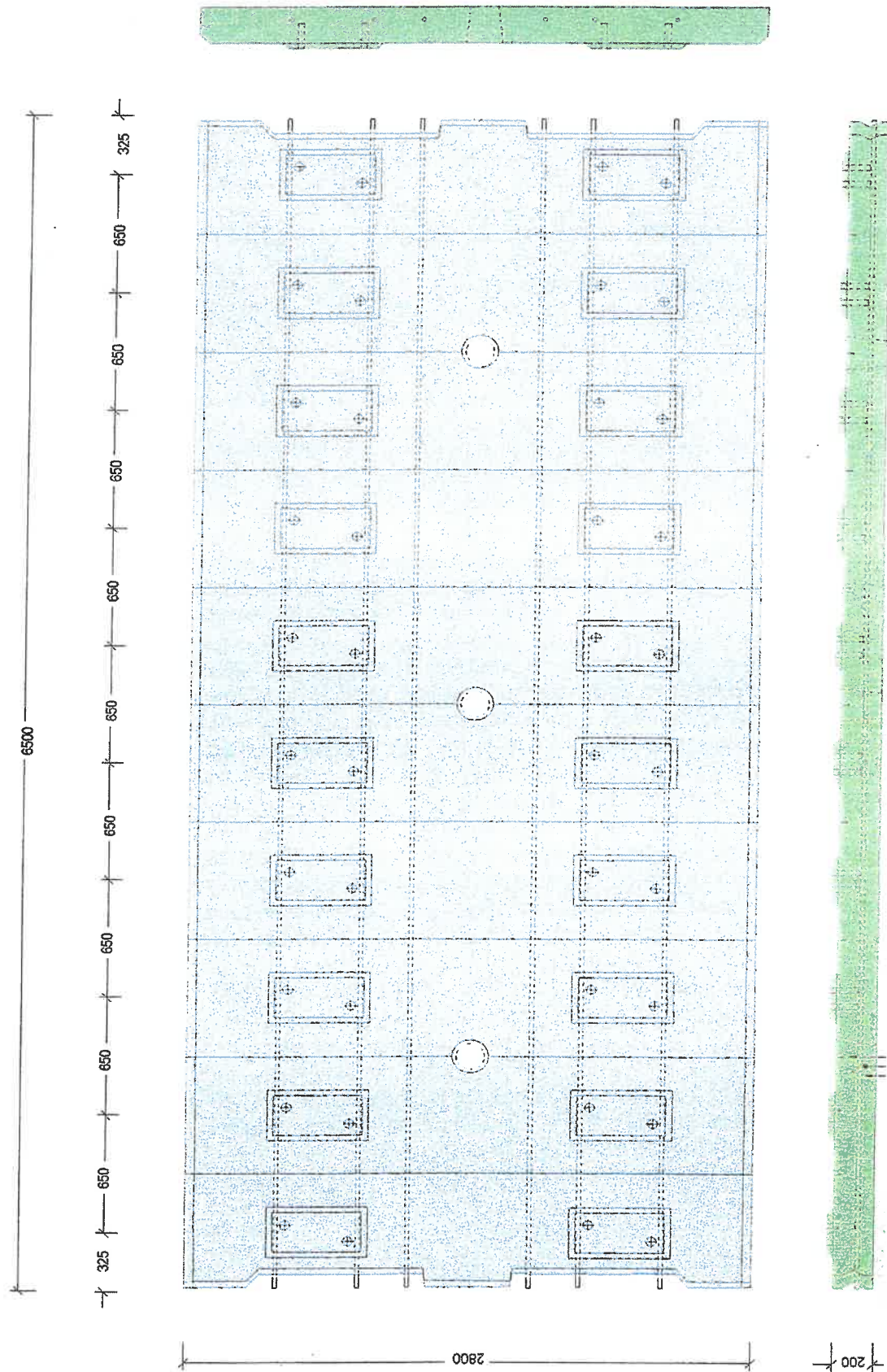
Αξιοσημείωτη είναι η αναφορά για το γεγονός, ότι το σύστημα Σ.Ε. με προκατασκευασμένες πλάκες προεντεταμένου σκυροδέματος, ήταν γνωστό και με καλά αποτελέσματα από παλαιότερες δοκιμαστικές στρώσεις. Παρόλα αυτά η επαναχρησιμοποίησή του από τους Γερμανικούς Σιδ/μους άρχισε μόλις το 1999, όπως έχει προαναφερθεί, με τη στρώση γραμμών στο Σιδ/κο σταθμό του *Roth* –

Mals (Ιούνιος 1999) και μετέπειτα σε διάφορες άλλες θέσεις του Σιδ/κου δικτύου των *DB*.

Πρόκειται για το σύστημα **Σ.Ε. BÖGL**.

Στο σύστημα αυτό της Σ.Ε. οι εδράσεις των σιδ/χιών διαμορφώνονται κατά την σκυροδέτηση της προκατασκευασμένης πλάκας από το ίδιο σκυρόδεμα σε κανονική μεταξύ τους απόσταση 65 cm, όπως ακριβώς εφαρμόζεται για όλα τα συστήματα Σ.Ε. Οι προκατασκευασμένες, από σκυρόδεμα B55, πλάκες του τύπου αυτού έχουν μήκος 6,45 m, πλάτος 2,55 ή 2,80 m (ανάλογα με την κατηγορία της γραμμής) και πάχος $d=20$ cm (βλέπε εικ.20) σε ειδικές περιπτώσεις όπως καμπύλες κλπ. Κατασκευάζονται και σε μικρότερο μήκος ώστε να προσαρμόζονται ευκολότερα στην μεταβαλλόμενη υπερύψωση των παραβολικών τόξων συναρμογής (παραβολικά τόξα, ράμπες υπερύψωσης κλπ λαμβάνονται υπ' όψη στην κατασκευή της πλάκας).

Οι πλάκες αυτές είναι εγκάρσια προεντεταμένες (χάλυβας προέντασης St. 1420/1570) όπως και οι ολόσωμοι στρωτήρες από σκυρόδεμα, διαμορφώνουν 10 εδράσεις σιδ/χιών και το χαρακτηριστικό τους είναι η ύπαρξη εγκάρσιων ψευδαρμών ανά 65 cm (μεταξύ των θέσεων των συνδέσμων) με βάθος 4mm. Η ύπαρξη των ψευδαρμών παρεμποδίζει την δημιουργία ρηγματώσεων στις θέσεις των συνδέσμων. Στρώνονται επάνω σε ΚΘΑ (Κατεργασμένο Θραυστό Αμμοχάλικο με τσιμέντο) ελαχίστου πάχους 30 cm και στην συνέχεια ρυθμίζονται οριζοντιογραφικά και υψομετρικά.



εικ.20 Σταθερή Επιδομή με προκατασκευασμένες πλάκες (σύστημα Bøgl)

πηγή [8]

Η υψομετρική τακτοποίηση γίνεται με την βοήθεια μηχανικής ρύθμισης, δηλαδή συσφιγγόμενους κοχλίες (*Spindeln*) που περνάνε μέσα από οπές οι οποίες βρίσκονται στα εκτός την γραμμής τμήματα της πλάκας και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για μελλοντικές ρυθμίσεις της γραμμής. Οι ρυθμιστικοί κοχλίες –*Spindeln* βρίσκονται επάνω σε μεταλλικές πλάκες που είναι τοποθετημένες στην άνω επιφάνεια του ΚΘΑ, κάτω από τις τρύπες, ώστε να παρεμποδίζεται, κατά τη σύσφιγξη του κοχλία η εισχώρηση αυτού εντός της στρώσης του ΚΘΑ.

Για την οριζοντιογραφική τακτοποίηση η οποία προηγείται της υψομετρικής χρησιμοποιείται επιπδικό ερπυστριοφόρο υδραυλικό μηχάνημα το οποίο κινείται εκτός των στρώσεων της Σ.Ε. Οι ρυθμίσεις αυτές ελέγχονται συνεπώς (μπρος-πίσω) με κινούμενη επί της γραμμής συσκευή *Laser* η οποία είναι τοποθετημένη επάνω σε βαγονέτο (τροκ).

Οι προκατασκευασμένες πλάκες έχουν στο μέσον (άξονα γραμμής περίπου) τρεις διαμπερείς οπές διαμέτρου $\Phi 12-15$ cm μέσα από τις οποίες γίνεται η έγχυση του υλικού πλήρωσεως (ασφαλτοτσιμέντο) των κενών μεταξύ ΚΘΑ και πλακών (30 mm περίπου) καθώς και η παρακολούθηση της εργασίας αυτής. Αφού τακτοποιηθούν οι προκατασκευασμένες πλάκες, οι οποίες φέρουν ήδη και τις σιδ/χίες, στην κανονική τους θέση, εγκιβωτίζονται σε μήκος 1,5 πλάκας (9,5 m περίπου) εξωτερικά με καδρόνια που τοποθετούνται επί της στρώσης ΚΘΑ εσωτερικά (αρχή και πέρας των 9,5 m) με ειδικούς αεροθαλάμους (σαμπρέλες) οι οποίοι αφού περάσουν κάτω από τις προκατασκευασμένες πλάκες (μεταξύ ΚΘΑ και πλάκας) φουσκώνουν και έτσι παρεμποδίζουν το υλικό πλήρωσης των κενών (ασφαλτοτσιμέντο) να διαρρεύσει έξω από την προς τακτοποίηση επιφάνεια.

Το υλικό πλήρωσης (ασφαλτοτσιμέντο) είναι αρχικά ρευστό και παραμένει έτσι περίπου δύο ώρες. Η πλήρωση των κενών μεταξύ προκατασκευασμένης πλάκας και ΚΘΑ ελέγχεται, από τις ίδιες οπές που γίνεται η έγχυση. Πριν αρχίσει η σκλήρυνση του υλικού πλήρωσης των κενών αφαιρούνται οι αεροθάλαμοι της αρχής και του πέρατος του επεξεργασμένου τμήματος ώστε το υλικό πλήρωσεως να καλύψει και το κάτω από τους αεροθαλάμους τμήμα.

Το υλικό πλήρωσεως χρησιμοποιείται από τους Ιαπωνικούς Σιδ/μους 26 και πλέων χρόνια με μεγάλη επιτυχία για πλήρωση των κενών (15-30 mm) κάτω από φέρουσα στρώση σκυροδέματος Σ.Ε. και περιέχει *Bitumen*, τσιμέντο και διάφορα άλλα στοιχεία άγνωστα λόγω πατέντας. Έχει πολύ μεγάλη αντοχή σε θραύση ($5 \text{ N/mm}^2 \pm 2\%$) και σε επιμήκυνση ενώ η καταπόνηση που υφίσταται κάτω από την προκατασκευασμένη πλάκα κυμαίνεται από 0,1 – 0,3 N/mm^2 (*Dr Pahnke, DB*), είναι σκληρό, ελαστικό, δεν είναι διαπερατό από το νερό και άρα αντιπαγετικό, έχει πυκνότητα σαν γάλα γι' αυτό είναι εύκολη η χρησιμοποίησή του.

Η επεξεργασία του πρέπει να γίνεται γρήγορα (1-2 ώρες) διότι αρχίζει η σκλήρυνση και σε 8 ώρες περίπου μπορεί η γραμμή να δοθεί σε κυκλοφορία. Το υλικό αυτό με τις ιδιότητες που έχει μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές εργασίες όπως γέφυρες κλπ. Το χρώμα του υλικού είναι μαύρο και έχει τη χαρακτηριστική μυρωδιά της πίσσας. Η τιμή του (1/99 DB) είναι 5 DM/Lit περίπου. Κατά τις εργαστηριακές έρευνες του υλικού που πραγματοποιήθηκαν από τους DB σε συνεργασία με Γερμανική χημική εταιρεία, έγινε προσπάθεια μείωσης του ποσοστού συμμετοχής στο τελικό προϊόν των ακριβών πρώτων

υλών ώστε να μειωθεί η τιμή παραγωγής του. Από την προσπάθεια αυτή μειώθηκε το ποσοστό συμμετοχής της ασφάλτου σε 18%. [8]

2.8 Σύγκριση κατασκευαστικού κόστους Σ.Ε. με Σκυρογραμμή

Έχει διαπιστωθεί ότι σε κάθε συζήτηση περί Σ.Ε. εκείνο που προτείνεται με πολύ μεγάλη ευκολία, κυρίως από τους μη γνωρίζοντες το αντικείμενο, είναι η απόρριψή της, λόγω υψηλού κόστους κατασκευής έναντι της σκυρογραμμής.

Αγνοούν βεβαίως, ότι για την επιλογή ενός έργου, εκτός από το κόστος κατασκευής, λαμβάνονται ακόμα υπόψη και μάλιστα πολύ σοβαρά, το κόστος λειτουργίας του έργου αυτού καθώς και η εξέλιξή του.

Είναι γεγονός ότι το καθαρά κατασκευαστικό κόστος της Σ.Ε., χωρίς να ληφθούν υπόψη άλλοι παράγοντες (όπως π.χ. η απαλλαγή από το μεγάλο κόστος συντήρησης, η μεγάλη διάρκεια ζωής με ταυτόχρονη αύξηση του χρόνου εκμετάλλευσης της γραμμής κλπ), αρχικά ήταν έως 1,8 φορές περίπου υψηλότερο του αντίστοιχου της σκυρογραμμής και αφορούσε στο σύστημα Σ.Ε. Rheda. Στη συνέχεια όλες οι προσπάθειες τόσο ως προς την αναζήτηση και άλλων συστημάτων Σ.Ε., όσο και ως προς την εξέλιξη του τρόπου κατασκευής και του χρησιμοποιούμενου, για την κατασκευή, μηχανικού εξοπλισμού, βοήθησαν στην μείωση του κατασκευαστικού κόστους.

Για την σημερινή κατάσταση κόστους με βάση το *"Sonderdruck aus Beton Kalender 2000"* των διακεκριμένων καθηγητών κ.κ. *Eisenmann* και *Laykauf* διαπιστώνεται ότι «το κόστος κατασκευής Σ.Ε. επάνω σε επίχωμα συγκρινόμενο με το κόστος σκυρογραμμής υψηλών ταχυτήτων είναι ελάχιστα αυξημένο. Εάν όμως ληφθεί υπόψη το αυξημένο κόστος συντήρησης της σκυρογραμμής, κατά τακτά χρονικά διαστήματα και η ανωμαλία που επιφέρει στην κυκλοφορία η εν λόγω συντήρηση, τότε η Σ.Ε. που δεν χρειάζεται συντήρηση, βρίσκεται σε πλεονεκτική θέση.»

Από τα δυο σιδ/κα δίκτυα που θεωρούνται πρωτοπόρα στην Σ.Ε. έχουμε :

► Την ανακοίνωση των DB AG που έγινε από τον εκπρόσωπό τους, *Dipl. Ing. Mörscher* σε ημερίδα στο *Wachenburg Weinheim* της Γερμανίας στις 28/04/1999 «Με σημερινά δεδομένα το κατασκευαστικό κόστος της Σ.Ε. συγκρινόμενο με το κόστος σκυρογραμμής υψηλών ταχυτήτων, ανταποκρινόμενη στους κανονισμούς, είναι κατά 1,4 φορές μεγαλύτερο. Στις δοκιμαστικές στρώσεις που κατασκευάστηκαν σε γραμμή της περιοχής *Waghäusel*, τα συστήματα Σ.Ε. άνευ στρωτήρων είχαν κόστος κατασκευής 1,2 φορές υψηλότερο από το αντίστοιχο της σκυρογραμμής και στη γραμμή υψηλών ταχυτήτων *Hannover – Berlin* το κατασκευαστικό κόστος της Σ.Ε. ήταν 1,5 φορές περίπου υψηλότερο της σκυρογραμμής.»

► Όπως ανακοίνωσαν οι Ιαπωνικοί σιδ/μοι, το καθαρό κόστος κατασκευής της Σ.Ε. με προκατασκευασμένες πλάκες, είναι 1,3 έως 1,5 φορές υψηλότερο από το κόστος κατασκευής της κλασσικής σκυρογραμμής.

Αξιοσημείωτο επίσης είναι ότι :

- Στα 30 χρόνια κυκλοφορίας της γραμμής *Tokaido* χρειάστηκε να αντικατασταθεί το έρμα της γραμμής, στα 3/4 του συνολικού μήκους της σκυρογραμμής, περισσότερο από μια φορά
- Το κόστος συντήρησης της Σ.Ε. (προκατασκευασμένες πλάκες) στο τμήμα *San –Yo –Shinkansen*, για 16 χρόνια, ανήλθε στο 18% του αντίστοιχου της σκυρογραμμής και στο τμήμα *Tohoku –Shinkansen*, για 9 χρόνια, στο 33%. [40]

2.9 Σκυρογραμμή υψηλών ταχυτήτων – Σύγκριση με συμβατικούς σιδ/μους

Ο δεύτερος τύπος επιδομής κατάλληλος για υψηλές ταχύτητες είναι η λεγόμενη Σκυρογραμμή. Μετά την κυκλοφορία των δυο γραμμών των *DB Hannover-Würzburg* και *Mannheim- Stuttgart* το 1991 η επιλεγείσα επιδομή (έρματος) εκείνης της εποχής παρουσίασε μετά από 5 χρόνια τέτοια φθορά (τριβή έρματος) ώστε για τα επόμενα χρόνια θα έπρεπε να υπολογίζονται υψηλές δαπάνες συντήρησης και μειωμένος χρόνος ζωής της γραμμής.

Για την αντιμετώπιση των κατασκευαζόμενων ακόμη νέων γραμμών κρίθηκε αναγκαία και άμεση η μελέτη και δόκιμη μιας επιδομής στηριζόμενης στις τελευταίες επιστημονικές εξελίξεις. Αυτή η επιδομή στρώθηκε το 1996 στην υπό κατασκευή γραμμή υψηλών ταχυτήτων *Hannover- Berlin*.

Για την κατασκευή των δυο προαναφερόμενων Γερμανικών γραμμών και προς αποφυγή τοπικών υποχωρήσεων, έγινε ισχυρή συμπύκνωση της υποδομής (*Frost- Planumsschutzschicht*) καθώς και της κλίνης έρματος αυξάνοντας κατά 3 έως 4 φορές την τιμή του μέτρου ακαμψίας (ελαστικότητας) έναντι των παλαιών και ανακαινισμένων γραμμών (βλ. Πιν.5).

Γραμμές	Υπέδαφος *	Δείκτης αντίδρασης εδάφους C (N/mm ³)
Παλιές και ανακαινισμένες γραμμές	Κακό υπέδαφος	0,05
	Πολύ καλό υπέδαφος	0,15
Νέες γραμμές	Επίχωμα	0,30 - 0,40
	Σήραγγες / Γέφυρες	0,40 – 0,50

Πίνακας 5

πηγή ETR 3/97

*Επάνω στρώση φυσικού ή επεξεργασμένου εδάφους

2.9.1 Ο ρόλος του ελαστικού υποθέματος και του συνδέσμου στην συμπεριφορά της γραμμής

Αρχικά θα πρέπει να ορισθεί η έννοια του **συνδέσμου**, η λειτουργία του, καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού.

Σύνδεσμοι αποκαλούνται όλα εκείνα τα υλικά που έχουν ως λειτουργία τους τη σύνδεση σιδ/χιας με τον στρωτήρα.

Οι βασικές λειτουργίες που πρέπει να πληρούν οι σύνδεσμοι είναι:

- Να συνδέουν σταθερά τη σιδ/χια με τον στρωτήρα
- Να εξασφαλίζουν τη σταθερότητα του εύρους της γραμμής
- Να διευκολύνουν τη μεταφορά των στατικών και δυναμικών φορτίων, τα οποία αναπτύσσονται κατά την κίνηση του τροχού επί της σιδ/χιας, στην υποδομή.

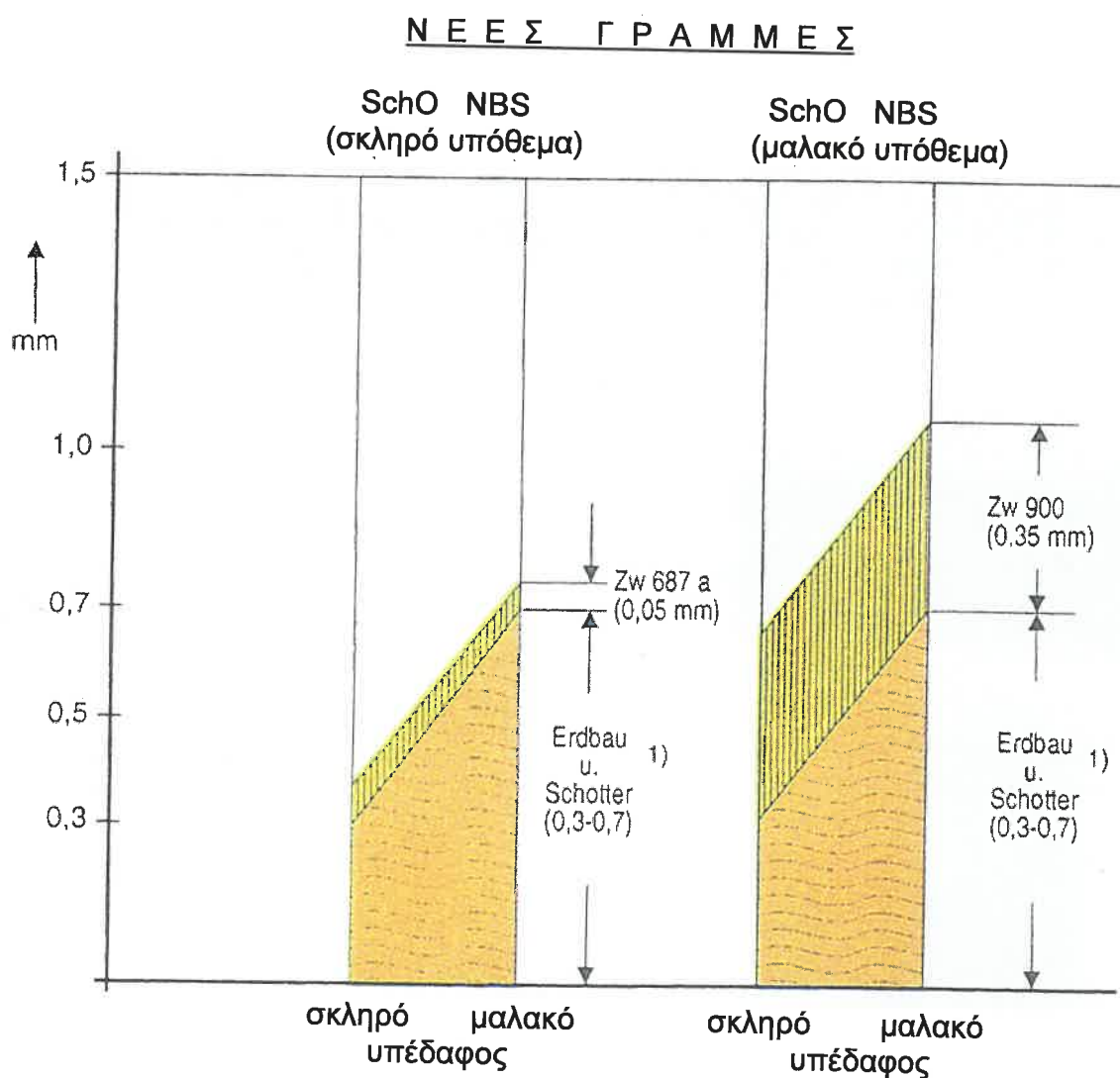
Τα βασικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων οφείλουν να είναι τα παρακάτω:

- Επαρκείς και συνεχείς μηχανική αντίσταση και ελαστικότητα κατά τη διάρκεια ζωής της σύνδεσης
- Ικανοποιητική συμβολή στην ηλεκτρική μόνωση των σιδ/χιων
- Οι σύνδεσμοι να αποτελούνται από τον ελάχιστο δυνατό αριθμό στοιχείων με όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος, ώστε να διευκολύνεται η κατασκευή, η συναρμολόγηση και η συντήρησή τους
- Να προσφέρουν χαμηλό κόστος κατασκευής και χρησιμοποίησης
- Να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής [6]

Σε συνδυασμό με την επιτυχώς δοκιμασμένη επιδομή UIC60, B70 W με σκληρό ελαστικό υπόθεμα ZW 687α και συντελεστή ελαστικότητας $c=500 \text{ KN/mm}$ επιτυγχάνετο μια ελαστική επαναφορά η οποία υπό την επιρροή των 200 KN αξονικό φορτίο και της $V_{\max}=250 \text{ km/h}$ του ICE επέτρεπε βύθιση της σιδ/χιας μόνον από 0,3 έως 0,7 mm. Επακόλουθο αυτής της μειωμένης ελαστικότητας είναι η εμφάνιση μιας "σκληρής" (όχι άνετης) κύλισης των οχημάτων σε συνδυασμό με τις ICE-δονήσεις και η αυξανόμενη συντήρηση της γραμμής, η οποία στην αρχή εμφανίζεται σαν τριβή (φθορά) έρματος.

Η αντικατάσταση του σκληρού ελαστικού υποθέματος ZW 687α από το χρησιμοποιούμενο στους SNCF ZW 900 με $c_{\text{stat}}=60$ έως 70 KN/mm και δυναμικό

$c_{dyn} (50 \text{ Hz}) = 185 \text{ KN/mm}$, που στις χαμηλές θερμοκρασίες και στον μικρό χρόνο επενέργειας του φορτίου κατά την διέλευση των ICE αυξάνει, προσδίδει βέβαια κάποια ελάχιστη καλύτερευση αλλά δεν επιλύει το πρόβλημα, όπως μπορούμε να διαπιστώσουμε και από την γραμμή *Paris- Lyon*, η οποία από το 1996, και με διέλευση 250 εκατ. τόνοι φορτίων, υφίσταται γενική ανακαίνιση. Το ίδιο συνέβη και με την χρησιμοποίηση από τους DB του μαλακού υποθέματος *ZW 900* στις ανακαινισθείσες γέφυρες από *Beton* των νέων γραμμών όπου σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα κρίθηκε αναγκαία η εκτέλεση εργασιών στο έρμα και σε πολλές περιπτώσεις η αντικατάσταση αυτού (στο διάγραμμα 7 παρουσιάζεται η επιμέρους προσδιδόμενη ελαστικότητα από κάθε υλικό). Ήταν λοιπόν επιτακτική ανάγκη να ανευρεθεί ένας άλλος τύπος σκυρογραμμής για υψηλές ταχύτητες ώστε να εφαρμοστεί στις ήδη κατασκευαζόμενες γραμμές υψηλών ταχυτήτων. Για την περίπτωση αυτή έπρεπε να ληφθεί σοβαρά υπόψη και η καθιέρωση της άνευ τριβών πέδης (*Wirbelstrombremse*).



Διαγρ.7 ελαστικότητα των διαφόρων μερών της επιδομής σκυρογραμμής στην επιφάνεια καταστρώματος νέων γραμμών πηγή [ETR 3/97]

Από το διάγραμμα παρατηρούμε τις τιμές της βύθισης της σιδ/χιας στην περίπτωση σκληρού και μαλακού υπεδάφους. Όσο πιο σκληρό είναι το υπέδαφος τόσο μικρότερη τιμή έχει η βύθιση και ανάλογα στην περίπτωση μαλακού τύπου. Παρόμοιες τιμές έχουμε και στην περίπτωση αντικατάστασης του ελαστικού υποθέματος Zw 687α με Zw 900. Βέβαια το μέτρο ακαμψίας του υποθέματος αυτού είναι μεγαλύτερο (0,35 mm) άρα και πιο μαλακότερο από το Zw 687α. Η βύθιση της σιδ/χιας εδώ παρατηρείτε μεγαλύτερη φθάνοντας την τιμή περίπου 1 mm, λογικό εφόσον έχουμε πιο μεγάλο μέτρο ελαστικότητας.

Για να υπολογίσουμε τον συνολικό συντελεστή ελαστικότητας της επιδομής, σύμφωνα πάντα και με το διάγραμμα 7, κάνουμε χρήση του τύπου:

$$C_{\text{συν}} = [1] / [(1/c_1) + (1/c_2)] \quad [2.8.1.1]$$

όπου:

- $C_{\text{συν}}$: συντελεστής ελαστικότητας επιδομής σε KN/mm
- C_1 : συντελεστής ελαστικότητας επιδομής χωρίς το σύνδεσμο σε KN/mm
- C_2 : συντελεστής ελαστικότητας του συνδέσμου σε KN/mm

με τιμές:

➤ $c_1 = 100$ έως 120 KN/mm [$C = 0,3$ N/mm³ αντιστοιχεί στις νέες γραμμές] και

➤ $c_2 = 23$ KN/mm

έχουμε για $C_{\text{συν}} = 18,7$ έως $19,3$ KN/mm ή

$$C = [C_{\text{συν}} \times 2000] / [F] = 0,050 \text{ έως } 0,051 \text{ N/mm}^3, \text{ με } F_{B75} = 75230 \text{ mm}^2 \quad [7]$$

Σύμφωνα με τον τύπο [2.8.1.1] ο συνολικός συντελεστής ελαστικότητας της επιδομής εξαρτάται από τους επιμέρους συντελεστές ελαστικότητας των στοιχείων που αποτελούν την επιδομή. Το $C_{\text{συν}}$ υπολογίζεται με βάση την ελαστικότητα της επιδομής όταν δεν χρησιμοποιούμε σύνδεσμο, μέτρο ελαστικότητας c_1 , καθώς και με την ελαστικότητα του συνδέσμου, μέτρο ελαστικότητας c_2 .

Λόγο της ανάπτυξης δικτύων πολύ υψηλών ταχυτήτων (με ταχύτητες εκμετάλλευσης $V_{\text{max}} \geq 250$ km/h, όπως TGV στην Γαλλία, AVE στην Ισπανία, ICE στην Γερμανία κλπ που απαιτούν τη χρησιμοποίηση συνδέσμων με πολύ μικρή τιμή του συντελεστή ελαστικότητας c) αναπτύχθηκε τεχνολογικά και μπήκε σε

μαζική παραγωγή και στην Γερμανία ο σύνδεσμος *SKL* (ή ελατηριωτό αγκύριο) με πολύ μικρή τιμή του c (*SKL 14*), με $c_{stat}=42 \text{ KN/mm}$.

Με βάση τις ταχυτήτες αυτές παρουσιάστηκε στις νεο-κατασκευαζόμενες γραμμές (*NBS*) των *DB*, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, μεγάλη φθορά του έρματος. Για να αντιμετωπιστεί η δημιουργηθείσα κατάσταση μελετήθηκε, κατασκευάστηκε και δοκιμάζεται ένας νέος τύπος συνδέσμου ο **E14 (Skl14)** (βλέπε εικ. 21). Με το σύνδεσμο αυτό επιδιώκεται η επιτυχία μεγαλύτερης ελαστικότητας (βύθισης) της γραμμής όμοια με εκείνης της Σ.Ε. (δηλαδή $\geq 1.5 \text{ mm}$ έναντι $0,6 \text{ mm}$ περίπου της κλίνης έρματος). Ο στατικός συντελεστής ελαστικότητάς του είναι $c_{stat}=60 \text{ KN/mm}$ και ο δυναμικός $c_{dyn(100-2000 \text{ Hz})}=80-275 \text{ KN/mm}$



εικ. 21 σύνδεσμος *E14* → σήμερα *Skl 14*

Για την επιτυχία αυτής της ελαστικότητας, χωρίς να αντικατασταθεί το υπάρχων υλικό στρώσης της επιδομής όπως στρωτήρες (για αύξηση της επιφάνειας έδρασης), ελαστικό υποθέμα *ZW 700*, ελατηριωτό αγκύριο *SKL* κτλ που θα απαιτούσαν μεγάλες δαπάνες, υπήρχε μια μόνο δυνατότητα και αυτή ήταν η αύξηση της ελαστικότητας του ελαστικού υποθέματος *ZW 700*. Αυτό όμως εγκυμονεί κινδύνους ανατροπής της σιδ/χιας, όταν ο συντελεστής ακαμψίας του ελαστικού υποθέματος c γίνει μικρότερος από 50 KN/mm . Επειδή το πρόβλημα έπρεπε να λυθεί μόνον κατ' αυτόν το τρόπο (δηλαδή ο σύνδεσμος να προσδίδει την αύξηση ελαστικότητας στη γραμμή), ώστε η λύση να είναι οικονομική, μελετήθηκε η δυνατότητα τοποθέτησης και ενός προσθέτου μαλακότερου υποθέματος το οποίο να εξασφαλίζει και την μη ανατροπή της σιδ/χιας, έτσι δημιουργήθηκε ο σύνδεσμος *E14* ο οποίος αποτελείται κατά σειρά από:

- Ένα ελαστομέρ πάχους 14 mm (*ZWP*=ενδιάμεση πλάκα) με $c=28 \text{ KN/mm}$ το οποίο τοποθετείται επάνω στο στρωτήρα *B70* (στη θέση έδρασης της σιδ/χιας) και έχει την δυνατότητα να παρακολουθεί τις -γρήγορες- ταλαντώσεις της γραμμής οφειλόμενες στις υψηλές ταχύτητες κυκλοφορίας των συρμών.
- Μια μεταλλική πλάκα πάχους 10 mm και ίδιων διαστάσεων με το ελαστομέρ (*ZWP*) επάνω στο οποίο τοποθετείται. Η μεταλλική πλάκα

εξασφαλίζει την καλή κατανομή των φορτίων και την μη ανατροπή της σιδ/χιας.

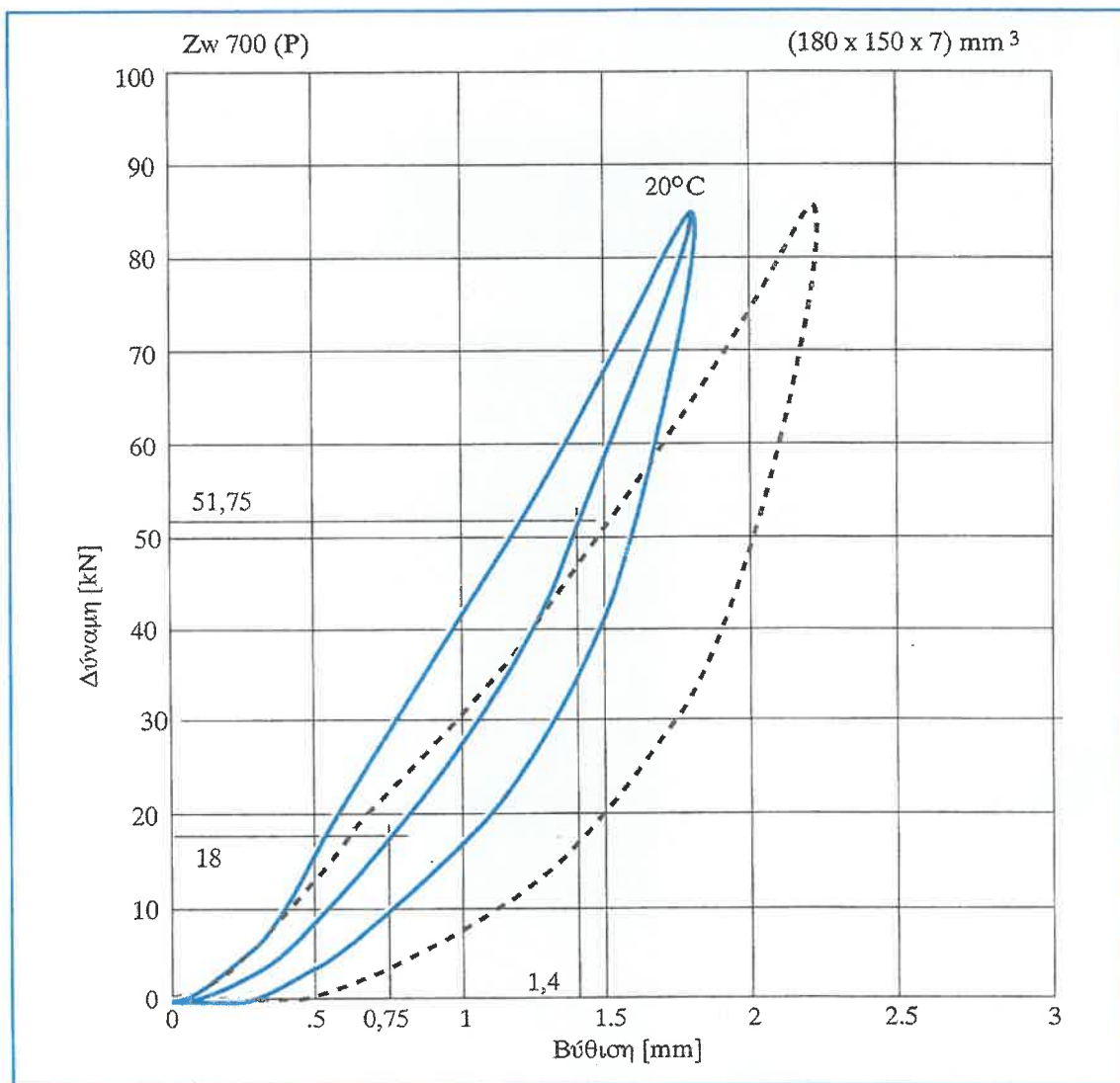
- Το ελαστικό υπόθεμα που προϋπήρχε (*ZWP700*) το οποίο τοποθετείται επάνω στην μεταλλική πλάκα και επάνω στο ελαστικό υπόθεμα τοποθετείται η σιδ/χια η οποία συσφίγγεται από τα δυο ελατηριωτά αγκύρια *SKL 14*.

Με το σύνδεσμο *E14*, όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, είναι πλέον δυνατή η αύξηση της ελαστικότητας της γραμμής (βύθιση 1,5 mm) όμοια με της *Σ.Ε.* Η συνολική βύθιση του 1,5 mm επιτυγχάνεται ως εξής:

- 0,9 έως 1,0 mm από το σύνδεσμο (ελαστομέρ) *E14* και
- 0,6 έως 0,5 mm από την κλίνη έρματος. **[9]**

Είδαμε προηγούμενος το είδος του συνδέσμου και το ελαστικό υπόθεμα που χρησιμοποιούμε στις υψηλές ταχύτητες. Στις συμβατικές γραμμές που εμφανίζεται ο ξύλινος στρωτήρας, κυρίως, χρησιμοποιείται κατά κανόνα την λεγόμενη *σύνδεση K* που αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε στους Γερμανικούς σιδ/μους το 1925. Με την σύνδεση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια ελαστική πλάκα – υπόθεμα από μαλακό ξύλο ή φελλό ή ελαστικό, η οποία ενισχύει την επαφή σιδ/χιας – πλάκας, μειώνει τις φθορές, ενώ ταυτόχρονα προσδίδει ελαστικότητα, διαφορετική από αυτή των ελαστικών υποθεμάτων για υψηλές ταχύτητες. Ο ΟΣΕ χρησιμοποιεί τα τελευταία χρόνια την σύνδεση αυτή με συνδέσμους *Skl 12*.

Στο διάγραμμα 8 παρουσιάζονται οι καμπύλες απόκρισης, του ελαστικού υποθέματος *Zw 700* σε 20 ° C και στο διάγραμμα 9 η καμπύλη απόκρισης αγκυρίου *K (Fe6)* σε σύγκριση με τα αγκύρια *Skl 14* και *Skl 12*. **[6]**

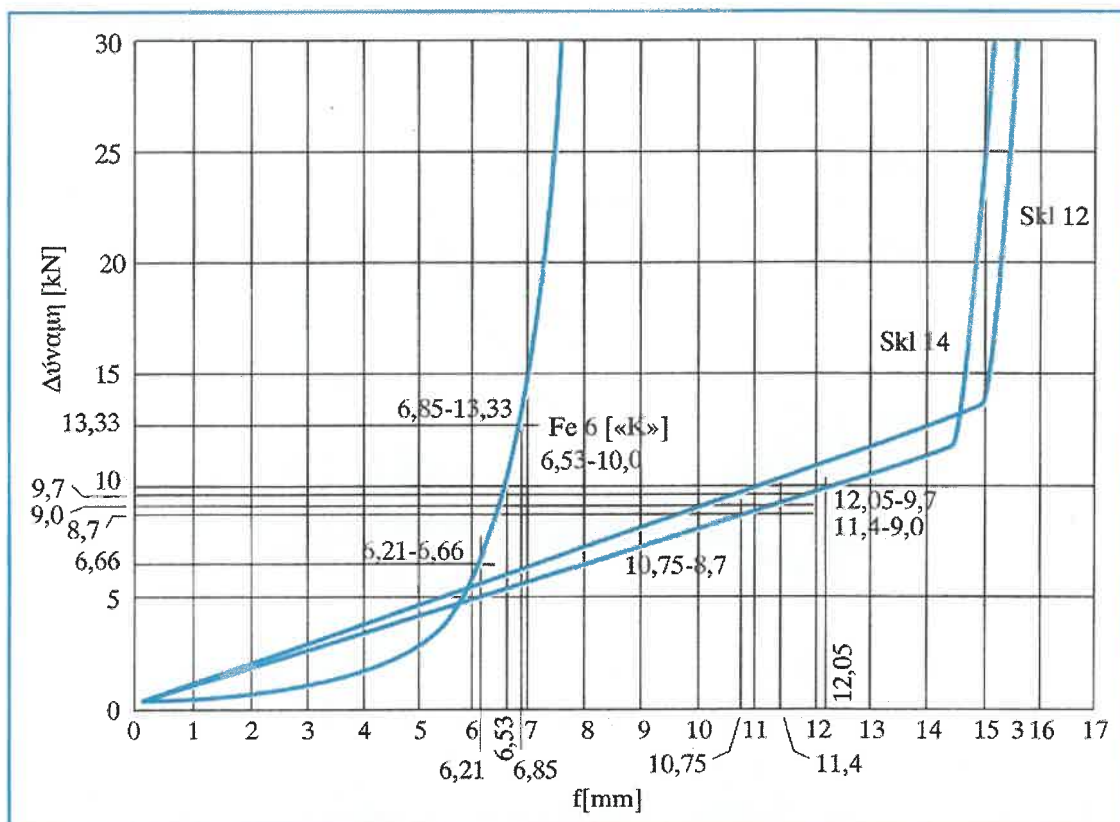


Διάγραμμα απόκρισης ελαστικού υποθέματος ZW 700 (P) για 20°C

Διαγρ. 8

πηγή [6]

Με τον όρο καμπύλη απόκρισης εννοούμε την συνεργασία συνδέσμου με ελαστικό υπόθεμα, δηλαδή ο σύνδεσμος πρέπει να ακολουθεί τη βύθιση του ελαστικού υποθέματος την προκαλούμενη από τα διερχόμενα, επάνω από την έδραση της σιδ/χια, φορτία του τροχού και να πιέζει συνεχώς με την ίδια δύναμη, το πέλμα της σιδ/χια επάνω στο ελαστικό υπόθεμα, ώστε να αποτραπεί η χαλάρωση της σύσφιξης η οποία θα επιτρέψει την όδευση της σιδ/χιας επάνω στο στρωτήρα. Εάν αυτό δεν συμβαίνει τότε δεν υπάρχει απόκριση συνδέσμου-ελαστικού υποθέματος και η σιδ/χια σε κάποια χρονική στιγμή της καταπόνησης της "θεωρητικά" δεν συσφίγγεται με την πλήρη δύναμη σύσφιξης του συνδέσμου που θα πρέπει (κατά τον καθηγητή κ. *Eisenmann*) να είναι, για ΣΣΣ τουλάχιστον $2 \times 6 = 12$ KN, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος ερπυσμού της σιδ/χιας επάνω στο στρωτήρα με όλες τις δυσάρεστες συνέπειες κυρίως σε γραμμές με ΣΣΣ. [9]

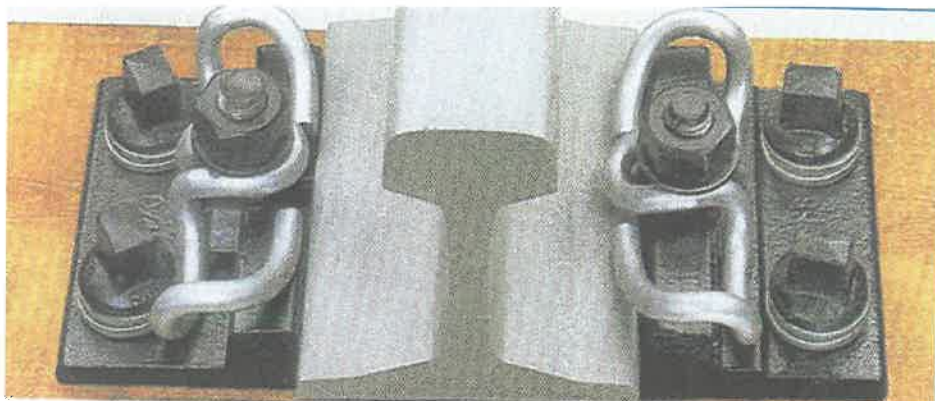


Καμπύλες απόκρισης αγκυρίου K(Fe6)
σε σύγκριση με τα αγκύρια Skl14 και Skl12

Διαγρ.9

πηγή [6]

Με βάση το διάγραμμα 9, παρατηρούμε την βύθιση της σιδ/χιας σε κάθε μια περίπτωση διαφορετικών αγκυρίων ανάλογα πάντα με την δύναμη σύσφιξης που ασκείται στην κάθε μια. Βλέπουμε έτσι, ότι στην περίπτωση των αγκυρίων Skl 12 (βλέπε εικ. 22, 22α τομή) και Skl14 (εικ. 23, 23α τομή) δεν παρατηρούνται μεγάλες διαφορές ως προς την βύθιση και την ανάλογη δύναμη και αυτό επειδή χρησιμοποιούνται τα ίδια ελαστικά υποθέματα εφόσον μιλάμε για αγκύρια με παρόμοιες ιδιότητες. Στην περίπτωση του αγκυρίου K βλέπουμε πως μεταβάλλεται η καμπύλη απόκρισης, και την κατά πολύ μικρότερη βύθιση σε ίδιες δυνάμεις σύσφιξης. Αυτό συμβαίνει επειδή το ελαστικό υπόθεμα εδώ είναι από διαφορετικό υλικό και οι καταπονήσεις της σιδ/χιας διαφορετικές, από την περίπτωση συρμών με υψηλές ταχύτητες.



σε θέση «προμονταρισμένος»

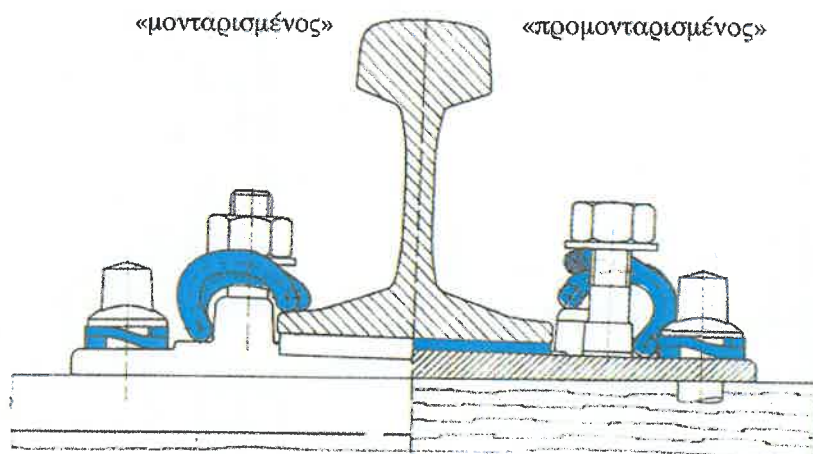
σε θέση «μονταρισμένος»

εικ. 22 σύνδεσμος Skl 12 της Vossloh σε μεταλλική πλάκα τύπου K, επί ξύλινου στρωτήρα πηγή [6]

Στην προκειμένη περίπτωση, με βάση τα διαγράμματα 8 και 9 θα ισχύει:

Για αρχική δύναμη σύσφιξης $2 \times 9 = 18 \text{ KN}$ (διαγρ.8 Skl 14, Zw 700 , θα πρέπει η δύναμη σύσφιξης να είναι μεγαλύτερη από 8 KN για να εξασφαλίζεται επαρκής αγκύρωση της σιδ/χιας) η βύθιση είναι 0,75 mm. Αν θεωρήσουμε υποδομή με $C_{\text{υποδομ}} = 20 \text{ KN/mm}$, σιδ/χια UIC 60, τότε:

$$C_{\text{ολ}} = \frac{1}{75.000} + \frac{1}{13.500} + \frac{1}{20} + \frac{1}{C_{\text{υποθ}}} \quad [2.8.1.2]$$



εικ. 22α τομή συνδέσμου Skl 12 σε μεταλλική πλάκα τύπου K, επί ξύλινου στρωτήρα πηγή [6]

Ο συντελεστής ελαστικότητας υποθέματος (γραμμής) $c_{\text{υποθ}}$ είναι άγνωστο μέγεθος, δεδομένο ότι δεν είναι γνωστό το αναλαμβανόμενο φορτίο από το στρωτήρα.

Ο συντελεστής ελαστικότητας της σιδ/χίας $c_{\text{σιδ/χίας}} = 75.000 \text{ KN/mm}$, και του στρωτήρα $c_{\text{στρωτ}} = 13.500 \text{ KN/mm}$. Υπολογίζουμε την δύναμη που θα καταπονεί το υπόθεμα δηλαδή $R_{\text{ολ}} = 33,75 + 18 = 51,75$ όπου 33,75 KN έχει υπολογιστεί το αρχικά αναλαμβανόμενο φορτίο με τον τύπο:

$$\bar{A} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{L^3 \cdot c_{\text{ολ}}}{E \cdot J}} = 0,302 \quad [2.8.1.3]$$

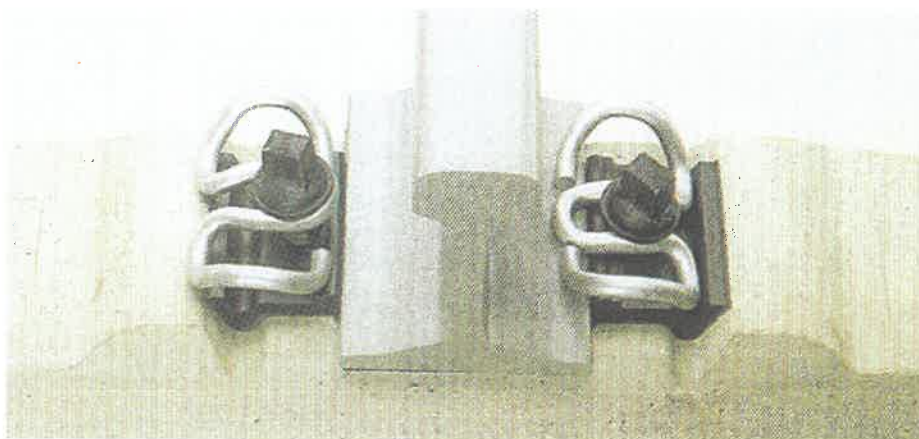
όπου

$E=210 \text{ N/mm}^2$ μέτρο ελαστικότητας και $J = 3,055 \times 10^7 \text{ mm}^4$ ροπή αδρανείας σιδ/χίας.

$\bar{A} = 0.300$ και φορτίο τροχού $Q=112,5 \text{ KN}$, ισχύει $R=0,300 \times 112,5 = 33,75 \text{ KN}$. Άρα από την καμπύλη απόκρισης (διαγρ. 2) για δύναμη 51,75 KN έχουμε βύθιση $y_{\text{ολ}}=1,4 \text{ mm}$ και $\Delta y = 1,40 - 0,75 = 0,65 \text{ mm}$ όποτε μπορούμε να υπολογίσουμε με τον τρόπο αυτό το $c_{\text{υποθ}}$ που είναι :

$$c_{\text{υποθ}} = \frac{R}{\Delta y} = \frac{33,75}{0,65} = 51,92 \text{ KN/mm} \quad [2.8.1.4]$$

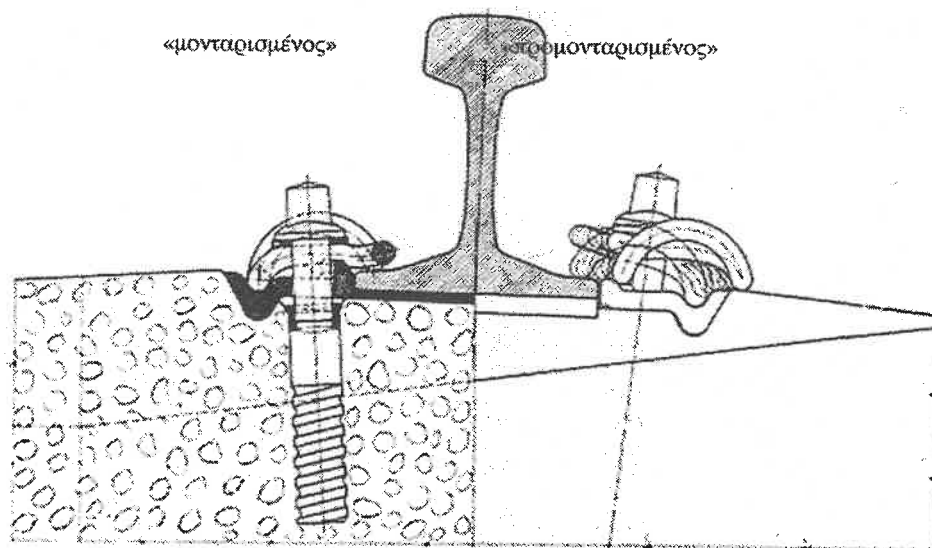
όπου R είναι η συνολική αντίδραση ενός ημιστρωτήρα και Δy η αντίστοιχη υποχώρησή του.



σε θέση «προμονταρισμένος»

σε θέση «μονταρισμένος»

εικ. 23 σύνδεσμος Skl 14 της Vossloh σε στρωτήρα από σκυρόδεμα πηγή [6]

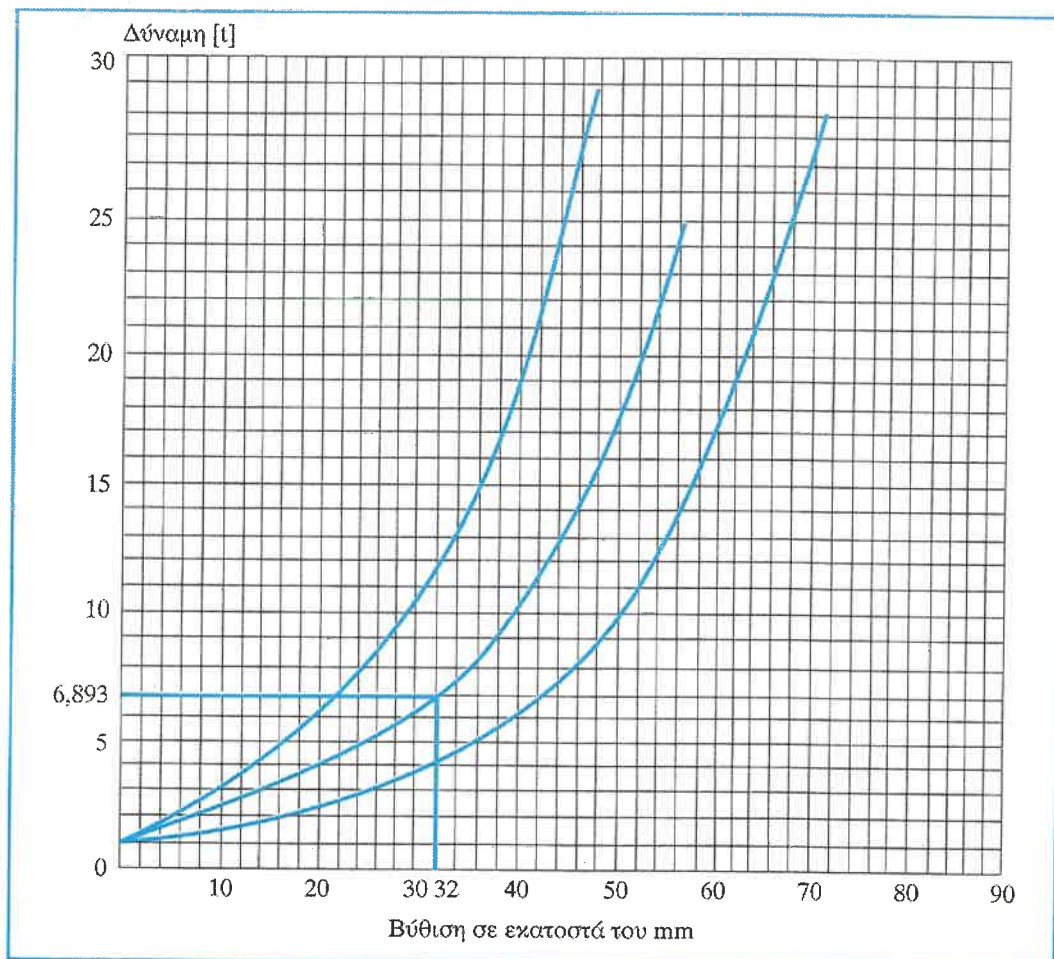


εικ. 23α τομή συνδέσμου Skl 14 της Vossloh σε στρωτήρα από σκυρόδεμα
πηγή [6]

Από την καμπύλη απόκρισης διαγρ. 9 του Skl14 από την αρχική βύθιση 11,4 m που αντιστοιχεί σε δύναμη σύσφιξης 9 KN (ένα αγκύριο 9 KN, δυο αγκύρια 18KN) αν προσθέσουμε ή αφαιρέσουμε 0,65 mm η δύναμη σύσφιξης θα κυμανθεί από 8,7 έως 9,7 KN , άρα είναι συμβατό το αγκύριο με το υπόθεμα. Ενώ, αν π.χ. για υποδομή $c=100$ KN/mm ,σιδ/χια UIC60, ξύλινους στρωτήρες και ελαστικό υπόθεμα 4,5 mm, χρησιμοποιώντας αγκύριο K η αρχική σύσφιξη είναι περίπου 10 KN στο υπόθεμα δίδει βύθιση μηδενική βάση της καμπύλης απόκρισης. Χρησιμοποιώντας τους τύπους [2.8.1.2, 2.8.1.3, 2.8.1.4] έχουμε για την περίπτωση αυτή $\bar{A} = 0,435$ και $R=0,435 \times 112,5= 48,93$. Συνεπώς θα καταπονεί το υπόθεμα δύναμη $R_{o\lambda} = 20 + 48,93= 68,94$ KN (διάγραμμα 10). Όποτε από την καμπύλη απόκρισης του υποθέματος για 68,93 KN βρίσκουμε βύθιση:

$$y_{o\lambda} = 32/100 \text{ mm} = 0,32 \text{ mm}$$

$$c_{\text{υποθ}} = 48,93/0,32 = 152,91 \text{ KN/mm} \quad \rightarrow \quad c_{o\lambda} = 60,14 \text{ KN/mm}$$



Διαγρ. 10 βύθιση σε εκατοστά του mm

πηγή [6]

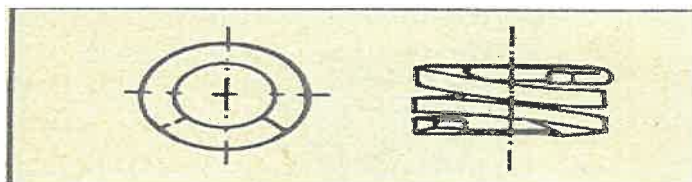
Από την καμπύλη του αγκυρίου K για αρχική σύσφιξη 10 KN βρίσκουμε $y_{αρχ} = 6.53$ mm και $y_{τελ.}^1 = 6.53 + 0.32 = 6.85$ που αντιστοιχεί σε δύναμη ≈ 13.33 KN και $y_{τελ.}^1 = 6.53 - 0.32 = 6.21$ που αντιστοιχεί σε δύναμη ≈ 6.66 KN. Η χαμηλή τιμή εξηγεί το γεγονός της όδευσης των ελαστικών υποθεμάτων στην περιοχή όπου αναφέρονται οι μετρήσεις αυτές (Ελλαδικό χώρο) όπου η τιμή τους είναι περίπου $c_{υποθ} = 250$ και η χαμηλή τιμή να είναι ακόμα μικρότερη, ιδίως με σιδ/χίες ελαφρότερες. Η δύναμη που ασκείται στο πέλμα της σιδ/χίας κατά τη στιγμή διέλευσης του άξονα του οχήματος, ισούται με 6,6 KN το πολύ, με αποτέλεσμα όδευση του πέλματος της σιδ/χίας και του ελαστικού υποθέματος, το οποίο «κολλά» στο πέλμα.

Παρατηρούμε την διαφορά στο μέτρο ακαμψίας (ελαστικότητας) της γραμμής του χρησιμοποιούμενου υποθέματος για τις δυο περιπτώσεις. Πολύ μεγάλη τιμή του μέτρου ακαμψίας στην περίπτωση αγκυρίου K σε στρωτήρες ξύλινους όπου έχουμε μια πιο ελαφριά κατασκευή γενικά σε σχέση με τις βαριές κατασκευές που χρησιμοποιούμε στις υψηλές ταχύτητες με στρωτήρες από σκυρόδεμα π.χ. B70. Στη περίπτωση δηλαδή συνδέσμου Sk14 με βάση την δύναμη (αντίδραση ημιστρωτήρα) που δέχεται το υπόθεμα έχουμε βύθιση της σιδ/χίας σχεδόν διπλάσια, δηλαδή 0,65 mm από την βύθιση 0,32 mm στην περίπτωση του υποθέματος με αγκύριο K. Γι αυτό λοιπόν όπως έχουμε επισημάνει πιο πάνω ήταν επιτακτική ανάγκη να βρεθεί ένα σύνδεσμος με κατάλληλο ελαστικό

υπόθεμα που θα μπορεί να έχει ικανοποιητικό μέτρο ακαμψίας και να προσδίδει την απαιτούμενη βύθιση που χρειάζονται οι σιδ/χίες των υψηλών ταχυτήτων εφόσον η έδρασή τους γίνεται είτε σε Σταθερή Επιδομή είτε σε Σκυρογραμμή με στρωτήρες σκυροδέματος.[6]

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η άμεση σύνδεση σιδ/χίας – στρωτήρα ή σιδ/χίας- πλάκας έδρασης- στρωτήρα με ελικωτά (τιρφώνια) γραμμής είναι μια σύνδεση παραδοσιακή, κατά κανόνα κατάλληλη για ξύλινους στρωτήρες σε συμβατικές γραμμές. Το πλεονέκτημα αυτού του είδους σύνδεσης είναι το γεγονός ότι έχει απλή συναρμολόγηση, εύκολη συντήρηση και με μικρό αριθμό εξαρτημάτων όπως και η σύνδεση με τα καρφιά. Παρόλα αυτά παρουσιάζει το γενικό μειονέκτημα της μη ελαστικής σύνδεσης δεν είναι ικανή να ακολουθήσει τις κατακόρυφες μετακινήσεις της σιδ/χίας με αποτέλεσμα να αναιρείται η επιδρούσα στη σιδ/χία πίεση. Επίσης, η σύνδεση αυτή σιδ/χίας- πλάκα έδρασης - στρωτήρα εμφανίζει χαλαρώσεις στη σύσφιξη οφειλόμενες στη μεταβίβαση των ταλαντώσεων από το σύνδεσμο στο ελικωτό. Οι χαλαρώσεις αυτές επενεργούν δυσμενώς τόσο στο εύρος της γραμμής όσο και στη ροπή σύσφιξης του συνδέσμου. Προς αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού κατασκευάσθηκαν οι νευρώσεις στην πλάκα "Κ", ώστε οι συνδέσεις σιδ/χίας με πλάκα έδρασης και πλάκα έδρασης με στρωτήρα να είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες (έμμεση σύνδεση).

Επίσης, ιδιαίτερα στις υψηλές ταχύτητες αλλά και στις συμβατικές γραμμές, προς αποφυγήν είναι και η χρησιμοποίηση διπλής ελατηριωτής ροδέλας 9 (εικ.24), η οποία ήταν η πρώτη προσπάθεια να δοθεί βύθιση στην σιδηροτροχιά, κατά την οποία υπάρχει μια ελατηριωτή διαδρομή 7 mm και ελατηριωτή δύναμη 30 KN. (εξασκεί επί της σιδ/χίας 15 KN και επί της πλάκας έδρασης 15 KN επίσης).



εικ. 24 διπλή ελατηριωτή ροδέλα πηγή DB [43]

Σε απώλεια 1 mm ελατηριωτής διαδρομής η ελατηριωτή δύναμη της διπλής ροδέλας μειώνεται κατά 60%. Οι θραύσεις των διπλών ελατηριωτών ροδελών οφείλονται κατά κύριο λόγο στις μεγάλες διακυμάνσεις των φορτίων (19 έως 30 KN). Η διπλή ελατηριωτή ροδέλα έχει περιορισμένες δυνατότητες αντιμετώπισης των ταλαντώσεων (δέχεται 50.000 ταλάντωσης περίπου και μετά θεωρείται άχρηστη).

Με βάση πειράματα που έγιναν στο Ινστιτούτο του κ. J. EISENMANN στο Μόναχο, διαπιστώθηκε ότι παρά την συνεχή καταπόνηση των ελατηριωτών αγκυρίων SKL στο μηχάνημα ταλαντώσεων (όπως ακριβώς καταπονούνται και επί της γραμμής) το βλήτρο σύσφιξης του συνδέσμου δεν επηρεαζόταν καθόλου, διότι το τμήμα του ελατηριωτού αγκυρίου (στη θέση σύσφιξής του) δεν καταπονείτο από τις ταλαντώσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα επί γραμμής την μη

χαλάρωση της σύσφιξης του συνδέσμου με όλα τα αυτονόητα πλεονεκτήματα, όπως τη διατήρηση της γραμμής στην κανονική της θέση, την ελαχιστοποίηση της συντήρησης κτλ.

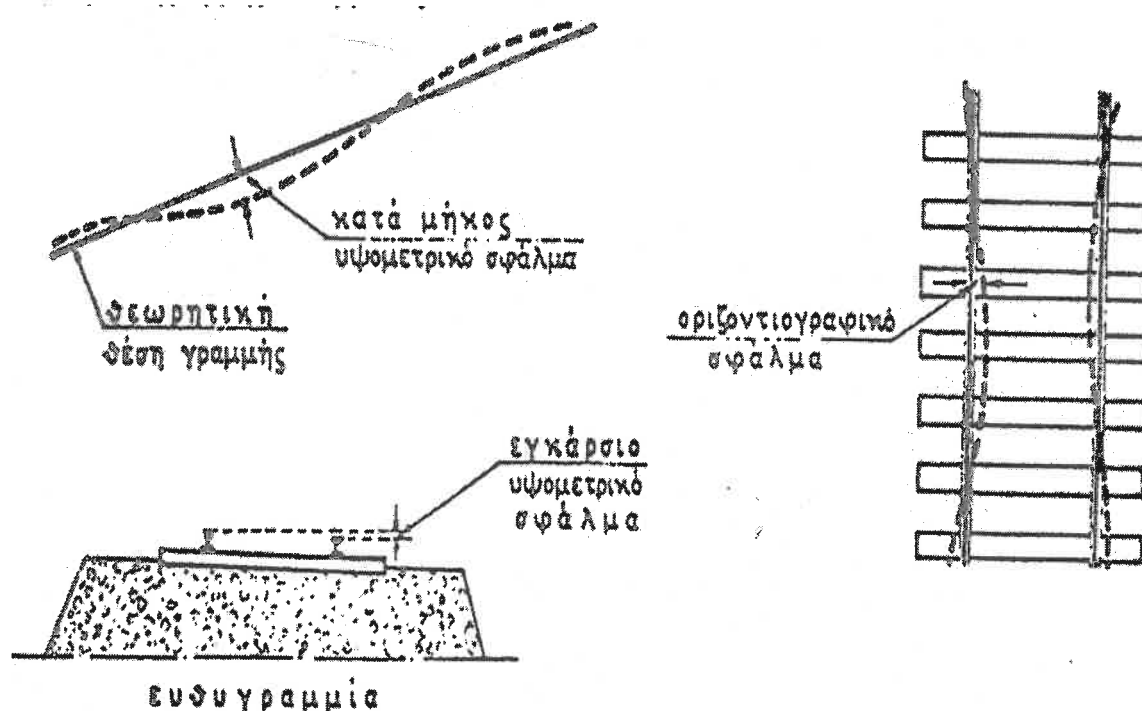
Σε αντίθεση με το ελατηριωτό αγκύριο *SKL*, την περίοδο 1990-1993 πριν την εμφάνιση του *SKL*, είχαμε στην σιδηροδρομική αγορά έναν πολύ «μαλακό» σύνδεσμο, τον λεγόμενο *Nabla* (με $c_{stat}=78 \text{ KN/mm}$). Ο σύνδεσμος αυτός μεταβιβάζει όλες τις καταπονήσεις του στο βλήτρο σύσφιξης με συνέπεια τη συνεχή χαλάρωση της σύσφιξης η οποία επηρεάζει το εύρος της γραμμής, προκαλεί ερπυσμό της σιδ/χίας επί του στρωτήρα (συμπαρασύροντας και το ελαστικό υπόθεμα). Το σύστημα αυτό πέραν των άλλων μειονεκτημάτων (μη διατήρηση της γραμμής στην κανονική της θέση με όλες τις συνέπειες, κακή προσφερόμενη ποιότητα κτλ) απαιτεί και αυξημένη συντήρηση της γραμμής. Άρα καταλήγουμε, ότι δεν μπορεί να προσφέρει την κατάλληλη ποιότητα που χρειάζεται για τις υψηλές ταχύτητες με βάση τα προαναφερόμενα, σε αντίθεση με τις συμβατικές γραμμές που εκεί μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον οι δυνάμεις και τα φορτία δεν έχουν την ίδια συχνότητα διέλευσης άρα και διαφορετική συμπεριφορά της γραμμής. [9]

Όταν αξιολογούμε τις δυνάμεις σύσφιξης πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι οι κατακόρυφες δυνάμεις που ενεργούν στην σιδ/χία, έχουν φορά προς τα κάτω αλλά και προς τα πάνω, δηλαδή έχουν φορά εναλλασσόμενη. Οι δυνάμεις που κατευθύνονται προς τα κάτω αλλάζουν φορά μόλις ο τροχός περάσει από την συγκεκριμένη θέση του στρωτήρα. Οι δυνάμεις που κατευθύνονται προς τα πάνω γεννιούνται από την κύμανση της σιδ/χίας που προπορεύεται και ακολουθεί τον τροχό. Για να ανταποκριθεί σε αυτές τις καταπονήσεις κάθε σύνδεσμος πρέπει να έχει ελαστικές ιδιότητες οι οποίες να παραμένουν ανεπηρέαστες ακόμα και μετά από επανειλημμένους κύκλους φορτίσεων. Η σύσφιξη, λοιπόν, της σιδ/χίας στον στρωτήρα και η προκαλούμενη τριβή πρέπει να είναι επαρκείς για να εμποδίσει την όδευση της σιδ/χίας που προκύπτει από θερμοκρασιακή διαστολή. Αν δεν διασφαλισθεί επαρκής σύσφιξη, οδηγούμαστε σε στρέβλωση της γραμμής. Όλα αυτά τα στοιχεία πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή συνδέσμου είτε σε γραμμές υψηλών ταχυτήτων είτε σε συμβατικούς σιδ/μους ώστε ολόκληρο το "σετ" του συνδέσμου (πλάκα, ελατηριωτή ροδέλα, ελαστικό υπόθεμα και ελατηριωτό αγκύριο) να μην επιτρέπει μεταβίβαση (μέσω του στρωτήρα) στο έρμα θλιπτικών τάσεων μεγαλύτερων αυτών που αντέχει το κάθε πέτρωμα ανάλογα το έδαφος.

2.9.2 Γενικά αίτια επιδείνωσης της κατάστασης της γραμμής

Καθοριστικές για την λόγω κυκλοφοριακών φορτίων επιδείνωση της κατάστασης της επιδομής έρματος είναι οι ανομοιόμορφες καθιζήσεις (υποχωρήσεις) του έρματος, οφειλόμενες στην επανασυμπύκνωση του έρματος, η οποία προκαλεί σμίκρυνση και τριβή των κόκκων του έρματος. Αυτό μπορεί να συμβεί και σε μια ακατάλληλη και κακής ποιότητας υποδομή (συναντάται σε παλαιότερες γραμμές).

Η επιδείνωση της κατάστασης της γραμμής συνοδεύόμενη με οριζοντιογραφικά και υψομετρικά σφάλματα καθώς και αυξανόμενη δημιουργία κενών κάτω από τους στρωτήρες (σάλτα), απαιτεί ή την τοπική επέμβαση για απομάκρυνση οριακών σφαλμάτων ή κατά τάστα διαστήματα και πριν εμφανιστούν μεγάλα σφάλματα, εκτέλεση εργασιών συντήρησης σε μεγάλα μήκη γραμμής (βλέπε εικ. 25). Σε μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα θα πρέπει να γίνεται καθαρισμός έρματος και ταυτόχρονα (κατά περίπτωση) αντικατάσταση αυτού. [7]



εικ. 25 Συνήθη «σφάλματα» σε γραμμή επί έρματος

2.9.3 Αξιολόγηση της μακράς διάρκειας διατήρησης της κατάστασης της γραμμής

Η προκαλούμενη από την κυκλοφοριακή καταπόνηση επιδείνωση της γραμμής μπορεί να ελαχιστοποιηθεί εάν περιοριστούν η συμπίεση του έρματος και οι προκαλούμενες από τα οχήματα ταλάντωσης (κραδασμοί). Γι' αυτό τον σκοπό παραπέμπουμε στις έρευνες που έγιναν στο Τεχν. Πανεπιστήμιο του Μονάχου από το 1980 έως 1991 καθώς και σε μετρήσεις που έγιναν το 1995 στη γραμμή *Hannover-Wurzburg* για να διαπιστωθεί η ταχύτητα μετάδοσης των ταλαντώσεων στο έρμα (κάτω από τον στρωτήρα) που προκαλούν τα ICE με $V=280$ km/h.

Για να εκτιμηθεί το μέγεθος επιδείνωσης της κατάστασης της γραμμής χρησιμοποιείται εκθετική μέθοδος υπολογισμού, η οποία έχει μελετηθεί, δοκιμαστεί και εγκριθεί, ως προς την εξασφάλιση κατά την χρήση της, από *AASHO – Road – Test, ORE* και *DB AG*. Η αποτίμηση με την 2^η ή 4^η δύναμη, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για κάθε περιοχή θα συμπεριλαμβάνει την συμπίεση του έρματος, την διατομή της σιδ/χίας σε ότι αφορά στην επιδομή, την επιφάνεια έδρασης των στρωτήρων, την απόσταση των στρωτήρων και σε μεγάλο βαθμό την ελαστικότητα (μέτρο ακαμψίας) της επιδομής.

Για παράδειγμα από μια δημοσίευση του καθηγητή κ. *J. Eisenmann* [10] για αποτίμηση της επίδρασης ενός φορτίου σε διαφορετικούς τύπους επιδομής αποδεικνύεται ότι ο διπλασιασμός του ρυθμού συντήρησης της γραμμής που επετεύχθη στους DB μετά την χρήση βαριάς επιδομής (σιδ/χίες UIC 60 και στρωτήρες B 70 αντικατέστησαν τις σιδ/χίες S49 και στρωτήρες B 58) συμφωνεί ακριβώς με την 4^η δύναμη.

Η συνεχής στατική συμπίεση του έρματος υπολογίζεται με την μέθοδο *Zimmermann* και την χρήση της γραμμής επιρροής της σιδ/χίας. Σε περιπτώσεις φορέων οχημάτων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η αμοιβαία επίδραση των αξόνων. Η ερευνά γίνεται για τους παρακάτω τύπους επιδομής :

→ UIC 60 , B70 (2,6m , 304 Kg) $\alpha=600$ mm

→ UIC 60 , B90 (2,6m , 332 Kg) $\alpha=600$ mm

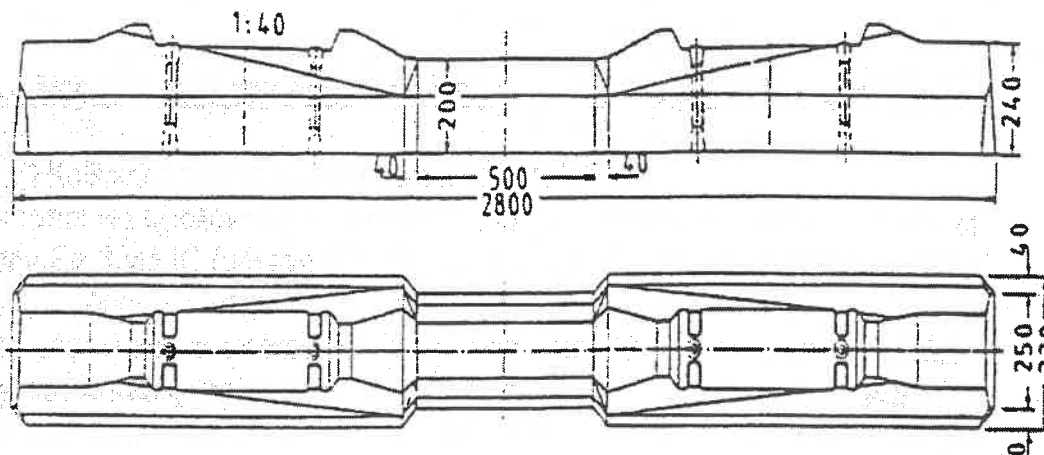
→ UIC 60 , B75 (2,8m , 380 Kg) $\alpha=650$ mm

→ S(180) , B70 (2,6m) $\alpha=600$ mm

→ S(180) , B75 (2,8 m) $\alpha= 630$ mm

Η σιδ/χια S(180) είναι τροποποίηση της σιδ/χίας UIC 60 με φαρδύτερο πέλμα (180 mm) το οποίο επιτρέπει την χρησιμοποίηση μεγάλης ελαστικότητας ελαστικό υπόθεμα κάτω από την σιδ/χια με σκοπό την μείωση συμπίεσης του έρματος. Οι χρησιμοποιούμενοι στρωτήρες B70 (τυπικός κανονικός στρωτήρας

από το 1970), B 90 και B75 (βλέπε εικ. 26) έχουν γίνει αποδεκτοί από τους DB AG. [11]



εικ. 26 Στρωτήρας B75 (Spannbetonschwelle)

πηγή [7]

2.9.4 Αποτίμηση με την εκθετική μέθοδο των διαφόρων τύπων επιδομής

Κάνουμε αναφορά σε δυο τύπους σιδηροδρομικής γραμμής, σε καθαρά επιβατική κυκλοφορία με IC και ICE και μικτή κυκλοφορία συρμών (επιβατικούς και εμπορικούς)

→ Καθαρά επιβατική κυκλοφορία με IC και ICE.

Οι τύποι για αξιολόγηση της μεταβολής κατάστασης της γραμμής είναι:

► IC → Lok BR 103 + 11 IC-Wagen

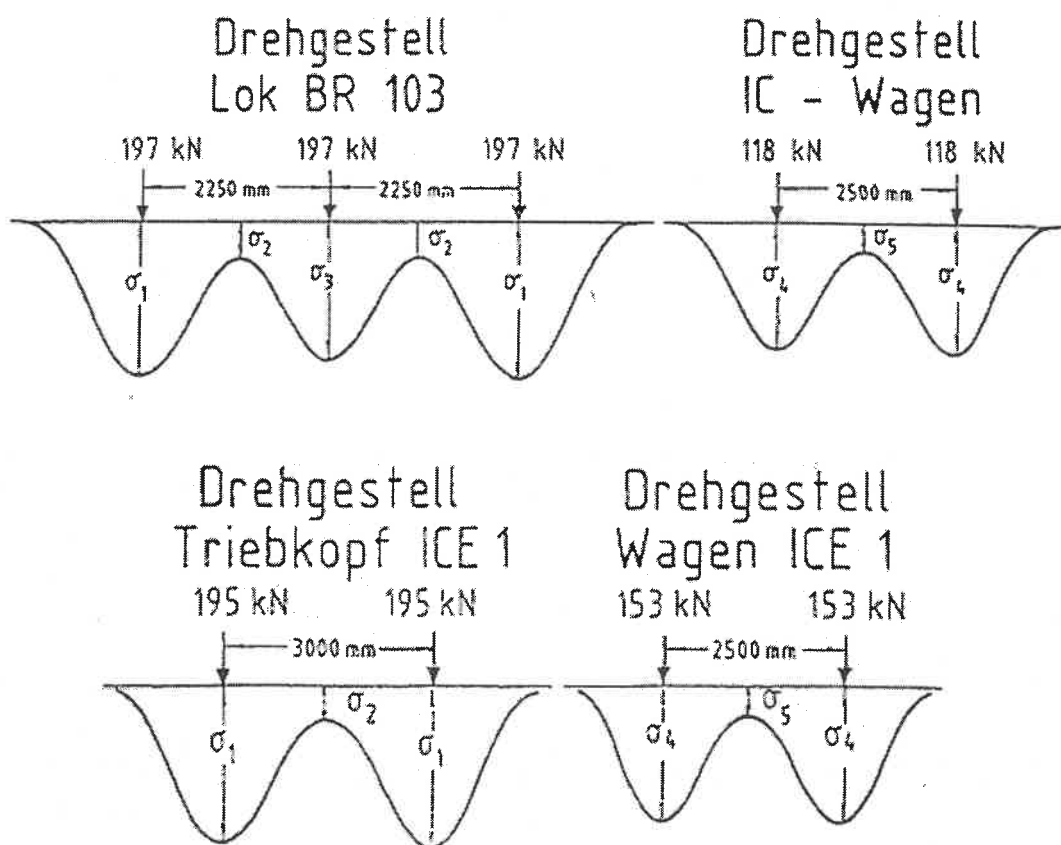
$$\theta = 2 \cdot [\sigma_1^X + (\sigma_1 - \sigma_2)^X + (\sigma_3 - \sigma_2)^X] + 2 \cdot 11 \cdot [\sigma_4^X + (\sigma_4 - \sigma_5)^X] \quad [2.8.4.1]$$

► ICE → 2 μηχανές + 12 βαγόνια

$$\theta = 2 \cdot 2 \cdot [\sigma_1^X + (\sigma_1 - \sigma_2)^X] + 2 \cdot 12 \cdot [\sigma_4^X + (\sigma_4 - \sigma_5)^X] \quad [2.8.4.2]$$

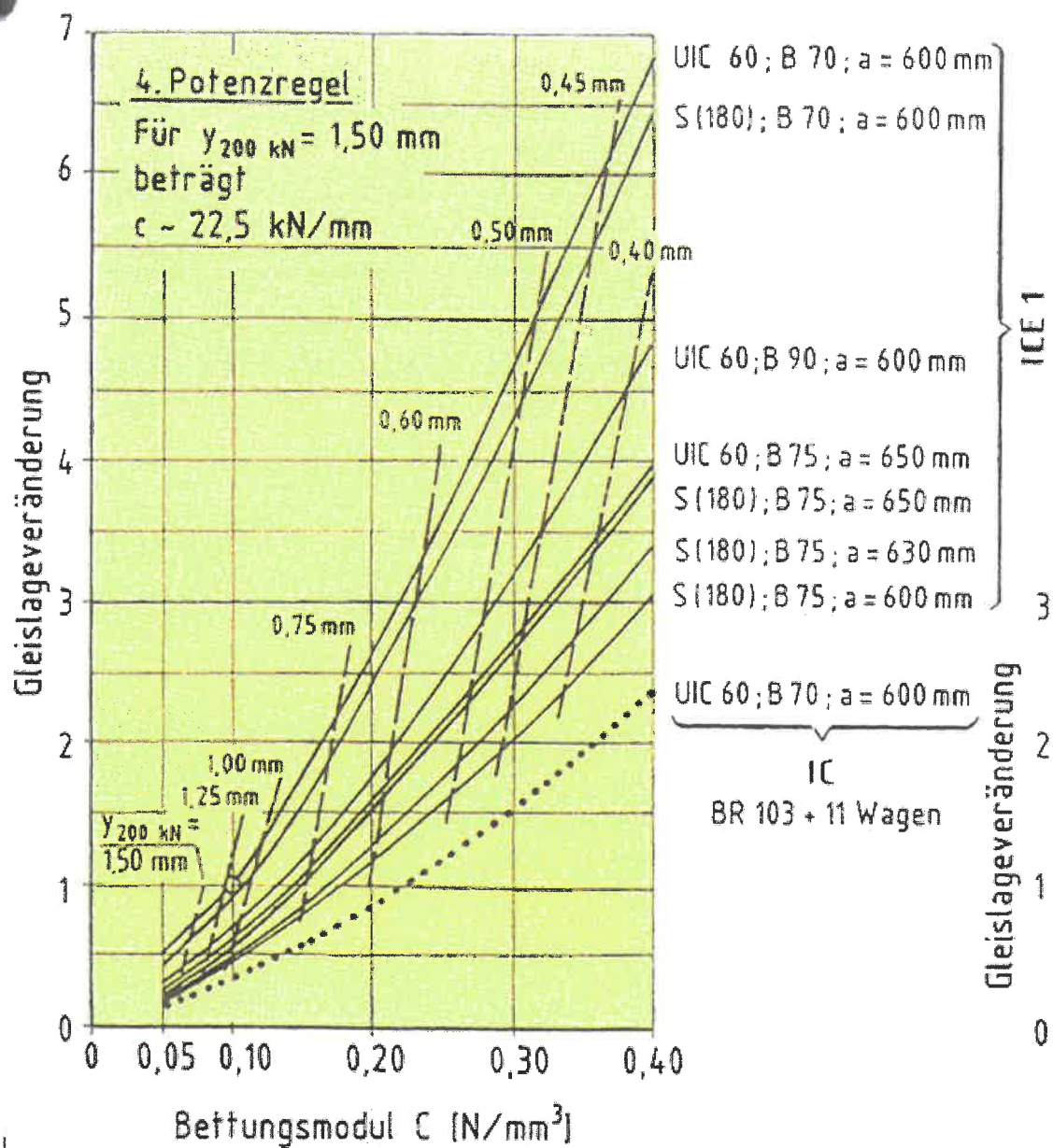
για IC (μηχανή BR 103 και 11 βαγόνια) και ICE (αυτοκινητάμαξες με δυο μηχανές εμπρός - πίσω και 12 βαγόνια στο μέσο).

Όπου $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$ είναι οι πιέσεις που δέχεται η κλίνη του έρματος από τα φορεία των συρμών ανάλογα με τα φορτία που ασκούνται από τις μηχανές και τα βαγόνια χωριστά για την κάθε περίπτωση συρμού (με δυο άξονες ένας μπροστά και ένας πίσω) και χ η δύναμη ανάλογα υψωμένη στη 2^η ή 4^η (βλέπε εικ. 27).

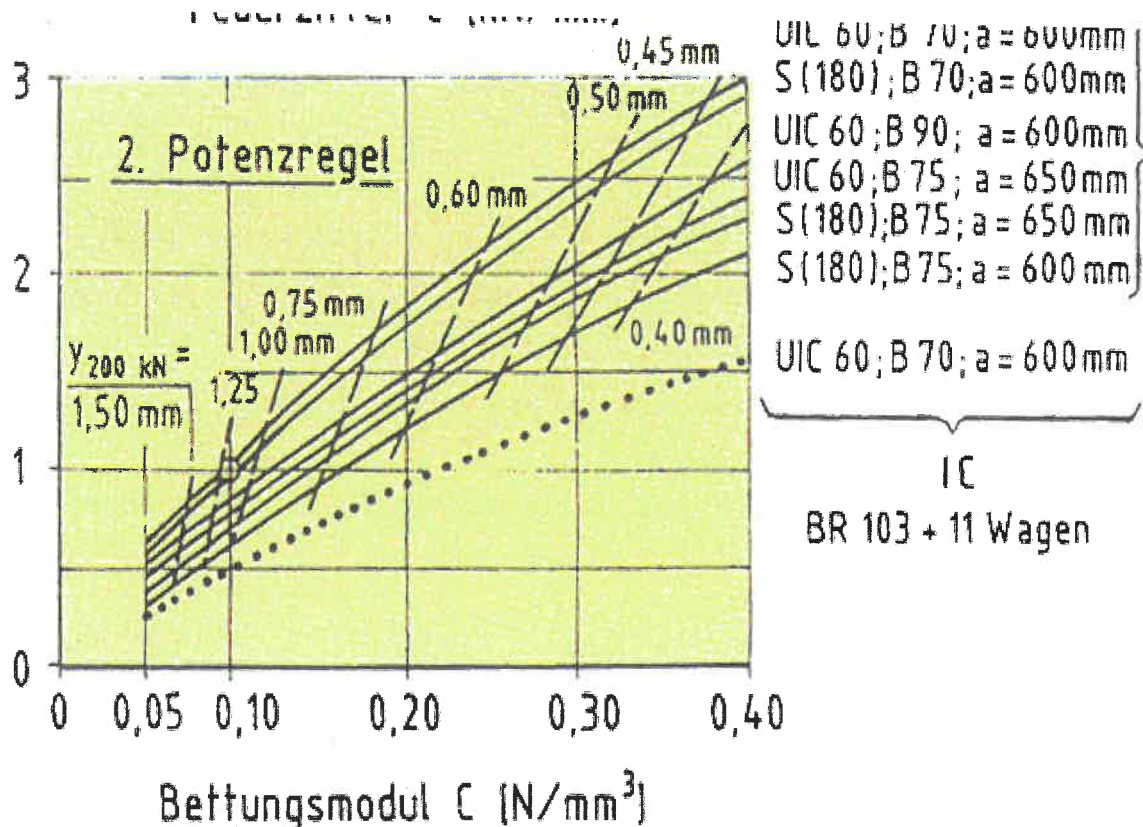


εικ. 27 πιέσεις των IC και ICE αντίστοιχα στην κλίνη έρματος πηγή ETR 3/97

Στα διαγράμματα 11 και 12 δίδονται τα αποτελέσματα του υπολογισμού των σχετικών μεταβολών της κατάστασης της γραμμής (κανονική επιδομή UIC60, B70, μέτρο ακαμψίας $C=0,10 \text{ N/mm}^3$) με την 2^η και 4^η δύναμη λόγο ICE και για τους δυο συρμούς ελήφθη υπόψη ίδια μέση αξονική δύναμη. Επίσης δίδεται επί προσθέτως (διακεκομμένη γραμμή) και η βύθιση της σιδ/χιας από την επίδραση μεμονωμένου φορτίου τροχού 200 KN/αξ.



Διαγρ. 11 Μεταβολή της κατάστασης της γραμμής με 4^η δόναμη πηγή ETR 3/97



Διάγραμμα 12 Μεταβολή της κατάστασης της γραμμής με 2^η δύναμη
πηγή ETR3/97

Οι καμπύλες της σχετικής μεταβολής της κατάστασης της γραμμής οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

Με την αύξηση του μέτρου ακαμψίας αυξάνει και η μεταβολή της κατάστασης της γραμμής έντονα με την χρήση της 4^{ης} δύναμης και ήπια με χρήση της 2^{ης} δύναμης. Σε μέτρο ακαμψίας $C=0,30 \text{ N/mm}^3$, που είναι αντιπροσωπευτικό των νέων γραμμών επί επιχώματος (UIC 60, B 70, $a=600 \text{ mm}$), η κατάσταση της γραμμής υπό την επίδραση ICE σε σχέση με τα μεγαλύτερα τμήματα των παλαιών γραμμών που έχουν μέτρο ακαμψίας από $0,10 \text{ N/mm}^3$ μεταβάλλεται τάχιστα ήτοι με την χρησιμοποίηση της 4^{ης} δύναμης κατά τον παράγοντα 4,7 και της 2^{ης} δύναμης κατά τον παράγοντα 2,4. Για IC έχουμε τους παράγοντες 4,1 και 2,5 αντίστοιχα. Η βύθιση της σιδ/χίας από 1,2 mm μειώνεται στα 0,5 mm περίπου (αξονικό φορτίο 200kN).

Για τα IC σε σχέση με ICE (για την ίδια γραμμή) η μεταβολή της κατάστασης της γραμμής, ανεξάρτητα από το μέτρο ακαμψίας, επιβραδύνεται κατά τον παράγοντα 0,35 για χρήση της 4^{ης} δύναμης και 0,52 για χρήση της 2^{ης} δύναμης. Οι τιμές αυτές έχουν επαληθευτεί και στην πράξη από τον TGV. Εάν στις νέες γραμμές, από την χρησιμοποίηση ελαστικότερου συνδέσμου, επιτευχθεί μέτρο ακαμψίας $0,10 \text{ KN/mm}^3$ που αντιστοιχεί σε συντελεστή ελαστικότητας περίπου 35 KN/mm και χρησιμοποιηθεί επιδομή με B90 ($a=600\text{mm}$) ή B75 ($a=650\text{mm}$) και σιδ/χίες UIC 60, έχουμε από την χρήση της

4^η δύναμης σε σύγκριση IC και επιδομής κανονικής (UIC 60, B70, $\alpha=600\text{mm}$, $C=0,10\text{ N/mm}^3$) μειωτικό παράγοντα 1,8 ή 1,6 επιβράδυνσης της επιδείνωσης της κατάστασης της γραμμής και από την χρήση της 2^{ης} δύναμης 1,6 ή 1,5. Από αυτό διαφαίνεται ότι παρά την αρκετά μικρή τιμή του μέτρου ακαμψίας και την χρησιμοποίηση μεγαλύτερου μήκους στρωτήρα έναντι της κανονικής επιδομής και IC αντί ICE αναμένεται μειωτικός παράγων (μέση τιμή) 1,6 επιβράδυνση της επιδείνωσης της γραμμής.

Η χρησιμοποίηση του στρωτήρα με ακόμα μεγαλύτερη επιφάνεια έδρασης ώστε να επιτευχθεί η ίδια συμπεριφορά είναι τεχνικά αδύνατον. Μια περίπου όμοια συμπεριφορά μπορεί να επιτευχθεί με παραπέρα μείωση του μέτρου ακαμψίας περίπου $0,05\text{ N/mm}^3$ (συντελεστής ελαστικότητας 19 KN/mm). Η βύθιση των σιδ/χιων στην περίπτωση αυτή, για καταπόνηση από έναν άξονα (200 KN), έχει τιμή 1,8 mm. Για υψηλότερη ταχύτητα, ανάλογα με το δυναμικό συντελεστή ελαστικότητας του ελαστικού υποθέματος, έχουμε βύθιση 1,3 έως 1,5 mm.

Επειδή λόγω χρησιμοποίησως υψηλής ελαστικότητας συνδέσμου μειώνεται η πλαισιακή ακαμψία της εσχάρας γραμμής προς τα πλάγια θα πρέπει για λόγους ασφάλειας να εξετάζεται το ενδεχόμενο οριζόντιων παραμορφώσεων (στρεβλότητα) της γραμμής. Πρέπει να σημειωθεί ότι το *TGV Paris – Lyon* (2 συρμοί με 4 κινητήριες κεφαλές και 16 μεσαία βαγόνια) σε ότι αφορά στην μεταβολή της κατάστασης της γραμμής εκτιμώμενο με την 2^α και 4^η δύναμη εμφανίζει την ίδια συμπεριφορά με το ICE (αποτελέσματα ερευνάς που δεν δημοσιεύθηκαν). [12]

Παρακάτω γίνονται οι υπολογισμοί και εμφανίζονται τα διαγράμματα που προκύπτουν από τα μεγέθη που επηρεάζουν την καταπόνηση της σιδ/χίας σε μια γραμμή είτε για υψηλές ταχύτητες ή συμβατικούς συρμούς. Με την βοήθεια του ελαστικού μήκους ιδεατής γραμμής L μπορεί να ορισθεί η επιρροή του δείκτη αντίδρασης εδάφους, της διατομής της σιδ/χίας (ροπή αδράνειας, ροπή αντίστασης), της απόστασης μεταξύ των στρωτήρων και της ενεργού επιφάνειας έδρασης των στρωτήρων επί της τάσης της σιδ/χίας, επί της βύθισης καθώς και επί της πίεσης έρματος. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του *Zimmermann* μπορεί να εκφραστεί η μεταβολή της πίεσης στο πέλμα της σιδ/χίας, της βύθισης, καθώς και της πίεσης μεταξύ στρωτήρα – έρματος με τους συντελεστές επιρροής που ακολουθούν.

Για τους τύπους του Zimmermann ισχύει:

$$\text{– για την γραμμή κάμψης : } y = \frac{Q}{2 \cdot C \cdot b \cdot L} \cdot \eta \quad [2.8.4.3]$$

$$\text{– για την καμπτική ροπή : } M = \frac{Q \cdot L}{4} \cdot \mu \quad [2.8.4.4]$$

– για την πίεση στην επιφάνεια μεταξύ στρωτήρα και έρματος :

$$p = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot L} \cdot \eta \quad [2.8.4.5]$$

όπου :

$$\eta = e^{-\xi} (\cos \xi + \sin \xi) \quad [2.8.4.6]$$

$$\mu = e^{-\xi} (\cos \xi - \sin \xi) \quad [2.8.4.7]$$

Οι εξισώσεις αυτές για y , M , και p εκφράζουν τις επιδράσεις που δημιουργούνται από μοναδιαίες δυνάμεις σε απόσταση $x = \xi \cdot L$ (έχουμε θέσει $\xi = x/L$) από τα σημεία δράσης τους. Το ελαστικό μήκος L επηρεάζεται σε μεγαλύτερο ποσοστό από τον δείκτη αντίδρασης εδάφους και μάλιστα αντιστρόφως ανάλογα (αυξανόμενου του C το L μειώνεται). Η εξήγηση είναι ότι κάθε στοιχείο της επιδομής αναλαμβάνει με διαφορετικό ποσοστό την μετάδοση και κατανομή της φόρτισης από το διερχόμενο φορτίο. Οι εμφανιζόμενες τάσεις πρέπει να παραλαμβάνονται από τις στρώσεις στρωτήρων – έρματος – προστασίας – υπεδάφους χωρίς υπέρβαση των επιτρεπόμενων ορίων αντοχής. Εάν το υπέδαφος είναι μαλακό, τότε μπορεί να αναλάβει το μεγαλύτερο μέρος των μέγιστων εμφανιζόμενων τάσεων, έτσι ώστε το έρμα και οι στρωτήρες να αποφεύγουν την καταπόνηση αυτή. Συνεπεία, όμως, των ανομοιομορφων καθιζήσεων κάτω από τον στρωτήρα, η σιδ/χια καταπονείται υπερβολικά σε κάμψη. Εάν το υπέδαφος είναι σκληρό, τότε αναλαμβάνουν το έρμα και οι στρωτήρες το μεγαλύτερο μέρος των μέγιστων εμφανιζόμενων τάσεων, επειδή στο υπέδαφος δεν απορροφάται ενέργεια.

Οι τιμές η χαρακτηρίζουν την επιρροή στην κάμψη της γραμμής σε δεδομένη απόσταση από την διερευνούμενη διατομή, ενώ οι τιμές μ ανάλογα με την καμπτική ροπή.

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα :

- στατικό φορτίο τροχού **$Q=100000 \text{ N}$**
- απόσταση μεταξύ των στρωτήρων **$a=650 \text{ mm}$**
- ενεργός επιφάνεια του στρωτήρα κάτω από την μια σιδ/χια είναι

$$F = 2 \cdot b_s = 250000 \text{ mm}^2$$

όπου :

b_s : πλάτος του στρωτήρα [mm]

$\ddot{u}$: απόσταση άξονα σιδ/χιας μέχρι την άκρη (μέτωπο) του στρωτήρα

- μέτρο ελαστικότητας $E = 210000 \text{ N/mm}^2$
- σιδηροτροχιά **S 49**
- διατομή σιδ/χιας (J, W_u) $J = 1819 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ και $W_u = 248 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$
- πλάτος ιδανικού στρωτήρα $b = F/a = 384,6$

Με αυτά τα δεδομένα θα προκύψουν:

a) Τάση στο πέλμα σιδ/χιας :
$$\sigma = \frac{Q \cdot L}{4 \cdot W_u} \quad (\text{N/mm}^2) \quad [2.8.4.8]$$

Μεταβολή της καταπόνησης:
$$\sigma^* = K_\sigma \cdot \sigma \quad [2.8.4.9]$$

b) Βύθιση :
$$y = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} \quad (\text{mm}) \quad [2.8.4.10]$$

Μεταβολή της καταπόνησης :
$$y^* = K_y \cdot y \quad [2.8.4.11]$$

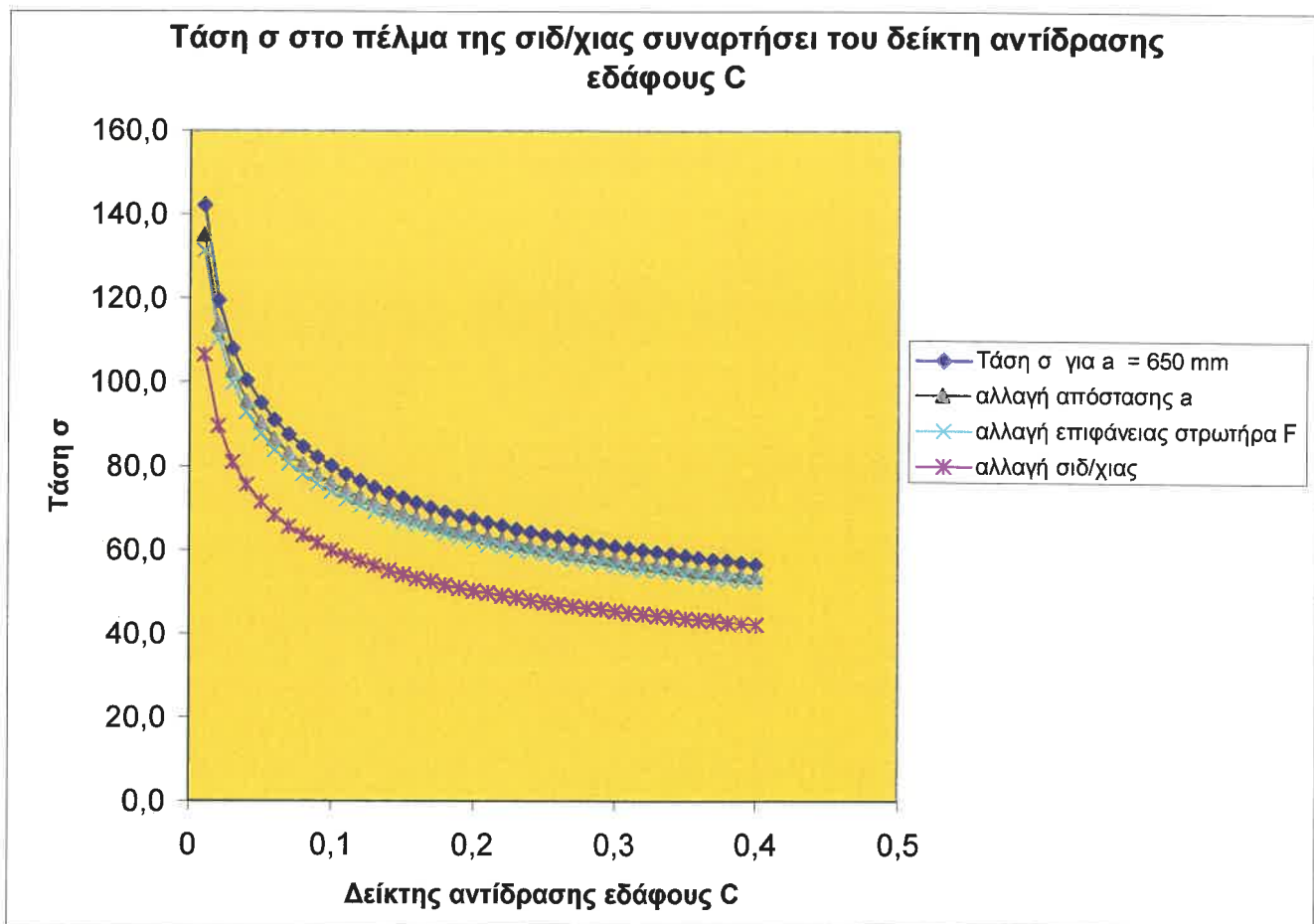
c) Πίεση στρωτήρα – έρμα :
$$p = y \cdot C \quad (\text{N/mm}^2) \quad [2.8.4.12]$$

Μεταβολή της καταπόνησης :
$$p^* = K_p \cdot p \quad [2.8.4.13]$$

**(Οι παράμετροι που φέρουν αστερίσκο αντιστοιχούν στις μεταβολές)*

Όποτε με βάση τους τύπους αυτούς εμφανίζονται τα διαγράμματα :

- Τάση σ στο πέλμα της σιδ/χιας σ συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C (διάγραμμα 13)
- Βύθιση y του στρωτήρα στο έρμα συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C (διάγραμμα 14)
- Πίεση p στην επιφάνεια κάτω από τον στρωτήρα συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C (διάγραμμα 15)



Διάγραμμα 13 Τάση στο πέλμα σιδ/χιας συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C

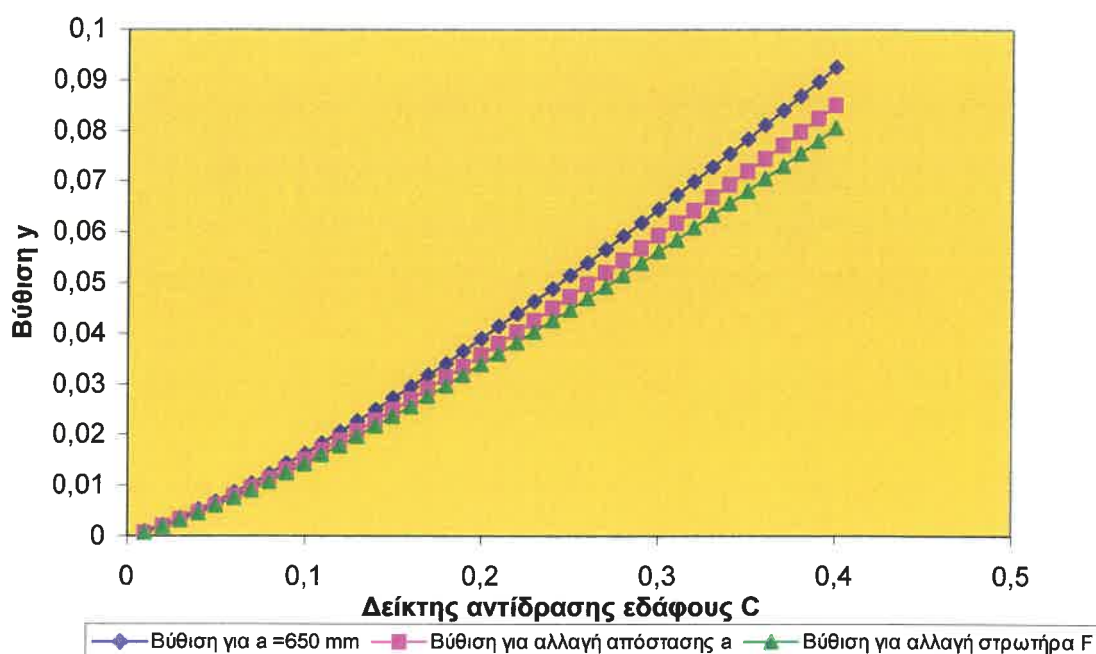
Στην περίπτωση που μεταβάλεται ένα από τα σταθερά δεδομένα που έχουν δοθεί όπως στην περίπτωση της απόστασης a των στρωτήρων ή της ενεργούς επιφάνειας των στρωτήρων F καθώς ακόμη και το είδος της σιδ/χιας (J, W_u) τότε προέρχεται μια μεταβολή η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με τον πίνακα 6 .

Μεταβολές	Kσ	Ky	Kp
C από 0,02 N/mm ³ σε 0,05 N/mm ³	$^4\sqrt{(0,02/0,05)}=0,79$	$^4\sqrt{(0,02/0,05)^3}=0,50$	$^4\sqrt{(0,05/0,02)}=1,25$
J,W από S 49 σε UIC 60	$^4\sqrt{\frac{3055}{1819} \cdot \frac{248}{377}} = 0,75$	$^4\sqrt{\frac{1819}{3055}} = 0,88$	
a από 650 mm σε 580 mm	$^4\sqrt{(580/650)} = 0,97$	$^4\sqrt{\left(\frac{580}{650}\right)^3} = 0,92$	
F από 500000 mm ² σε 600000 mm ²	$^4\sqrt{(5/6)} = 0,96$	$^4\sqrt{\left(\frac{5}{6}\right)^3} = 0,87$	
S 49 : $J = 1819 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$; $W_U = 248 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ UIC 60 : $J = 3055 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$; $W_U = 377 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$			

Πίνακας 6

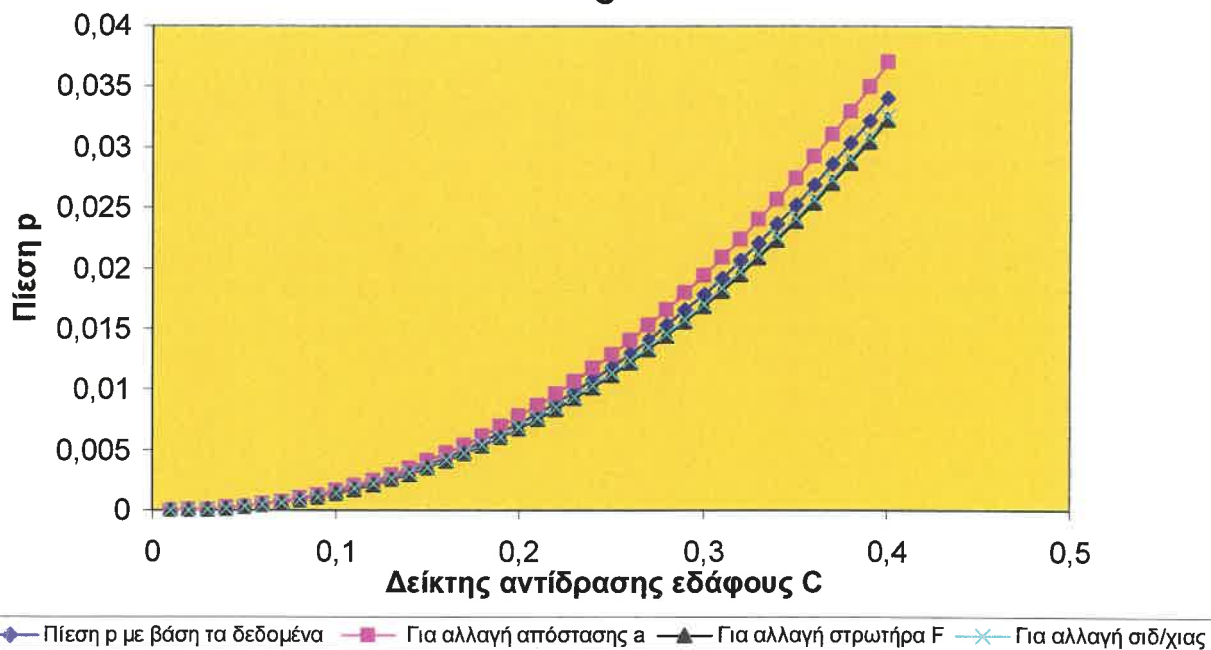
(Οι υπολογισμοί και οι τύποι που χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση βρίσκονται στο παράρτημα)

Βύθιση y συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C



Διαγραμμα 14 Βύθιση y του στρωτήρα στο έρμα συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C

Πίεση p στην επιφάνεια κάτω από τον στρωτήρα σε σχέση με το C



Διάγραμμα 15 Πίεση p στην επιφάνεια κάτω από τον στρωτήρα σε σχέση με τον δείκτη αντίδρασης εδάφους C

Οι τιμές που έχουν βρεθεί είναι οι μέσες τιμές που σημαίνει ότι πρέπει εν συνεχεία να διορθωθούν με βάση μετρήσεις. Ανάλογα δε με τον τύπο του επιμέρους στοιχείου της επιδομής της γραμμής που θα ελεγχθεί (σιδ/χια – στρωτήρας – έρμα – έδαφος) και με βάση την τυπική απόκλιση, s , των μετρήσεων εκτιμώνται οι μέγιστες τιμές των δράσεων που τελικά θα υπεισέλθουν στους υπολογισμούς, ανάλογα με το επιθυμητό διάστημα εμπιστοσύνης. Για παράδειγμα στον υπολογισμό των τάσεων των σιδ/χιων και των δράσεων επί των στρωτήρων κατά κανόνα επιλέγεται διάστημα εμπιστοσύνης 99,7% ($t=3 \text{ sec}$) για το έρμα ανάλογα με την ποιότητα του από $68,3 \div 99,7\% [t= (1\div 3) \text{ sec}]$ ενώ για το έδαφος συνήθως 68,3% ($t=1\text{sec}$).

Από την διερεύνηση επί των αποτελεσμάτων προκύπτουν ότι:

- η μεταβολή της τάσης στο κάτω πέλμα της σιδ/χιας επηρεάζεται κυρίως από την μεταβολή της διατομής (**J,W**) αφού παρατηρείτε ότι για οποιαδήποτε αλλαγή είτε της απόστασης των στρωτήρων ή της επιφάνειας έδρασης, οι μεταβολές στην τάση του πέλματος της σιδ/χιας παρουσιάζουν παρόμοιες ιδιότητες, καθώς σε έδαφος πολύ κακής ποιότητας μέχρι δηλαδή και για $C = 005$ η τάση που δέχεται η σιδ/χια είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση που ασκείται στην σιδ/χια σε υπέδαφος με $C = 0,3$ έως $0,6$ που χαρακτηρίζεται το έδαφος άκαμπτο
- αν όμως οι τιμές του **C**, μεταβληθούν από μια ελάχιστη ($0,05 \text{ KN/mm}^3$) έως μια μέγιστη ($0,35 \text{ KN/mm}^3$) τιμή για τις διάφορες ποιότητες του μέσου εδράσεως, δηλαδή για μέγιστη μεταβολή $\sqrt[4]{(0,35/0,05)} = 1,62$, ενδέχεται αυτή να είναι αποφασιστικής σημασίας για την τάση στην σιδ/χια
- η βύθιση επηρεάζεται περισσότερο από την τιμή **C** και λιγότερο από την απόσταση **a**, μεταξύ των στρωτήρων ή την επιφάνεια εδράσεως των στρωτήρων
- όσο μεγαλύτερος είναι ο δείκτης αντίδρασης εδάφους **C** τόσο μεγαλύτερη είναι και η πίεση που ασκείται στην επιφάνεια έδρασης του στρωτήρα με το έρμα, εφόσον οι δυνάμεις καταπόνησης δεν απορροφούνται από το υπέδαφος, το οποίο αν είναι μαλακό τότε μπορεί να αναλάβει το μεγαλύτερο μέρος των μέγιστων εμφανιζόμενων τάσεων, έτσι ώστε το έρμα και οι στρωτήρες να αποφεύγουν την καταπόνηση αυτή. Συνέπεια, όμως, των ανομοιομορφων καθιζήσεων κάτω από τον στρωτήρα, η σιδ/χια καταπονείται υπερβολικά σε κάμψη
- Για την αναπτυσσόμενη όμως τάση μεταξύ στρωτήρα και έρματος (η οποία έχει σημασία για την εκτίμηση της τάσης στο σώμα του έρματος και της τάσης στο έδαφος) ουσιαστικό ρόλο παίζουν η απόσταση μεταξύ των στρωτήρων και η επιφάνεια έδρασης των στρωτήρων

→ Μικτή κυκλοφορία

Σε μια γραμμή μικτής κυκλοφορίας εκτός από τα επιβατικά τρένα (IC και ICE) επηρεάζουν την κατάσταση της γραμμής και τα εμπορικά, από την ερευνά που έγινα με εμπορικό τρένο 1200t (1 μηχανή και 32 βαγόνια).

Η χρήση της 2^{ης} δύναμης έδειξε ότι η μεταβολή της κατάστασης της γραμμής από ένα εμπορικό τρένο ισοδυναμεί με 2,7 IC (1 εμπορ.=2,7IC) και η χρήση της 4^{ης} δύναμης έδειξε 1 εμπορ. =3,5 IC.

Κατά την εκτίμηση των αποτελεσμάτων της ερευνάς των διαφόρων τύπων επιδομής που έγινε για να διαπιστωθεί η μεταβολή της κατάστασης της γραμμής θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, για την μακρόχρονη καλή διατήρηση της γραμμής, η αναγκαιότητα χρησιμοποίησης συνδέσμων μεγάλης ελαστικότητας σε συνδυασμό με τη μείωση της πλαισιακής ακαμψίας της εσχάρας γραμμής προς τα πλάγια ώστε να αποφευχθούν στρεβλότητες των σιδ/χιων το καλοκαίρι λόγω των πρόσθετων θερμοκρασιών από την εφαρμογή της ειδικής πέδης (*Wirbelstrombremse*). Αναφέρεται, επίσης, ότι σε ευθύγραμμο τμήμα γραμμής υψηλών ταχυτήτων η υπολογιζόμενη κρίσιμη διάφορα θερμοκρασίας 50K μεγαλύτερη από της σιδ/χιας συμπεριλαμβάνοντας και την θερμοκρασία λόγω πέδης, στην πράξη εμφανίζεται αυξημένη κατά 100K χωρίς την πέδη και 120K με την πέδη (K=Kelvin). Η κατάσταση αυτή δημιουργεί τοπικά σφάλματα στη γραμμή όπως κενά κάτω από τον στρωτήρα καθώς και άλλες ατέλειες.

Οι εκτελούμενες έρευνες για επιδομή με χρήση συνδέσμων υψηλής ελαστικότητας (και μείωση της πλαισιακής ακαμψίας έναντι της κλασσικής επιδομής) έδειξαν ότι με τη χρησιμοποίηση σιδ/χιων UIC 60 και βαρείς στρωτήρες B75 ($\alpha=650$ mm) ή B90 ($\alpha=600$ mm) είναι δυνατή η χρήση στη γραμμή της πέδης-*Wirbelstrombremse* χωρίς πρόσθετα μέτρα. Προϋπόθεση γι' αυτό είναι η καλή κατάσταση της γραμμής η οποία απαιτεί μια κανονική (κατά διαστήματα) παρακολούθηση. Εάν αυτό δεν είναι δυνατόν π.χ. λόγω κακής υποδομής τότε είναι αναγκαίο σε κεκλιμένα τμήματα γραμμής ή σε στάσεις να τοποθετηθούν *Sicherungskappen* (παρεμποδίζουν την πλάγια μετατόπιση της γραμμής) ή αγκύρια στρωτήρων. Αυτή η ενίσχυση της επιδομής για αύξηση της εγκάρσιας αντίστασης, πρέπει να εφαρμόζεται και στην περιοχή των βελόνων των αλλαγών τροχιάς καθώς και στις μεταβάσεις σε γέφυρες ($L \geq 25$ m) άνευ συσκευών διαστολής (Σ.Δ.).

Κατά την εκτίμηση της σταθερότητας της γραμμής θα πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη και η αρνητική δύναμη (ανυψωτική δύναμη) στις εδράσεις της σιδ/χιας στην περιοχή προ και μετά την βύθιση (λόγω φορτίου τροχού) της σιδ/χιας. Η τιμή αυτή της ανυψωτικής δύναμης εμφανίζεται μεταξύ 2 αξόνων σε απόσταση 2πL. Για $L=0,7$ έως $0,9$ m αυτό ισοδυναμεί με απόσταση αξόνων 4,4 έως 5,7 m. Για $L=0,9$ m (ελαστική επιδομή) και φορτίο αξονικό 200 KN ή 160 KN η αρνητική ανυψωτική δύναμη στηρίξεων λαμβάνει την μέση τιμή 2,9 KN ή 2,2 KN. Η μέγιστη τιμή, λαμβάνοντας υπόψη την δυναμική καταπόνηση και τις καμπύλες, είναι σχεδόν διπλάσια. Σε αντιστάθμιση αυτής της αρνητικής δύναμης έχουμε το ίδιο βάρος της επιδομής το οποίο είναι B 70= 1,9 KN, B 90=2,1 KN και B 75=2,3 KN περίπου.

Από αυτά συμπεραίνεται ότι μια εσχάρα γραμμής με στρωτήρες B75 ως προς την ευστάθεια της γραμμής, διαθέτει μια προσθετή εξασφάλιση. Έναντι τούτων λόγω της μικρής σχετικά ανύψωσης της εσχάρας μεταξύ της διέλευσης των φορέων, είναι αναμενόμενη μια καλύτερη συμπεριφορά, ως προς την διατήρηση της γραμμής από την επαναλαμβανόμενη κυκλοφοριακή καταπόνηση. [7]

2.10 Έρμα - Χαρακτηριστικά έρματος και ο ρόλος του στην συμπεριφορά της γραμμής

Κατά τη μελέτη για τη διαστασιολόγηση αλλά και την επιλογή των επιμέρους υλικών μιας σιδηροδρομικής γραμμής, τα «αδύνατα σημεία» είναι το έρμα και η υποδομή. Είναι τα στοιχεία της γραμμής που εκδηλώνουν τις παραμένουσες παραμορφώσεις: καθιζήσεις και πλευρικές μετακινήσεις, που συνδέονται άμεσα με τη χειροτέρευση αυτού που λέγεται γεωμετρία της γραμμής, που μπορεί όμως να περιγράψει πολύ πιο χαρακτηριστικά ως ποιότητα της γραμμής. Όσο μικρότερες είναι οι παραμένουσες παραμορφώσεις και όσο πιο αργή μεταβολή στον χρόνο έχουν, τόσο καλύτερη είναι η καταπόνηση της γραμμής.

Επιβάλλεται λοιπόν να μειώσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο την εξέλιξη των καθιζήσεων, κατά πρώτον λόγο, αλλά και των πλευρικών μετακινήσεων. Για δεδομένη ποιότητα σκύρου, όσον αφορά το μέρος των παραμορφώσεων που οφείλονται στο έρμα, αυτό επιτυγχάνεται με ορθό συνδυασμό και χρήση των μηχανημάτων γραμμής (μηχάνημα τακτοποίησης έρματος – ρεγκαλέζα, μηχανήμα υπογόμεωσης έρματος – μπουρέζα, δυναμικός σταθεροποιητής – σταμπιζάτορας).

Για την καταπόνηση του έρματος ορισμένες πανεπιστημιακές βιβλιογραφίες θεωρούσαν ομοιόμορφη κατανομή τάσεων κάτω από τον στρωτήρα και χωρίς περαιτέρω λεπτομέρειες χρησιμοποιούν την μέση πίεση p . Βάση της AASHO δοκιμής για οδούς ισχύει :

(χειροτέρευση της ποιότητας γεωμετρίας γραμμής) = (αύξηση της πίεσης στην κλίνη του σκύρου)^m

όπου $m=3$ έως 4

Για μια 10% υψηλότερη πίεση στο σκύρο οδηγούμεθα σε 1,2 έως 1,5 φορές ταχύτερη χειροτέρευση της γεωμετρίας της γραμμής και αναλογική αύξηση κόστους συντήρησης. [26]

Όμως ερευνητές (UIC, SNCF, ΟΣΕ) αμφισβήτησαν ότι η μέση πίεση είναι αντιπροσωπευτική.

Με βάση τον ORE [14] η μέγιστη ροπή που έχει μετρηθεί επί της γραμμής, προκύπτει από παραβολική κατανομή των πιέσεων. Όμως στη πραγματικότητα η στήριξη των στρωτήρων είναι στήριξη σε σημεία (σημεία επαφής με τους κόκκους του σκύρου) και η προκύπτουσα ανάγκη υπολογισμού της καταπόνησης

ανά κόκκο σκύρου δεν μπορεί να δώσει συγκριτικά αποτελέσματα. Έτσι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η μέση πίεση p όχι ως απόλυτο μέγεθος, αλλά συγκριτικά και σε συνδυασμό με την πιθανότητα που καλύπτει. Έμμεσα με την άποψη αυτή συντάσσεται και ο καθηγητής του Πολυτεχνείου του Μονάχου κ. J. Eisenmann ο οποίος αναφέρει ότι η μέση πίεση είναι μέτρο κρίσης για την καταπόνηση του έρματος. Επί γραμμής δεν υπάρχει ομοιόμορφη έδραση του στρωτήρα στο έρμα, ούτε ομοιόμορφη συμπύκνωση έρματος και εδάφους και εμφανίζονται ατέλειες στην επιφάνεια κύλισης της σιδηροτροχιάς, ατέλειες στους τροχούς κτλ. [16]

Ανυποχώρητη έδραση (π.χ. γέφυρα από σκυρόδεμα, βράχος σε πυθμένα σήραγγας ως υποδομή) με μεγάλα αξονικά φορτία (π.χ. 225 KN) οδηγεί σε ταχύτερη καταστροφή του σκύρου και επομένως σε χειροτέρευση της γεωμετρίας της γραμμής. Σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να προληφθεί το φαινόμενο με τοποθέτηση ελαστικών υποθεμάτων για την εξομάλυνση των πολύ μεγάλων διαφορών ακαμψίας υποδομής κατά τη μετάβαση από επίχωμα σε σήραγγα ή γέφυρα σκυροδέματος. Το σημαντικό όμως είναι ότι ήδη από την εποχή δημοσίευσης των ερευνών το ORE (Office des Recherches et Etudes της UIC) πριν 26 χρόνια, έχει διαπιστωθεί ότι το υλικό των στρωτήρων (ξύλο, beton) δίδει σχεδόν ταυτιζόμενες καθιζήσεις της γραμμής. Επειδή δε η παραμένουσα παραμόρφωση είναι ένα ποσοστό της συνολικής παραμόρφωσης κατά τη διέλευση των φορτίων, συνεπάγεται ότι θα έχουμε περίπου ίδια συμπεριφορά στη χειροτέρευση της γεωμετρίας της γραμμής.

Αξίζει να δώσουμε σε αυτό το σημείο ποιος είναι στην ουσία ο ρόλος του έρματος κάτω από τον στρωτήρα.

Το έρμα κάτω από τον στρωτήρα επιτελεί το εξής έργο:

- Παραλαμβάνει από τους στρωτήρες τα φορτία και τα κατανέμει σε ολόκληρη την κλίνη έρματος.
- Επιτρέπει την αποστράγγιση των υδάτων (είναι διαπερατό)
- Λόγο της ελαστικότητάς του μειώνει τις δυναμικές καταπονήσεις της γραμμής. Η σωστή ελαστικότητα του έρματος επιτυγχάνεται όταν αυτό συμπυκνωθεί κατά 15%. Η ομοιόμορφη και υψηλή συμπύκνωσή του είναι δυνατή μόνον όταν έχουν συμπυκνωθεί κανονικά και οι κατώτερες στρώσεις αυτού (αυτές που βρίσκονται πλησίον της υποδομής).

Το μέτρο ελαστικότητας του έρματος πρέπει να φθάνει $C=150 - 200 \text{ MN/m}^2$

Η τιμή του C μεταβάλλεται ανάλογα με:

- Το είδος του έρματος
- Το πάχος του έρματος
- Τον βαθμό συμπύκνωσής του
- Τον βαθμό ακαμψίας της επιδομής

- Το είδος του στρωτήρα
- Την επιφάνεια έδρασης (ή το μήκος) του στρωτήρα

Στην περίπτωση που έχω στρώση 29 έως 30 cm αμμοχάλικου κάτω από το έρμα, αυτό προσφέρει μικρή επαύξηση της συνολικής ελαστικότητας στην επιδομή [9]. Στον πίνακα 7 που ακολουθεί παρατηρούμε την μεγάλη σημασία που έχει η αύξηση του πάχους του έρματος (ανύψωση) γραμμής, σε περίπτωση κακής υποδομής, σύμφωνα με τους γαλλικούς σιδηρόδρομους.

h (cm)	0	15	20	30	40
α	1	0,7	0,50	0,35	0,25
p/p_0	1	1,4	2	2,85	4

Πίνακας 7

πηγή SNCF

όπου :

p → η τιμή της μέσης πίεσης που ασκείται από ημιστρωτήρα στο έρμα

α = μέση πίεση στο επίπεδο της υποδομής / μέση πίεση στο επίπεδο του ημιστρωτήρα

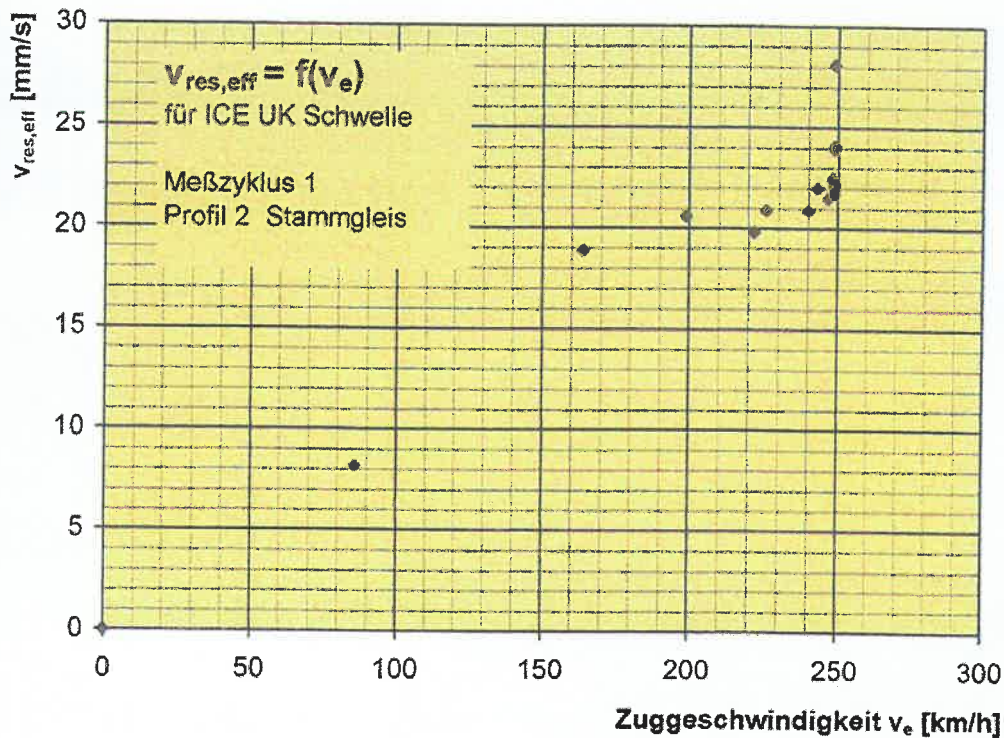
h → το ύψος του έρματος (το πάχος)

Παρατηρούμε την μείωση του μεγέθους α σε σχέση με την αύξηση του πάχους του έρματος, καθώς επίσης και την αύξηση του λόγου του p/p_0 με την αύξηση του πάχους και αυτό γιατί με αρκετά μεγάλο πάχος έρματος περίπου 40 cm οι πιέσεις στο επίπεδο της υποδομής είναι μικρές εφόσον απορροφούνται από την κλίνη έρματος. Γενικά η υποδομή έχει μικρό συντελεστή ελαστικότητας c . Η καθίζησή της επηρεάζεται σημαντικά από την τιμή της μέσης πίεσης p . Η τιμή της μέσης πίεσης είναι μικρή όταν το πάχος του έρματος και των υποστρωμάτων είναι μεγάλο. [15]

2.10.1 Εισαγωγή των δονήσεων (ταλαντώσεων) στο έρμα

Καθοριστική για την καταπόνηση του έρματος είναι η κύρια διατμητική τάση η οποία έχει την μέγιστη τιμή της στον στρωτήρα στη θέση του άξονα του φορτίου και σε βάθος που αναλογεί στο μισό του στρωτήρα, αυτό σημαίνει ότι η φθορά του έρματος, λόγω της μεγάλης καταπόνησης, εμφανίζεται σε βάθος 10 έως 15 cm κάτω από την επιφάνεια έδρασης του στρωτήρα.

Η προκαλούμενη από την επενέργεια των αξονικών φορτίων των γρήγορων τρένων στιγμιαία συμπίεση του έρματος παρουσιάζει ένα καθοριστικό ρόλο των μεταβιβαζόμενων στο έρμα δονήσεων όπως παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα 16 :



Διάγραμμα 16 Απεικόνιση της συνισταμένης πραγματικής δονητικής ταχύτητας με διαφορετικές ταχύτητες συρμών. πηγή ETR 3/97

Όπου:

$V_{res,eff}$ (mm/sec) → πραγματική δονητική ταχύτητα

V_e (km/h) → ταχύτητα συρμών

Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν η ενεργειακή ροή (E), η οποία δίδεται από την συμπίεση του έρματος (σ) και την συνισταμένη της πραγματικής δονητικής ταχύτητας $V_{res,eff}$. Είναι σημαντικό ότι τόσο η συμπίεση του έρματος, όσο και οι δονητικές ταχύτητες είναι, ανάλογα με την κατάσταση της επιδομής, λιγότερο ή περισσότερο διασκορπισμένες από στρωτήρα σε στρωτήρα. Δηλαδή, στην περίπτωση διέλευσης συρμού με ταχύτητα 80 km/h ή 150 km/h, παρατηρούμε διαφορετική συμπεριφορά, όσον αφορά την δονητική ταχύτητα και την συμπίεση του έρματος, χρησιμοποιώντας στρωτήρες, για παράδειγμα, ξύλινους, σε αντίθεση με την διέλευση συρμών με υψηλές ταχύτητες όπως 250 km/h που χρησιμοποιούνται στρωτήρες τύπου B70 ή B90 όπου παρατηρούμε μεγαλύτερες τιμές και λιγότερο διασκορπισμένες, έχουμε δηλαδή

συνεχείς ταλαντώσεις (δονήσεις) λόγω επαναλαμβανόμενης καταπόνησης κλίνης έρματος.

Η διάχυση της συμπίεσης του έρματος σε εξάρτηση από την κατάσταση της γραμμής και την ταχύτητα, μπορεί με την γνωστή σταθερή απόκλιση ή τους συντελεστές παραλλακτικότητας να αξιολογηθεί ποσοτικά. Σε όχι καλή κατάσταση επιδομής η τιμή της μέγιστης συμπίεσης του έρματος μπορεί να διπλασιαστεί. Οι μετρήσεις που έγιναν σε γραμμές κυκλοφορίας της δονητικής ταχύτητας εντός του έρματος έδειξαν ότι σε υψηλές ταχύτητες συρμών (250/280 km/h) οι πραγματικές δονητικές ταχύτητες είχαν τιμές από 20 έως 26 mm/s (διαγρ.16). Αυτό επιβεβαιώθηκε και από εργαστηριακές ερευνητικές μετρήσεις του *Prüfamt für Bau von Landverkehrswegen*.

Σε όλη αυτή την κατάσταση θα πρέπει να συνυπολογιστεί και η ύπαρξη σφαλμάτων στην επιφάνεια της σιδηροτροχιάς τα οποία οδηγούν στο στροβιλισμό μορίων του έρματος. Οι δημιουργημένες από την βλάβη αυτή δονητικές ταχύτητες οδηγούν σε μια τοπική περιορισμένη φθορά του έρματος συνδυασμένη με δημιουργία κενών (σάλτα) κάτω από τους στρωτήρες (βλέπε εικ.13, παράγραφο 2.3).

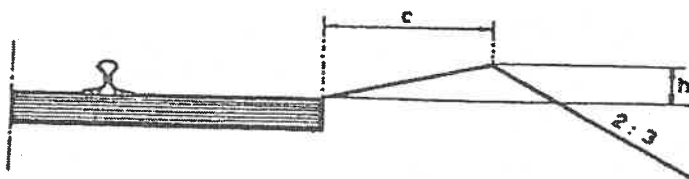
Αυτό μπορεί να αντιμετωπισθεί - αποφευχθεί με λείανση κατά τακτά διαστήματα των σιδ/χιων. [11]

2.10.2 Επιρροή της κοκκομετρικής διαβάθμισης του έρματος

Η μορφή και οι διαστάσεις των σκύρων του έρματος, η κοκκομετρική διαβάθμιση και ο βαθμός σκληρότητας επηρεάζουν σημαντικά την εγκάρσια αντίσταση της γραμμής η οποία παρόλα αυτά παραμένει ίδια ακόμη και σε υψηλές ταχύτητες συρμών. Η εγκάρσια αντίσταση της γραμμής, που εξαρτάται από τον τύπο του στρωτήρα και τις εργασίες συντήρησης της γραμμής, αποτελεί συνισταμένη των τριών παρακάτω συνιστωσών:

- i) αυτής που αναπτύσσεται λόγω δυνάμεων τριβής στην κάτω επιφάνεια του στρωτήρα και είναι ανάλογη με το βάρος του στρωτήρα
- ii) αυτής που αναπτύσσεται λόγω δυνάμεων τριβής ανάμεσα στις πλευρικές επιφάνειες του στρωτήρα και στο έρμα που βρίσκεται μεταξύ των διαδοχικών στρωτήρων. Αυτή η συνιστώσα εξαρτάται από τον βαθμό πληρότητας έρματος στο μεσοδιάστημα μεταξύ στρωτήρων καθώς και από το βαθμό συμπύκνωσης του έρματος. Η πλευρική αυτή συνιστώσα αντιπροσωπεύει περίπου το 40 – 50% της συνολικής αντίστασης στην περίπτωση των ξύλινων στρωτήρων, το 15 - 25% στην περίπτωση των διμερών στρωτήρων από οπλισμένο σκυρόδεμα και το 30% στην περίπτωση των ολόσωμων στρωτήρων από προεντεταμένο σκυρόδεμα.

- iii) αυτής που αναπτύσσεται στα δυο μέτωπα του στρωτήρα και εξαρτάται τόσο από το πλάτος κατάληψης c με έρμα όσο και από το αν δοθεί στο έρμα υπερύψωση. (βλέπε εικ. 28)

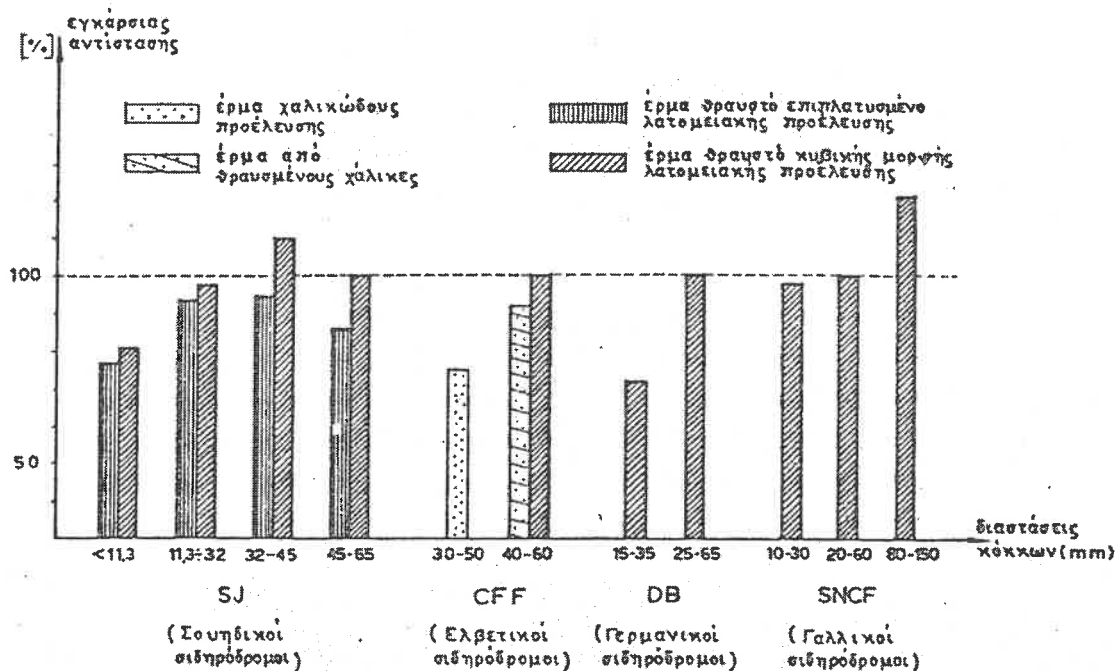


εικ. 28 Κεφαλή στρωτήρα και πλάτος κατάληψης c

πηγή [1]

Στην εικ. 28 δίνεται το πλάτος κατάληψης $c = 40$ m για την περίπτωση των συμβατικών γραμμών και ειδικά στην περίπτωση του ΟΣΕ, ενώ για γραμμές υψηλών ταχυτήτων δεν υπάρχει πραινές, όπως την εικ.26, αλλά το πλάτος κατάληψης είναι σε ευθεία στο ύψος της γραμμής

Στο διάγραμμα 17 που ακολουθεί παρατηρούμε την επιρροή της κοκκομετρικής διαβάθμισης του έρματος στην εγκάρσια αντίσταση της γραμμής σε διάφορες χώρες.



Διαγρ. 17 Η επιρροή της κοκκομετρικής διαβάθμισης του έρματος στην εγκάρσια αντίσταση της γραμμής

πηγή [1]

Παρατηρείται ότι όσο μικρότερες είναι οι διαστάσεις των κόκκων, στην περίπτωση για παράδειγμα των Γερμανικών Σιδ/μων, όπου το έρμα είναι θραυστό κυβικής μορφής λατομειακής προέλευσης τόσο μικρότερη είναι και η

τιμή της εγκάρσιας αντίστασης, ενώ για πολύ μεγάλες τιμές των διαστάσεων των κόκκων παρουσιάζονται τιμές που ξεπερνούν το 100% της εγκάρσιας αντίστασης όπως συμβαίνει στους Γαλλικούς Σιδ/μους.

Είναι δεδομένο ότι τα ξένα προηγμένα δίκτυα, χρησιμοποιούν σκληρά σκύρα: Από τις εκθέσεις της επιτροπής μηχανικών του ΟΣΕ [15] αλλά και τον κανονισμό των σκύρων των SNCF προκύπτει ότι οι Γαλλικοί Σιδ/μοι χρησιμοποιούν εκρηξιγενή και μεταμορφωσιγενή σκύρα ($DR_i \geq 14$ για συντήρηση και $DR_i \geq 15$ για νέες γραμμές)², για δε αποδοχή λατομείων προμήθειας σκύρων απαιτούν $DRG \geq 17$ όπου είναι και η επικρατέστερη τιμή για γραμμές TGV. [21] Ο Schramm ήδη από το 1961 αναφέρει ότι οι Γερμανικοί Σιδ/μοι (DB) δεν χρησιμοποιούν καθόλου ασβεστολιθικό σκύρο αλλά σκληρά αδρανή. [27]

Οι Αγγλικοί Σιδ/μοι αντιμετώπιζαν μεγάλα προβλήματα σε γραμμές υψηλών ταχυτήτων με ασβεστολιθικό σκύρο. Η Fiche UIC 719R προδιαγράφει για την ανώτερη στρώση της έδρασης της γραμμής, υλικό σκληρότητας $DR_i = 12$.

Από αυτό προκύπτει έμμεσα αλλά σαφέστατα ότι για το σκύρο πρέπει να χρησιμοποιείται υλικό με $DR_i \geq 12$.

Σε επίσκεψη στον ΟΣΕ Βέλγων μηχανικών των SNCF και της *Transurb Consult*, που διδάξαν σε σεμινάριο, δηλώθηκε ότι χρησιμοποιούνται σκύρα με $DRG \geq 17$, ήδη δε για τις νέες γραμμές υψηλών ταχυτήτων οι κανονισμοί θα προβλέπουν $DRG \geq 20$. Τα ασβεστολιθικά σκύρα σκληρότητας 12 έως 14 που διαθέτουν στρώνονται σε δευτερεύουσες γραμμές σταθμών και βιομηχανικές συνδέσεις $V \leq 40$ km/h.

Είναι προφανές, λοιπόν, ότι η πίεση στην επιφάνεια επαφής στρωτήρα-σκύρου, τουλάχιστον για τα σημερινά δεδομένα, βρίσκεται σε επίπεδα που επιβάλλει, χρησιμοποίηση σκληρού σκύρου για γραμμές υψηλών ταχυτήτων. Η χειροτέρευση της ποιότητας της γραμμής που έρχεται σαν αποτέλεσμα της αυξημένης πίεσης είναι ανεξάρτητη του είδους του χρησιμοποιούμενου υλικού για την κατασκευή του στρωτήρα. Μόνο η υπογομωσιμότητα του σκύρου σε συνάρτηση με την παρέλευση του χρόνου φαίνεται να εξαρτάται από το υλικό κατασκευής του στρωτήρα. [21]

²όπου **Dri** είναι η στιγμιαία σκληρότητα ενός δείγματος και **DRG** είναι η συνολική σκληρότητα, που προκύπτει «στατιστικά» από πολλά δείγματα.

2.11 Είδη φορτίσεων στο σύστημα στρωτήρα – σιδηροτροχιά

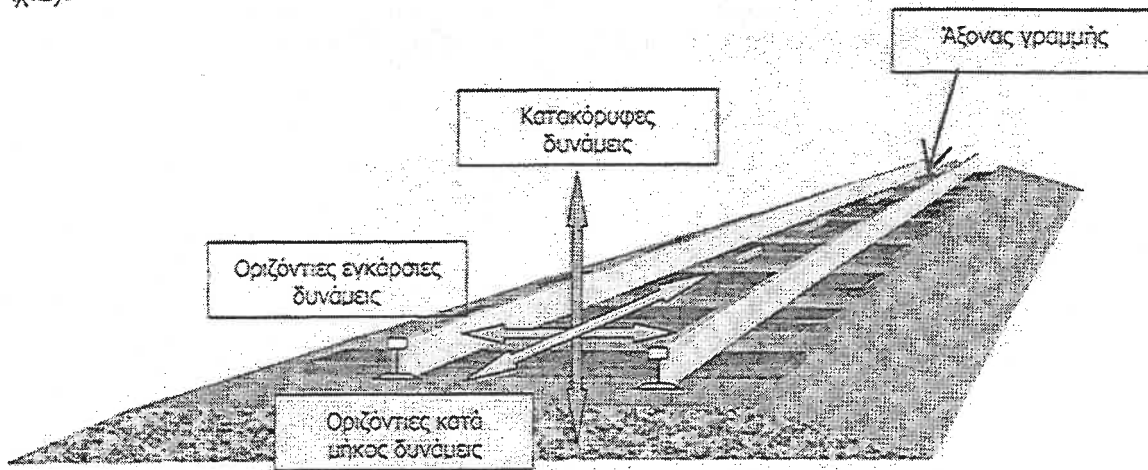
Η εκτίμηση της ασφάλειας κάθε κατασκευής εξαρτάται από τις αβεβαιότητες των διάφορων παραγόντων που υπεισέρχονται στη μελέτη και τη διαδικασία της ίδιας της κατασκευής του κάθε έργου. Η εκδήλωση της αστοχίας θα εξαρτηθεί από την πιθανότητα εμφάνισης των τιμών των διάφορων παραγόντων αλλά και από την πιθανότητα συνδυασμού τους. Η διέλευση συρμών είναι τυχαίο δυναμικό φαινόμενο και ανάλογα με τις συχνότητες των δράσεων που επιβάλλει, υπάρχει η αντίστοιχη απόκριση της επιδομής της γραμμής. Κατά την στιγμή της διέλευσης ενός άξονα, από την θέση ενός στρωτήρα, εξασκείται στον στρωτήρα ένα συνολικό τυχαία δυναμικό φορτίο. Η θεωρητική προσέγγιση για τον – κατά το δυνατό – ακριβέστερο προσδιορισμό της πιθανής τιμής του, επιβάλλει ανάλυση του συνολικού φορτίου σε επιμέρους φορτίσεις – δράσεις που σε γενικές γραμμές μπορούν να αναλυθούν σε

- στατική φόρτιση
- δυναμική φόρτιση

Ο όρος στατική φόρτιση ενός στρωτήρα, με την κλασσική έννοια, είναι το φορτίο που αναλαμβάνει ο στρωτήρας όταν ένας ακίνητος άξονας οχήματος βρίσκεται επί της θέσης του στρωτήρα.

Στην περίπτωση δυναμικής φόρτισης, εννοούμε το γεγονός ότι η φόρτιση αυτή της γραμμής εξαρτάται, αφ' ενός μεν από τα μηχανικά χαρακτηριστικά (ακαμψίες, αποσβέσεις) του συστήματος «όχημα – γραμμή» αφ' ετέρου δε από τη διέγερση που προκαλεί η κίνηση του οχήματος επί της γραμμής.

Κατά την κίνηση των συρμών επί τις σιδηροτροχιές δρουν, όπως είναι γνωστό, τόσο κατακόρυφες όσο και οριζόντιες δυνάμεις (εγκάρσιες και διαμήκεις με την γραμμή) (βλέπε εικ. 29)



εικ.29 Δυνάμεις στην επιδομή

πηγή [44]

Οι κατακόρυφες δυνάμεις τροχού που φορτίζουν την γραμμή, συντίθενται από τις ακόλουθες επί μέρους τιμές:

$$Q_{\text{tot}} = Q_{\text{stat}} + \Delta Q_{\text{stat},y} + \Delta Q_{\text{stat},w} + Q_{\text{dyn}} \quad [2.10.1]$$

ΠΟΥ:

Q_{tot} = το συνολικό φορτίο τροχού

Q_{stat} = το φορτίο τροχού σύμφωνα με τον τύπο συρμού και τον κανονισμό φορτίσεως (χωρίς επαυξήσεις).

$\Delta Q_{\text{stat},y}$ = προσθετή επιπρόσθεση τροχού σε καμπύλες λόγω φυγόκεντρης επιτάχυνσης που φορτίζει το όχημα εξαιτίας ανεπάρκειας υπερύψωσης.

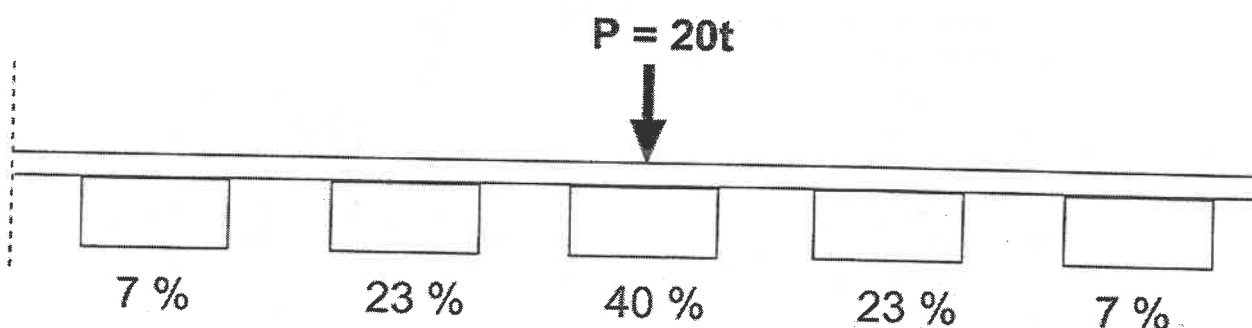
$\Delta Q_{\text{stat},w}$ = προσθετή κατακόρυφη επιπρόσθεση τροχού λόγω πλευρικής ανεμοπίεσης.

Q_{dyn} = πρόσθετο φορτίο τροχού λόγω δυναμικών φαινομένων κατά την κίνηση του συρμού.

Οι τιμές $\Delta Q_{\text{stat},y}$ και $\Delta Q_{\text{stat},w}$ καλούνται συνήθως **ημιστατικά φορτία**. [18]

2.11.1 Υπολογισμός φορτίου για την διαστασιολόγηση επιδομής

Θεωρητικά η κατανομή του φορτίου ενός τροχού, όταν αυτός εισέρχεται επάνω στον στρωτήρα, είναι κατά 50% στον στρωτήρα που πατά και κατά 25% στους δυο εκατέρωθεν στρωτήρες, έχει όμως διαπιστωθεί στην πράξη ότι η κατανομή του φορτίου γίνεται σε 5 στρωτήρες ήτοι 40% στον στρωτήρα που πατά ο τροχός, 2 x 23% στους διπλανούς του και 2 x 7% στους εκατέρωθεν επόμενους δύο (βλέπε εικ. 30). [28] Η διαστασιολόγηση της επιδομής γίνεται με την κατά UIC φόρτιση 71(UIC) καλύπτοντας όλες τις περιπτώσεις συρμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα «τροχός – σιδ/χια – στρωτήρας – έρμα – υποδομή» έχει ιδιοσυχνότητα 50 ~ 80 Hz. Όταν έχουμε εξωτερική καταπόνηση χαμηλής συχνότητας η σιδηροτροχιά «προλαβαίνει» να παραμορφωθεί και να κατανείμει τα φορτία και στους γειτονικούς στρωτήρες. Αν όμως η εξωτερική καταπόνηση έχει συχνότητα μεγάλη (>50 Hz) η σιδ/χια «δεν προλαβαίνει» να καμφθεί, δεν κατανέμει το φορτίο σε περισσότερους στρωτήρες και ο στρωτήρας που βρίσκεται ακριβώς κάτω από τον τροχό (φορτίο) καταπονείται κρουστικά (με σοκ), αναλαμβάνει μόνος του σχεδόν όλη τη δυναμική προσαύξηση του φορτίου και ρηγματώνεται ή σπάει. Παραλαμβάνεται, δηλαδή στο όριο, η δύναμη εξ ολόκληρου από έναν στρωτήρα, με μόνη απόσβεση αυτή που κάνει το ελαστικό υπόθεμα.



εικ. 30 Κατανομή φορτίο τροχού στους στρωτήρες

πηγή [28]

Σε χαμηλή συχνότητα, η αντίδραση του στρωτήρα είναι ένα ποσοστό του φορτίου του τροχού, που – με την δυναμική προσαύξηση που αναλαμβάνει – κατανέμεται λόγω ελαστικής παραμόρφωσης (κάμψης) της γραμμής. Για την κάλυψη και των δυναμικών φορτίων τροχού γίνεται επαύξηση του στατικού φορτίου του τροχού κατά 50% για $V=300$ Km/h, 55% για $V=250$ Km/h και 75% στα 200 Km/h. Με την επαύξηση αυτή παρέχεται στατιστική εξασφάλιση $P=99,7\%$. Αν η προσαύξηση ξεπερνά το 100% τότε, στις καμπύλες, ο απέναντι τροχός αποφορτίζεται πλήρως οπότε έχουμε εν δυνάμει εκτροχίαση. Δηλαδή, στην προκείμενη περίπτωση, με συντελεστή προσαύξησης 50% για υψηλές ταχύτητες, σημαίνει ότι στον απέναντι τροχό παραμένει το άλλο 50% του στατικού φορτίου. Έτσι όσο πιο μικρότερες είναι οι ταχύτητες των συρμών τόσο έχει το περιθώριο να μειωθεί αυτός ο συντελεστής προσαύξησης. Με συντελεστή,

λοιπόν προσαύξησης 0,75 μέχρι και για ταχύτητες $V=200 \text{ Km/h}$, το 25% του στατικού φορτίου παραμένει στον απέναντι τροχό.

Όμως, το ποσοστό αυτό, 25%, που είναι ουσιαστικά στο όριο του περιθωρίου ασφάλειας σε περίπτωση εκτροχίασης ($0,2 \div 0,25$), είναι αρκετό για ταχύτητα μέχρι 200 Km/h και όπως προαναφέραμε πολύ μεγαλύτερο για υψηλές ταχύτητες. Για το λόγο αυτόν, οι SNCF, στο TGV, χαμήλωσαν το κέντρο βάρους των οχημάτων στο $1,00 \div 1,20 \text{ m}$, από $1,5 \text{ m}$ που ήταν πριν. Ο συντελεστής αυτός προσαύξησης εξαρτάται από το τροχαίο υλικό και την απόσβεση της δευτερεύουσας ανάρτησής του, όπως και από την ποιότητα της γεωμετρίας της γραμμής (μήκος κύματος σφαλμάτων περιλαμβανόμενο μεταξύ π.χ. 20 m και 5 m που καταγράφει το καταγραφικό όχημα σφαλμάτων γραμμής *-Mauzin-* των SNCF). [19]

Για την μετατόπιση της δύναμης του τροχού σε καμπύλη επαυξάνεται το φορτίο αυτού κατά 20% και για εφαρμογή απόφασης του ΟΣΕ περαιτέρω επαύξηση κατά 25% και έτσι το τελικό φορτίο του τροχού Q γίνεται:

$$Q = 1.45 \times 1,20 \times 1,25 = 2,16Q \quad [2.10.1.1]$$

Ο αναλυτικός υπολογισμός του συνολικού φορτίου καταπόνησης της γραμμής γίνεται ως εξής:

1. Από το αξονικό στατικό φορτίο P (t /άξονα) έχουμε το στατικό φορτίο του τροχού $Q = P/2$.
2. Λόγω μη εξισορρόπησης των φυγοκέντρων δυνάμεων στις καμπύλες αυξάνεται το στατικό φορτίο του τροχού κατά $\Delta Q = 20\%$

$$Q_{\text{ενεργ.}} = (1 + 0,20) Q = 1,20 Q \quad [2.10.1.2]$$

3. Επί πλέον λαμβάνονται υπ' όψιν και δυναμικές μεταβολές του στατικού φορτίου του τροχού οφειλόμενες σε ανισοεπιπεδότητα της επιφάνειας κύλισης της σιδ/χιας, των τροχών κλπ. Για να έχουμε μια στατιστική εξασφάλιση της τάξεως του 99,7% λαμβάνεται ακόμη υπ' όψιν και ο τριπλάσιος συντελεστής μεταβλητότητας S και έχουμε:

$$Q_{\text{max}} = [1 + (3 \times S)] Q_{\text{ενεργ.}} \quad [2.10.1.3]$$

$$\text{όπου: } S = \beta \times \varphi \quad [2.10.1.4]$$

(β = συντελεστής κατάστασης της επιδομής)

(φ = συντελεστής δυναμικής καταπόνησης από την ταχύτητα)

- Για γραμμή σε πολύ καλή κατάσταση $\beta = 0,10$

- Για ταχύτητα $V=300 \text{ Km/h}$, η τιμή του φ είναι

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{380} = 1,63 \quad [2.10.1.5]$$

- Για ταχύτητες $60 < V < 200 \text{ Km/h}$,

και για π.χ. $V=160 \text{ Km/h}$, το φ γίνεται

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{140} = 1,71 \quad [2.10.1.6]$$

- Για ταχύτητες $V < 60 \text{ Km/h}$

$$\varphi = 1$$

- Για εμπορευματικούς συρμούς ισχύει

$$\varphi = 1 + \frac{V - 60}{160} \quad [2.10.1.7]$$

Μετά τα παραπάνω αναφερόμενα το μέγιστο συνολικό φορτίο του τροχού, γίνεται:

-Για $V=300 \text{ Km/h}$

$$Q_{\max} = [1 + (3 \times 0,10 \times 1,63)] Q_{\text{ενεργ.}} = 1,48 \times 1,20 \times Q = 1,77 Q \quad [2.10.1.8]$$

και

-Για $V=160 \text{ Km/h}$

$$Q_{\max} = [1 + (3 \times 0,10 \times 1,71)] Q_{\text{ενεργ}}, = 1,51 \times 1,20 \times Q = 1,81 Q$$

[2.10.1.9]

[9]

Παρατηρούμε ότι το μέγιστο συνολικό φορτίο του τροχού για ταχύτητες $V=300 \text{ Km/h}$ είναι ελάχιστα μικρότερο από ότι για π.χ. $V=160 \text{ Km/h}$. Το συνολικό αυτό φορτίο δεν εξαρτάται από την ταχύτητα του συρμού, αλλά καθορίζει την πυκνότητα των στρωτήρων, την διατομή της σιδ/χιας, γενικά δηλαδή καθορίζει την μορφή της επιδομής. Απλά η διάφορα αυτή στην τελική τιμή του φορτίου είναι επειδή λαμβάνουμε υπόψη και διάφορους άλλους παράγοντες στην γραμμή όπως τα προαναφερόμενες καταπονήσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι άξονες των 17t σε ταχύτητες 300 Km/h δεν εξασκούν δυνάμεις μεγαλύτερες από τα εμπορικά τρέινα των 20t ανά άξονα και ταχύτητας 100 Km/h . Αναφέρουμε, επίσης, ότι έχουν μετρηθεί δυνάμεις 120 KN ανά τροχό σε 300 Km/h , 150 KN σε εμπορικά βαγόνια και 180 KN σε ελκτικές μονάδες που κυκλοφορούν με 200 Km/h .

2.11.2 Σύγκριση διάφορων τύπων στρωτήρων με βάση τα φορτία που δέχονται

Με βάση έρευνες που έγιναν από το D117 του ORE όσον αφορά την σύγκριση ξύλινου στρωτήρα, που χρησιμοποιείται σε συμβατικούς σιδ/μους, κατά κύριο λόγο, με στρωτήρα σκυροδέματος, που κατά κανόνα χρησιμοποιούν οι σιδ/μοι υψηλών ταχυτήτων, διαπιστώθηκε στις δοκιμές ότι για ίση επιφάνεια έδρασης η μέση βύθιση των μπλοκέττων από σκυρόδεμα ήταν αισθητά η ίδια με την βύθιση των ξύλινων μπλοκέττων (εργαστηριακή δοκιμή). Η φύση του υλικού (σκυρόδεμα ή ξύλο), τουλάχιστον στις εργαστηριακές δοκιμές με μπλοκέττα, επιδρά λίγο στην μέση βύθιση, δηλαδή παρουσιάζονται ίσες βυθίσεις. Όσον αφορά τη διασπορά των τιμών φαίνεται να είναι μικρότερη στο σκυρόδεμα από το ξύλο, γεγονός που αποκτά πολύ μεγαλύτερη βαρύτητα για την πράξη, όπου η διασπορά έχει μεγάλη σημασία.

Στο τμήμα της έρευνας του ORE που αφορά τα «ρεολογικά χαρακτηριστικά της γραμμής» αναφέρονται τα συμπεράσματα σύγκρισης μεταξύ ξύλινων στρωτήρων και στρωτήρων σκυροδέματος.

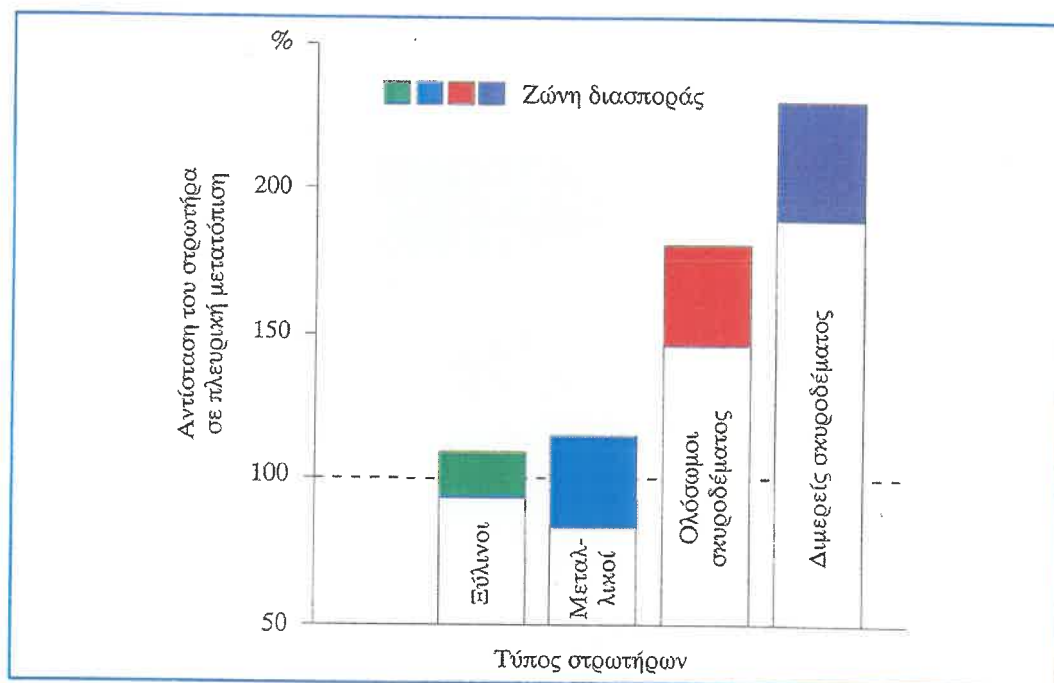
Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν γενικά ότι μια γραμμή με βαρείς στρωτήρες (από σκυρόδεμα) επιτρέπει την αντιμετώπιση, με τον πιο αποδοτικό τρόπο που υπάρχει, της βύθισης της γραμμής λόγω ταλαντώσεων. Με τους στρωτήρες αυτούς δεν παράγονται κορυφές, οι οποίες χαρακτηρίζονται από τα πλάτη της κίνησης στην περιοχή συντονισμού, που να οδηγούν σε αποσταθεροποίηση του έρματος. Επιπλέον η χρησιμοποίηση ελαστικού υποθέματος, «μαλακού», κατανέμει καλύτερα τις καταπονήσεις λόγω δονήσεων

που επηρεάζουν το έρμα. Οι στρωτήρες αυτοί λοιπόν παρουσιάζουν τα πιο ασθενή δυναμικά φαινόμενα στο έρμα και την έδραση. Το χρησιμοποιούμενο ελαστικό υπόθεμα προκαλεί καλύτερη διανομή του φορτίου κάθε τροχού, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα μείωση και της ημιστατικής φόρτισης του έρματος. Οι ξύλινοι στρωτήρες δίδουν τις πιο μικρές τιμές του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας όπως και τα μέγιστα των πιο χαρακτηριστικών ευρών της κίνησης στην περιοχή συντονισμού.

Η διαφορετική συμπεριφορά οφείλεται στο μεγαλύτερο βάρος το στρωτήρα από σκυρόδεμα. Τα αποτελέσματα της ερευνάς προδικάζουν καλύτερη συμπεριφορά για μια γραμμή με στρωτήρες από σκυρόδεμα σε περίπτωση κυκλοφορίας υψηλών ταχυτήτων όπου παράγονται αυξημένες δυναμικές διεγέρσεις. Ενώ η βύθιση λόγω υλικού στον ξύλινο στρωτήρα είναι μεγαλύτερη από τον στρωτήρα σκυροδέματος, το φαινόμενο αυτό εξισορροπείται στην πράξη λόγω της πολύ μεγάλης ελαστικότητας των υποθεμάτων που χρησιμοποιούνται στους στρωτήρες σκυροδέματος. Στο σημείο αυτό υπενθυμίζουμε ότι η μόνιμη παραμόρφωση υψομετρικά είναι ποσοστό της βύθισης – σε κάθε σημείο - της γραμμής. Αυτό σημαίνει ότι στην πράξη δεν παίζει ρόλο το υλικό του στρωτήρα στη χειροτέρευση της γεωμετρίας της γραμμής. [20],[21]

Πρέπει να τονισθεί, επίσης, και η ανάγκη για βαριά κατασκευή επιδομής ώστε να αντιμετωπισθεί το κλασσικό φαινόμενο της πλευρικής παραμόρφωσης της γραμμής που συμβαίνει το θέρος, κατά τη περίοδο των υψηλών θερμοκρασιών, με την διέλευση μιας αμαξοστοιχίας, που ξεκινά από την περιοχή της καμπύλης ανύψωσης. Ο καθηγητής *J. Eisenmann* επιμένει ότι πρέπει να υπάρχει βάρος της εσχάρας της γραμμής (για μια πλευρική επιφάνεια αντίστασης σε μετακίνηση) που να υπερβαίνει τα 600 Kg/m. Η εσχάρα με ξύλινους στρωτήρες βρίσκεται περίπου στο μισό (300 Kg/m), η εσχάρα με ολόσωμους στρωτήρες καλύπτει την απαίτηση, ενώ η εσχάρα με διμερές στρωτήρες έχει 550 Kg/m, αλλά δύο πλευρικές επιφάνειες αντίστασης σε μετακίνηση. Στο διάγραμμα 18 συγκρίνεται η αντίσταση διάφορων τύπων στρωτήρων σε πλευρική μετατόπιση, η οποία πραγματοποιείται με την χαλάρωση της διατομής της κλίνης του έρματος και παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό στις καμπύλες τροχίες, όπως προκύπτει από την έρευνα D 117 του ORE [22].

1. Πλευρική αντίσταση στρωτήρων



Σύγκριση πλευρικής αντιστάσεως τύπων στρωτήρων
όπως προκύπτει από την έρευνα D117 του ORE

Διαγρ.18

πηγή ORE

Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η πλευρική μετατόπιση για διάφορους τύπους στρωτήρων όπου διαφαίνεται η σχετικά μεγάλη περιοχή διασποράς, με διάφορους χρωματισμούς, που οφείλεται σε λόγους κατασκευαστικούς (διαστάσεις, βάρος, μορφή στρωτήρα κλπ) καθώς και στην ποιότητα και τις ιδιότητες του έρματος. Η υπερδιπλάσια αντίσταση του διμερή στρωτήρα σε σύγκριση με τον ξύλινο οφείλεται σε δυο κυρίως λόγους:

- λόγω μεγαλύτερου βάρους διμερή στρωτήρα, η συνιστώσα της αντίστασης λόγο τριβής μεταξύ κάτω επιφάνειας στρωτήρα και έρματος είναι μεγαλύτερη,
- η συνιστώσα της αντίστασης που αναπτύσσεται στις κεφαλές (μέτωπα) του στρωτήρα είναι πολύ μεγαλύτερη

Σε σύγκριση με τον διμερή στρωτήρα η πλευρική μετατόπιση που αναπτύσσεται στους ολόσωμους στρωτήρες είναι μικρότερη, αλλά σαφώς υψηλότερη από ότι στους ξύλινους. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο βάρος, στο μεγαλύτερο ύψος και στη μεγαλύτερη επιφάνεια επαφής που παρουσιάζει ο ολόσωμος στρωτήρας. Αύξηση του μήκους του στρωτήρα από 2,40 m σε 2,60 m στους Γερμανικούς σιδ/μους οδήγησε σε αύξηση της εγκάρσιας αντίστασης κατά 15-20%.

Η αντίσταση το μεταλλικού στρωτήρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη μορφή του (καμπυλότητα πέρατος, έρμα περιεχόμενο μέσα στο στρωτήρα κλπ). Έτσι

μειώσει της απόστασης μεταξύ στρωτήρων οδηγεί σε ελαφριά μείωση της τιμής της αντίστασης ανά στρωτήρα, που ωστόσο αντισταθμίζεται από το μεγαλύτερο αριθμό στρωτήρων ανά χιλιόμετρο. Συνολικά η πλευρική αντίσταση της γραμμής αυξάνει, όταν μειώνεται η απόσταση μεταξύ στρωτήρων.

Είναι χαρακτηριστικό ότι σε έκδοση της Διεθνούς Ομοσπονδίας Προεντεταμένου Σκυροδέματος αναφέρεται ως πλεονέκτημα μιας γραμμής με στρωτήρες από σκυρόδεμα έναντι μιας γραμμής με ξύλινους στρωτήρες, το ότι απαιτούνται 1.640 στρωτήρες σκυροδέματος, αντί 1930 ξύλινοι ανά χιλιόμετρο. [23]

2.12 Θεωρία στην οποία στηρίχθηκε η έρευνα των Γερμανών, για τις ασκούμενες δυνάμεις και τις συχνότητες

Στις μικρές ταχύτητες η δύναμη αλληλεπίδρασης «τροχού – σιδηροτροχιάς» διαφέρει ελάχιστα από τη στατική δύναμη του τροχού και για τον υπολογισμό της γραμμής χρησιμοποιείται, όπως γνωρίζουμε, ο τύπος του *Zimmerman*.

Σε υψηλές ταχύτητες του κυλιόμενου φορτίου οι διαφοροποιήσεις της δύναμης του τροχού επί της σιδ/χίας (η ονομαζόμενη «δυναμική φόρτιση τροχού») είναι πολύ υψηλότερες. Αντιστοίχως τροποποιούνται οι δυνάμεις μεταξύ σιδ/χίας και στρωτήρα καθώς και μεταξύ στρωτήρα και έρματος. Σε ακριβή παρατήρηση οι αλλαγές αυτές δεν επηρεάζονται μεταξύ τους γραμμικά.

Οι συχνότητες των δρόντων φορτίων ($1/\text{sec} = \text{Hz}$) καθορίζονται στη γραμμή από γεωμετρικά στοιχεία (μήκος βαγονιού – θέσης αξόνων κ.λ.π. διάσταση σε m) και από την ταχύτητα (m/sec). Στις χαμηλές συχνότητες από 0 έως 40 Hz με δράσεις που ασκούνται στη γραμμή, προκύπτουν από τα ακόλουθα:

- Μήκος βαγονιού 26,4 m : 2.5 Hz
- Μήκος πλαισίου περίπου 7 m : 10 Hz
- Απόσταση αξόνων στο πλαίσιο 3 έως 2,5 m έως 30 Hz, εκκεντρότης τροχού με ανάπτυσμα διαμέτρου 3,5 έως 2,5 m : 20 έως 35 Hz.

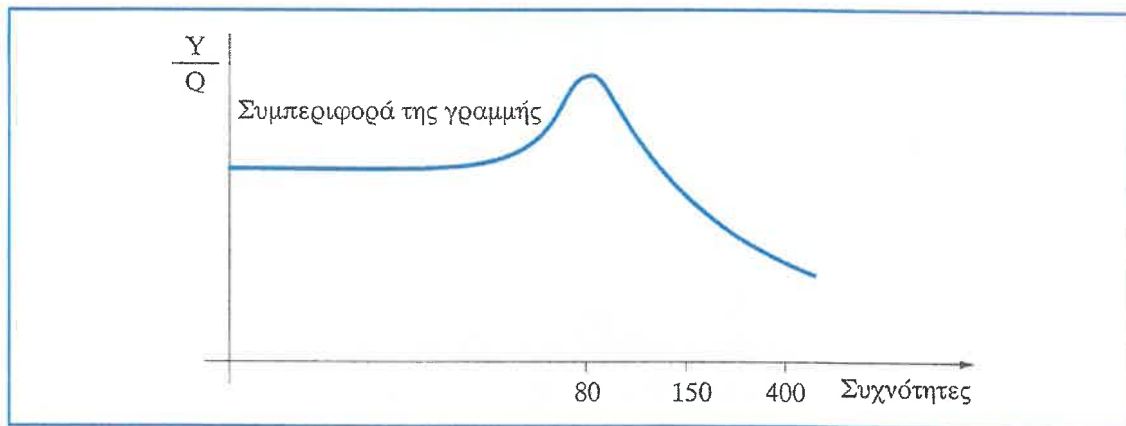
Οι περαιτέρω δράσεις που ασκούνται στη γραμμή υψηλών ταχυτήτων στο μεσαίο φάσμα συχνοτήτων, 40 έως 400 Hz είναι οι παρακάτω:

- Εκκεντρότητες τροχών υψηλών βαθμίδων 1,5 m, 1.0 m, 0.75 m... 50 Hz, 70 Hz, 90 Hz.
- Μήκος κυματώσεων στην επιφάνεια της σιδ/χίας (μη τροχισμένη σιδ/χία) 1,5 έως 0.2 m 50 έως 350 Hz.
- Απόσταση στρωτήρων 0,6 m 120 Hz.

Το υψηλό φάσμα συχνοτήτων >400 Hz δημιουργείται :

1. από μη λειασμένες σιδηροτροχιές με μήκη κύματος της κυματοειδούς φθοράς 0,15 έως 0,02.
2. από αναδιπλώσεις και
3. από φθορά των τροχών. **[24]**

Στο διάγραμμα 19 δίνεται η συμπεριφορά της γραμμής όπως έχει αναλυθεί προηγουμένως σε σχέση με τις συχνότητες.



Απόκριση της γραμμής στη συχνότητα του φορτίου

Διαγρ. 19

πηγή [6]

όπου :

$Y \rightarrow$ κατακόρυφη βύθιση (mm)

$Q \rightarrow$ δυναμική φόρτιση (KN)

Όσον αφορά για τις ιδιοσυχνότητες των στρωτήρων είναι:

- μέση ιδιοσυχνότητα διμερούς στρωτήρα 400 Hz
- μέση ιδιοσυχνότητα ολόσωμου στρωτήρα 150 Hz
- μέση ιδιοσυχνότητα μιας εσχάρας γραμμής 80 Hz

Στους DB υπάρχει γενικά η άποψη να μην λαμβάνεται υπόψη η επιβάρυνση του έρματος σε αυτές τις συχνότητες. Οι μετρήσεις και οι παρατηρήσεις απέδειξαν όμως ότι δεν μπορεί να παραβλεφθούν οι επιδράσεις επί του έρματος

και συγκεκριμένα σε φθορές της επιφάνειας κύλισης των σιδ/χιων μικρού μήκους κύματος και αυτό επειδή π.χ. σε πατιναρίσματα 5 cm σε ταχύτητα $V=250 \text{ Km/h}$ παρουσιάζονται συχνότητες 700 Hz, δημιουργούνται στον αντίστοιχο στρωτήρα λευκές κηλίδες που επεκτείνονται και στους παραπλήσιους στρωτήρες, με αποτέλεσμα να δημιουργείται σε πόλους στρωτήρες ένα αλυσιδωτό κενό. Έτσι δημιουργείται μια λεύκη παιπάλη που στην ουσία είναι το χαρακτηριστικό της φθοράς του έρματος.

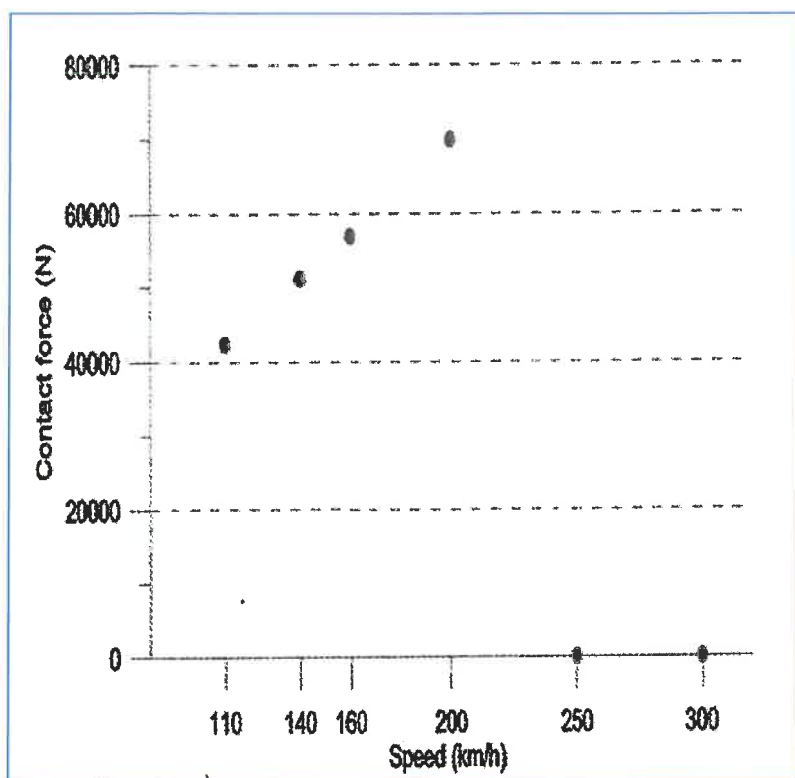
Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα (κατά τους DB) η γραμμή επηρεάζεται από τα κάθετα φορτία. Οι δράσεις επί της γραμμής σε οριζόντια κατεύθυνση παίζουν σημαντικό ρόλο στην καταπόνηση, έχουν όμως δευτερεύοντα ρόλο στην απόσβεση και απορρόφηση των δράσεων και φορτίσεων. Από υπολογισμούς και ερευνητικές μελέτες έχει πολλαπλώς αποδειχθεί, ότι στο φάσμα των χαμηλών συχνοτήτων, ($< 40 \text{ Hz}$ που προκαλείται από διέγερση που προκαλούν οι άξονες διέλευσης) τα στατικά μεγέθη των φορτίσεων του τροχού επί το πλείστον δημιουργούν τις πιέσεις στο έρμα και τις – από την αιτία αυτή – αναλογούσες παραμορφώσεις και καταστροφές στο έρμα και στην υποδομή. Στο φάσμα των μεσαίων συχνοτήτων ($40 \div 400 \text{ Hz}$ που προκαλείται ως επί το πλείστον από σφάλματα των τροχών, όπως εκκεντρότητες της διαμέτρου των τροχών) οι δυναμικές διακυμάνσεις της «δύναμης τροχού» δημιουργούν ενέργεια στο κυλιόμενο φορείο και στη γραμμή. Ένα μέρος της ενέργειας η οποία διοχετεύεται στην γραμμή επαναφέρεται υπό την μορφή ελατηριωτής επαναφοράς από το σύστημα «σύνδεσμος + ελαστικό υπόθεμα» + έρμα + υποδομή, ενώ η καταστροφική ενέργεια που παραμένει, μετατρέπεται στο σύστημα (σύνδεσμος – ελαστικό υπόθεμα) σε θερμική ενέργεια και στο έρμα σε ενέργεια καταστροφής. Στην υποδομή η μεταβαλλόμενη ενέργεια σε θερμότητα και καταστροφή έχει ηπιότερα αποτελέσματα γιατί γίνεται απόσβεση ενέργειας από την παρέμβαση των στρωτήρων και των συνδέσμων τους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, για τους υπολογισμούς κατά την έρευνα, τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν, για το χαμηλό φάσμα συχνοτήτων επιλέγει μηχανή του ICE με αξονικό φορτίο 20 t, η ίδια δε φόρτιση επιτυγχάνεται στις δοκιμές ένα αντίστοιχου φορτίου βαγόνι και για τις μεσαίες και υψηλές συχνότητες χρησιμοποιήθηκε βαγόνι του ICE με αξονικό φορτίο 14 t, με ιδιαίτερα πεπλατυσμένους τροχούς που παράγουν μεγάλες συχνότητες. [6],[23]

2.13 Σχέση ταχύτητας και δύναμη επαφής όνυχα τροχού και σιδ/χιας

Κατά την κίνηση ενός συρμού στην σιδ/κη γραμμή, ανάλογα με την διανυόμενη ταχύτητά του, κατά την επαφή του τροχού με την σιδ/χια οι δυνάμεις που ασκούνται παρουσιάζουν ορισμένες διαφοροποιήσεις στις τιμές τους. Στο διάγραμμα 20 διακρίνεται την σχέση δύναμη επαφής όνυχα τροχού και σιδ/χιας με την ταχύτητα, με ακτίνα αλλαγής 7000m. Η βελόνα αλλαγής μπορεί να βασιστεί στο κάθετο φορτίο του τροχού όταν το πάχος h είναι μεγαλύτερο από $h=38 \text{ mm}$.

Το πάχος h διακρίνεται στην εικ. 31 καθώς επίσης και οι διαφορετικές φάσεις δημιουργίας του. Όπου t_1 είναι η πρώτη φάση που σημαίνει την αρχή της βελόνας αλλαγής και το τμήμα t_6 είναι το σημείο που το πάχος h έχει φθάσει μια ορισμένη τιμή για να επιτρέψει το στήριγμα του τροχού χωρίς την συνεισφορά της σταθερής σιδ/χιας. Το πάχος αυτό αποκαλείται πάχος h .



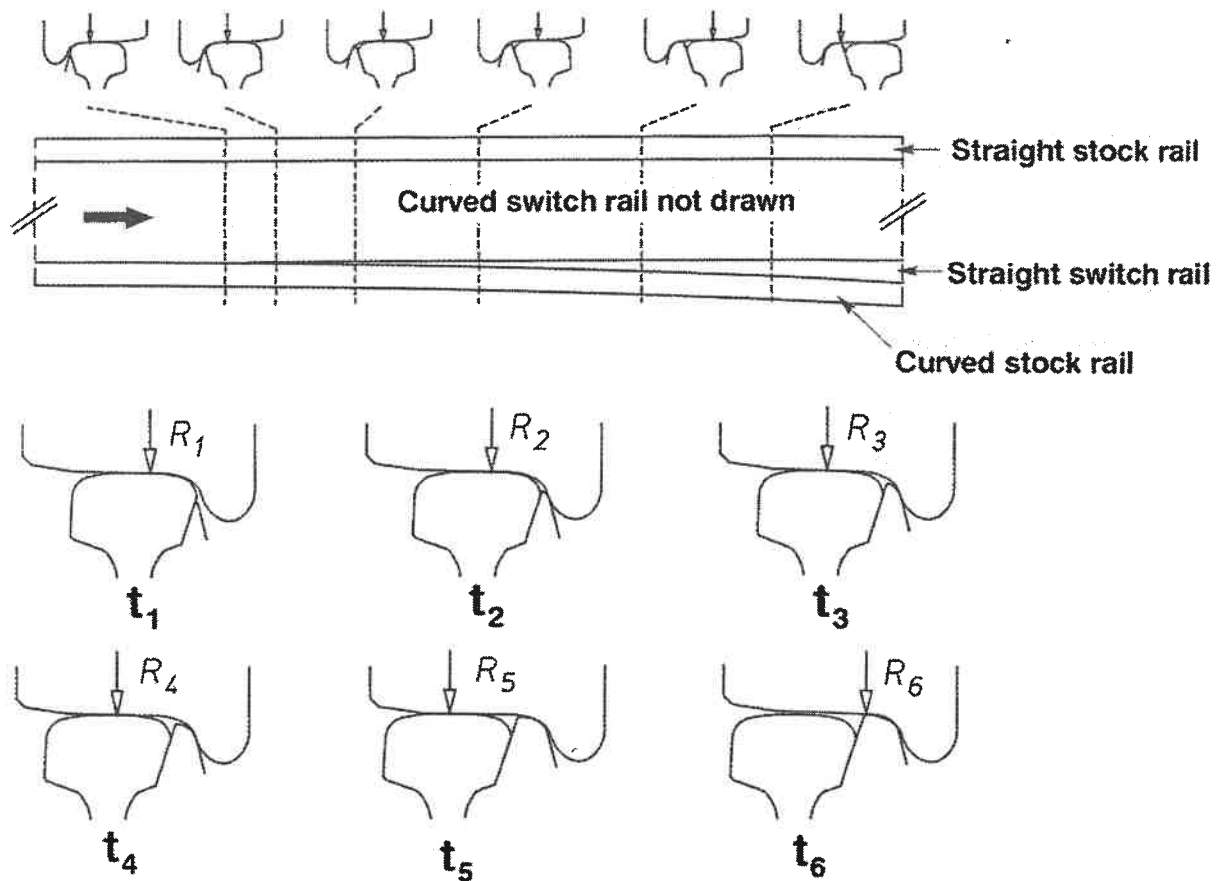
Διάγραμμα 20 :επιρροή της ταχύτητας στην δύναμη επαφής όνυχα τροχού και σιδ/χιας (ακτίνα εκτροπής της αλλαγής 7000m, φορείο κεντρικό, γωνία περιστροφής γύρω από τον άξονα μηδενική, $h=38mm$)

πηγή ING-FER

Από το διάγραμμα 22 μπορούν να διακριθούν δυο ζώνες:

- Για ταχύτητα μέχρι 200Km/h, αύξηση της ταχύτητας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της δύναμης επαφής όνυχα τροχού - σιδ/χιας
- Ένα φαινόμενο ασυνήθιστο παρουσιάζεται για ταχύτητες μεγαλύτερες από 200 Km/h, όπως π.χ. 250 Km/h δεν υπάρχει επαφή όνυχα τροχού-σιδ/χιας.

Αυτό το φαινόμενο μπορεί να εξηγηθεί κατά την περίπτωση που η ταχύτητα της πλευρικής μετατόπισης του άξονα (y_{ai} πλευρική μετατόπιση από το κέντρο μάζας του άξονα i) αυξάνει με την ταχύτητα κίνησης. Το ακόλουθο παράδειγμα μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση του σημείου αυτού.



εικ. 31 Δίνεται το πάχος h μεταξύ επαφής όνυχας τροχού και σιδ/χιας σε διάφορες φάσεις από την t_1 , αρχική φάση, μέχρι την εμφάνιση του πάχους στην φάση t_6 (τελική φάση)
πηγή ING-FER (I)(FS)

Στην περίπτωση που ένας συρμός που ταξιδεύει με μια ταχύτητα 110 Km/h (31 m/sec) ο κινητήριος άξονας έχει ταχύτητα πλευρικής μετατόπισης σταθερή 0.009m/sec (στην πραγματικότητα η ταχύτητα αυτή είναι μεταβλητή, όμως για ευκολία υπολογισμών θεωρείται σταθερή). Αν ο ίδιος συρμός ταξιδεύει με ταχύτητα 300 Km/h, η ταχύτητα πλευρικής μετατόπισης θα είναι 0,018 m/sec. Που σημαίνει ότι τριπλασιάζοντας περίπου την ταχύτητα κίνησης (από 31 σε 83 m/sec) η ταχύτητα πλευρικής μετατόπισης διπλασιάζεται μόνο (από 0.009 σε 0,018 m/sec). Αυτό σημαίνει ότι ο άξονας δεν έρχεται σε επαφή με την σιδ/χια όταν φτάνει μια ακριβή ταχύτητα. [25]

3. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά γραμμών συμβατικών και υψηλών ταχυτήτων (χάραξη και διαστασιολόγηση)

3.1 Γενικά στοιχεία

Η χάραξη μιας σιδ/κης γραμμής αποτελεί σήμερα μια αρκετά πολύπλοκη διαδικασία, αφού δεν είναι μόνο η τεχνική πλευρά του θέματος που πρέπει να μελετηθεί, αλλά η αντιμετώπιση μιας σειράς άλλων παραγόντων όπως:

- Περιβάλλον
- Ιδιοκτησιακά θέματα
- Τοπική αυτοδιοίκηση
- Ευρωπαϊκοί κανονισμοί διαλειτουργικότητας
- Εξασφάλιση οικονομικών πόρων

Αφού ικανοποιηθούν τα ζητούμενα των παραπάνω παραμέτρων, τότε θεωρείται ώριμο να αρχίσει η διερεύνηση του διαδρόμου σε στάδιο προκαταρκτικής μελέτης για τη βέλτιστη όδευση του υπόψη σιδ/κου άξονα. Θα πρέπει, όμως, να έχει προηγηθεί μελέτη σκοπιμότητας για το συγκεκριμένο έργο, προκειμένου στα πλαίσια κόστους - οφέλους να διαπιστωθεί η αναγκαιότητα κατασκευής του. Στη μελέτη σκοπιμότητας περιλαμβάνεται και αναγνωριστική χάραξη του διαδρόμου, έτσι ώστε επί αυτού του δεδομένου να μελετηθούν οι παραπάνω αναφερόμενοι παράγοντες.

Η χάραξη ενός σιδ/κου έργου αποτελείται από τον καθορισμό του διαδρόμου οριζοντιογραφικά και των κατά μήκος κλίσεων υψομετρικά, όπου ο άξονας προκύπτει ως καμπύλη στο χώρο η οποία πρέπει να πληρεί όλες τις αντίστοιχες απαιτήσεις. Με αυτό εννοείται η ανάπτυξη κατάλληλης χάραξης έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις ως :

1. την ασφάλεια λειτουργίας
2. της ισορροπία των δυναμικών παραμέτρων
3. την άνεση των επιβατών
4. την οικονομικότητα της λειτουργίας

Σήμερα οι βασικές αρχές σχεδιασμού νέων χαράξεων στοχεύουν :

- στην ελαχιστοποίηση των παρακάμψεων
- στην ελαχιστοποίηση της μετακίνησης γαιών
- στην προσαρμογή του άξονα στο φυσικό περιβάλλον (π.χ. παράκαμψη προστατευόμενων περιοχών)

Τοιουτοτρόπως προκύπτει η μέγιστη επιτρεπόμενη κλίση από το πρόγραμμα λειτουργίας της υπόψη γραμμής όπου η δυνατότητα εκκίνησης ενός συρμού επί αυτής προς την ανωφερική κατεύθυνση αποτελεί καθοριστικό παράγοντα σχεδιασμού. Η εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους και η πραγματοποίηση υψηλών ταχυτήτων ($V \geq 200$ km/h), δικαιώνουν συχνά την κατασκευή σηράγγων και κοιλαδογεφύρων, αφού εκ των έργων αυτών προκύπτει τέτοια μείωση χρόνου διαδρομής, η οποία καθιστά το μέσο πολύ ανταγωνιστικό. **[41]**

Μια σιδ/κη γραμμή θεωρείται ιδανική ως προς την γεωμετρία χάραξης όταν :

- Αποτελείται αποκλειστικά από ευθύγραμμα τμήματα
- Κείται, σε όλο το μήκος της , επί ενός οριζόντιου 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.

Σύμφωνα με το έγγραφο ENV 13003-1:2002 **[29]** υπάρχει μια σειρά Ευρωπαϊκών Πρότυπων, με σκοπό να δείξουν και να επισημάνουν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που υπεισέρχονται κατά την μελέτη και διαστασιολόγηση της χάραξης της σιδηροδρομικής γραμμής, όπου περιέχουν παραμέτρους χάραξης της γραμμής και διαφοροποιήσεις των υψηλών ταχυτήτων σε σχέση με τους συμβατικούς σιδ/μους. Επίσης, τους κανόνες και τις τιμές που θα χρησιμοποιηθούν για να καθοριστεί η μέγιστη ταχύτητα για τις νέες και για τις ήδη υπάρχουσες γραμμές.

Γίνεται αναφορά, πάντα σε γραμμές, με εύρος γραμμής 1435 mm και ευρύτερο με μικτή ή όχι, κίνηση συρμών και ταχύτητες αυτών από 80 km/h μέχρι και 300 km/h. Λαμβάνεται επίσης, υπόψη και η πιθανότητα να αυξηθεί η απόδοση λειτουργίας της γραμμής, χωρίς μεγάλες τροποποιήσεις της χάραξης, με την βοήθεια συγκεκριμένων τύπων σιδ/κων οχημάτων, όπως:

- Οχήματα με μικρή μάζα (όγκο) του άξονα του τροχού
- Οχήματα με μικρή ανάρτηση του συντελεστή κύλισης

- Οχήματα εξοπλισμένα με συστήματα αιώρησης, που αιωρείται το κύριο μέρος τους για να αντισταθμίζεται η ατέλεια της επικλινούς επιφάνειας (ενεργητικά ή παθητικά συστήματα) (βλέπε παράγραφο 3.9).

3.2 Κατηγορίες κίνησης

Γίνεται ένας διαχωρισμός μεταξύ των ακόλουθων κατηγοριών κίνησης σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο:

- Μικτές γραμμές κυκλοφορίας, με ταχύτητες επιβατικών συρμών από 80 km/h έως 120 km/h (Προαστιακοί Σιδ/μοι και Μητροπολιτικοί σιδ/μοι).
- Μικτές γραμμές κυκλοφορίας, με ταχύτητες επιβατικών συρμών μεγαλύτερες, από 120 Km/h έως 160 Km/h .
- Μικτές γραμμές κυκλοφορίας, με ταχύτητες επιβατικών συρμών μεγαλύτερες, από 160 km/h έως 200 km/h.
- Μικτές γραμμές κυκλοφορίας, σχεδιασμένες για ταχύτητες επιβατικών συρμών μεγαλύτερες, από 200 km/h έως 300 km/h.
- Μικτές γραμμές κυκλοφορίας, με ταχύτητες επιβατικών συρμών έως 230 km/h (ή 250 km/h σε αναβαθμισμένες γραμμές) με οχήματα που ενσωματώνουν ειδικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά (μικρή μάζα τροχού κλπ).

Βάση του Ευρωπαϊκού Προτύπου, η ταχύτητα αναφοράς είναι αυτή των επιβατικών τρένων. Η παραπάνω ταξινόμηση χρησιμοποιεί την ταχύτητα ως το πιο σχετικό κριτήριο που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν καθορίζονται οι συνθήκες λειτουργίας για διαφορετικές κατηγορίες κίνησης. Επίσης για την ταξινόμηση αυτή λαμβάνονται υπόψη και άλλοι παράγοντες όπως **ασφάλεια, άνεση και αποδοτικότητα κόστους. [29]**

3.3 Παράμετροι σχεδιασμού χάραξης της γραμμής

Για τον σχεδιασμό και την διαστασιολόγηση της σιδηροδρομικής γραμμής υπάρχουν παράμετροι που αποτελούν την βάση σχεδιασμού της γραμμής που σε ορισμένες από αυτές παρατηρούνται διαφοροποιήσεις στις τιμές τους ανάλογα με την χρησιμοποιούμενη ταχύτητα των συρμών.

Υπογραμμίζονται παρακάτω οι κυριότερες παράμετροι :

- ακτίνα οριζόντιας καμπύλης R (m) (S^*)
- υπερύψωση ή επικλινής επιφάνεια D (m) (S^*)
- ανεπάρκεια υπερύψωσης I (mm)
- φυγόκεντρη μη αντισταθμισμένη πλευρική επιτάχυνση σε επίπεδο γραμμής a_q (m/sec²) (S^*)
- πλεόνασμα ή υπερβολή υπερύψωσης E (mm)
- ρυθμός μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου dD/dt (mm/sec)
- ρυθμός μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του μήκους dD/dl (mm/sec) (S^*)
- ρυθμός μεταβολής της ανεπάρκειας της υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου dl/dt (mm/sec)
- μήκος των στοιχείων χάραξης (κυκλικές καμπύλες και ευθείες) L_i (m)
- μήκος καμπυλών συναρμογής στο οριζόντιο επίπεδο L (m)
- ακτίνα κάθετης καμπύλης R_v (m)
- ταχύτητα V (km/h) (S^*)

Οι παράμετροι που ακολουθούνται από το (S^*) δηλώνουν παραμέτρους που σχετίζονται με την ασφάλεια.

Παρακάτω δίνονται οι ορισμοί των εννοιών αυτών ήτοι:

Ανεπάρκεια υπερύψωσης : όταν η ταχύτητα ενός οχήματος που διαγράφει μια καμπύλη είναι υψηλότερη από την ταχύτητα ισορροπίας, θα υπάρξει μια ανισόρροπη φυγόκεντρη δύναμη η οποία είναι μεγαλύτερη από την επιτάχυνση βαρύτητας. Αυτό σημαίνει ότι η κατασκευασθείσα υπερύψωση είναι επόμενος ανεπαρκής για την υψηλότερη ταχύτητα και η επακόλουθη δύναμη θα ασκηθεί προς την εξωτερική σιδήχια της καμπύλης. Συνθήκες ισορροπίας μπορεί να επανέρθουν θεωρητικά λαμβάνοντας υπόψη την τιμή κατά την οποία η υπερύψωση ισορροπίας είναι ανεπαρκής για την υψηλότερη ταχύτητα. Αυτή η τιμή είναι γνωστή ως ανεπάρκεια υπερύψωσης.

Πλεόνασμα ή υπερβολή υπερύψωσης : Όταν η ταχύτητα ενός οχήματος που διαγράφει μια καμπύλη είναι χαμηλότερη από την ταχύτητα ισορροπίας, θα υπάρξει μια ανισόρροπη κεντρομόλος δύναμη. Η κατασκευασθείσα υπερύψωση

είναι υπερβολική για την χαμηλότερη ταχύτητα και η επακόλουθη δύναμη θα ασκηθεί προς την εσωτερική σιδήχια της καμπύλης. Συνθήκες ισορροπίας μπορεί να επαναφερθούν θεωρητικά λαμβάνοντας υπόψη την τιμή κατά την οποία η υπερύψωση ισορροπίας είναι υπερβολή για την χαμηλότερη ταχύτητα. Αυτή η τιμή είναι γνωστό ως υπερβολή υπερύψωσης.

Ρυθμός μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του μήκους είναι η τιμή κατά την οποία η υπερύψωση αυξάνεται ή μειώνεται σε ένα δεδομένο μήκος μετάβασης.

Ρυθμός μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου είναι ο ρυθμός κατά τον οποίο η υπερύψωση αυξάνεται ή μειώνεται σε σχέση με την μέγιστη ταχύτητα ενός οχήματος που διαγράφει μια καμπύλη συναρμογής, π.χ. 35 mm το δευτερόλεπτο σημαίνει ότι ένα όχημα που ταξιδεύει στην μέγιστη ταχύτητα που επιτρέπεται θα υποστεί μια μεταβολή υπερύψωσης 35 mm σε κάθε δευτερόλεπτο.

Ρυθμός μεταβολής της ανεπάρκειας της υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου είναι ο ρυθμός κατά τον οποίο η ανεπάρκεια υπερύψωσης αυξάνεται ή μειώνεται σε σχέση με την μέγιστη ταχύτητα ενός οχήματος που διαγράφει μια καμπύλη συναρμογής.

Για να προσδιοριστούν οι ποσότητες των παραμέτρων αυτών καθορίζονται δυο διαφορετικοί τύποι οριακών τιμών :

- **Μια προτεινόμενη οριακή τιμή**, η οποία θα εφαρμόζεται για το σχεδιασμό νέων σιδ/κών γραμμών ή τμήματα αυτών, καθώς και αναβάθμιση υπάρχουσων γραμμών. Με τις τιμές αυτές υπάρχει η εγγύηση ότι οι δαπάνες συντήρησης της γραμμής θα κυμανθούν σε κανονικά επίπεδα
- **Μια μέγιστη οριακή τιμή** που μπορεί να έχει δυο διαφορετικές σημασίες:
 - Για παραμέτρους που σχετίζονται με ασφάλεια, πρέπει να θεωρηθεί ως το απόλυτο μέγιστο όριο αυτής της παραμέτρου, μπορεί να εξαρτάται από την πραγματική μηχανική και γεωμετρική κατάσταση των γραμμών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέγιστη οριακή τιμή είναι σχετισμένη με την ασφάλεια και μπορεί (για μερικές παραμέτρους) να προκαλεί ένα μειωμένο επίπεδο άνεσης: οι τιμές αυτές θα πρέπει να μειωθούν το λιγότερο κατά 10 % και αναφέρονται στα προτεινόμενα όρια ως “εξαιρετικές” τιμές που πρέπει να χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιστάσεις ή μετά από μια συγκεκριμένη ανάλυση ασφάλειας. Οι οριακές τιμές καθορίζονται σε ένα λειτουργικό πρότυπο εμπορικού τρένου. Για να διεξαχθούν δοκιμές, π.χ. για να εξακριβώσουν την δυναμική συμπεριφορά του οχήματος (παρακολουθώντας διαρκώς τις αντιδράσεις του οχήματος), θα πρέπει να επιτραπεί να ξεπερνιούνται οι οριακές τιμές (ειδικά στην ανεπάρκεια υπερύψωσης). Σε αυτό το πλαίσιο, οι αποστάσεις ασφαλείας γενικά ενισχύονται κάνοντας επιπρόσθετα βήματα όπως η παγίωση, παρακολούθηση της γεωμετρικής ποιότητας της γραμμής κλπ.

- Για παραμέτρους που δεν σχετίζονται με την ασφάλεια, οι τιμές θα πρέπει να θεωρηθούν ως το όριο πάνω από το οποίο η ασφάλεια των επιβατών μπορεί να επηρεασθεί και η συντήρηση γραμμών να αυξηθεί σημαντικά· παρόλα αυτά, για να αντιμετωπιστούν ειδικές καταστάσεις, δεν θα πρέπει να επιλεγούν τιμές μεγαλύτερες από τα όρια ασφάλειας.

3.4 Προτεινόμενες οριακές τιμές και μέγιστες (ή ελάχιστες) οριακές τιμές για τις παραμέτρους σχεδίασης γραμμών

3.4.1 Ακτίνα οριζόντιας καμπύλης R

Κατά την χάραξη της σιδ/κης γραμμής επιβάλλεται να χρησιμοποιηθεί η μεγαλύτερη ακτίνα καμπύλης που επιτρέπεται από τους περιορισμούς σχεδίασης γραμμής. Αυτό θα φροντίσει για όποια μελλοντική αύξηση της ταχύτητας. Σε καμία περίπτωση, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακτίνα μικρότερη από 180 m για τις νέες χαράξεις. Οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τον καθορισμό της ελάχιστης ακτίνας καμπύλης είναι:

- οι μέγιστες και ελάχιστες ταχύτητες λειτουργίας
- η εφαρμοσμένη υπερύψωση
- οι οριακές τιμές για ανεπάρκεια και πλεόνασμα υπερύψωσης

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη ακτίνα καμπύλης για την μέγιστη ταχύτητα λειτουργίας συνήθως με ανεπάρκεια υπερύψωσης **I** και υπερύψωση **D**, υπολογίζεται με την ακόλουθη ισότητα :

$$R = \frac{11.8}{D + I} V_{\max}^2 \quad (\text{m}) \quad [3.4.1.1]$$

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη ακτίνα καμπύλης για την ελάχιστη ταχύτητα λειτουργίας συνήθως με πλεόνασμα υπερύψωσης **E**, υπολογίζεται από την ισότητα :

$$R = \frac{11,8}{D - E} V_{\min}^2 \quad (\text{m}) \quad [3.4.1.2]$$

Άρα η ελάχιστη ακτίνα καμπύλης θα πρέπει να καθορίζεται έτσι ώστε οι τιμές **D**, **I**, **E** να συμφωνούν με τα όρια που καθορίζονται από το Ευρωπαϊκό Πρότυπο και να ικανοποιούν την ακόλουθη σχέση :

$$\frac{11,8 \cdot V_{\min}^2}{D - E} \geq R \geq \frac{11,8 \cdot V_{\max}^2}{D + I} \quad (m) \quad [3.4.1.3]$$

Από τους παραπάνω τύπους παράγεται μια ελάχιστη ακτίνα γύρο στα 200 m. Υπάρχει όμως περίπτωση σε όχι αιχμηρές γραμμές με ταχύτητα λειτουργίας κάτω από 80 km/h να υπάρξουν και ελάχιστες ακτίνες καμπύλης 150 m.[29]

Οι καμπύλες στην οριζοντιογραφία εκφράζονται συνήθως με την ακτίνα καμπυλότητας **R** 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 $R > 5000 \text{ m}$
- Καμπύλες μεγάλης ακτίνας $1000 \text{ m} < R < 5000 \text{ m}$
- Καμπύλες μέσης ακτίνας $500 \text{ m} < R < 1000 \text{ m}$
- Καμπύλες μικρής ακτίνας $300 \text{ m} < R < 500 \text{ m}$
- Καμπύλες πολύ μικρής ακτίνας $R < 300 \text{ m}$

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

Η επιλογή των ακτινών καμπυλότητας πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τους παρακάτω παράγοντες:

- την τοπογραφία του εδάφους σε σχέση με την υπάρχουσα χρηματοδότηση
- τις ταχύτητες διέλευσης του ταχύτερου και του αργότερου συρμού που προβλέπεται να κυκλοφορήσουν στην γραμμή
- τις κατηγορίες των κυκλοφορουσών συρμών (επιβατικοί, εμπορικοί κτλ) καθώς επίσης και την ποσοστιαία αναλογία τους

- τα τεχνικά χαρακτηριστικά του επιλεγέντος τροχαίου υλικού και της επιδομής
- την συμπεριφορά του ανθρώπινου σώματος στις εγκάρσιες επιταχύνσεις
- τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ενδεχόμενης χάραξης

Με βάση την ακτίνα καμπυλότητας καθορίζονται και οι οριζόντιες δυνάμεις που αναπτύσσονται στη γραμμή και εξαρτώνται άμεσα, από την ταχύτητα V του οχήματος, το μέγεθος της πλάγιας επιτάχυνσης και την κατάσταση του οχήματος (κυρίως ως προς την κύλιση αυτού). Γενικά οι οριζόντιες δυνάμεις (για εύρος γραμμής 1435 mm) αυξάνουν με μείωση της ακτίνας καμπυλότητας και μάλιστα μικρότερης των 700 m ($R \leq 700$ m).

Σπουδαίο ρόλο παίζουν επίσης και οι αποστάσεις των αξόνων του οχήματος καθώς και η δυνατότητα προσαρμογής του συστήματος άξονας – τροχοί στην εκάστοτε ακτίνα καμπυλότητας της γραμμής. Μεγάλες αποστάσεις αξόνων και άκαμπτα φορεία ή συστήματα άξονα – τροχοί, προκαλούν μεγαλύτερες οριζόντιες δυνάμεις. Με αύξηση της πλάγιας επιτάχυνσης, αυξάνουν επίσης και οι οριζόντιες δυνάμεις της γραμμής. Για τον λόγο αυτό οι Γερμανικοί Σιδηρόδρομοι (DB) σε καμπύλες μικρής ακτίνας έχουν περιορίσει την πλάγια επιτάχυνση σε $0,65 \text{ m/sec}^2$, έτσι για ταχύτητες μικρότερες των 100 km/h δεν επιτρέπεται να ξεπερνιέται η επιτάχυνση $0,65 \text{ m/sec}^2$.

Οχι μόνον περιοχές με μικρή ταχύτητα (π.χ. καμπύλες μικρής ακτίνας) αλλά και περιοχές με υψηλές ταχύτητες θα πρέπει να υπολογίζονται για μεγάλες οριζόντιες δυνάμεις. Το ίδιο ισχύει και για ευθυγραμμίες. Αυτό αιτιολογείται από την δυσανάλογη αύξηση της δυναμικής συνιστώσας των οριζόντιων δυνάμεων. Οι προκαλούμενες εκ του λόγου αυτού αιχμές των δυνάμεων, ανάλογα με το μέγεθος της ταχύτητας, μπορούν να ξεπεράσουν τις δυνάμεις σε περιοχή καμπύλης με μικρή ακτίνα. Η αιτία βρίσκεται στην ποιότητα κύλισης του οχήματος και στην κατάσταση της γραμμής. Έναν ευκαταφρόνητο ρόλο παίζει και η ποιότητα του εύρους της γραμμής. [9]

3.4.2 Υπερύψωση D

Σε μια σιδ/κη γραμμή για να περιορίσουμε τις εγκάρσιες δυνάμεις που ασκεί το όχημα (μέσο των τροχών) στις εξωτερικές σιδ/χιες, πρέπει να υπερυψώσουμε την εξωτερική πλευρά (σιδ/χια) σε σχέση με την εσωτερική, όπως αντίστοιχα γίνεται και στην οδοποιία. Η διαφορά του ύψους των δύο σιδ/χιων λέγεται υπερύψωση γραμμής. Συμβολίζεται με το D και εκφράζεται σε [mm]. Η υπερύψωση κατά κανόνα δίδεται μέσω μόνο της εξωτερικής σιδ/χιας και είναι απαραίτητη για ταχύτητες κυκλοφορίας περίπου $V > 40 \text{ Km/h}$.

Η υπερύψωση θα πρέπει να καθορίζεται σε συσχετισμό με τα ακόλουθα:

- Για μεγάλη υπερύψωση σε μικρής ακτίνας καμπύλες, αυξάνει το ρίσκο εκτροχιασμού των συρμών με μικρές ταχύτητες. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, το κάθετο βάρος των τροχών που εφαρμόζεται στην εξωτερική σιδηροτροχιά μειώνεται, ειδικά όταν η καμπύλη (στροφή) της γραμμής προκαλεί επιπρόσθετες μειώσεις.
- Υπερύψωση που υπερβαίνει τα 160 mm, κατά κανόνα, μπορεί να προκαλέσει μετατόπιση βάρους και να χειροτερεύσει την άνεση των επιβατών όταν ο συρμός κάνει στάση εκτός προγράμματος σε τοποθεσία όπου έχει εφαρμοστεί μεγάλη υπερύψωση. Επιπλέον, με τέτοια υπερύψωση, μηχανισμοί οχημάτων και ειδικά φορτία με υψηλό κέντρο βάρους μπορεί να γίνουν ασταθή.
- Μεγάλη υπερύψωση έχει σαν συνεπεία να αυξάνει τις τιμές πλεονάσματος υπερύψωσης όπου υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ των γραμμών υψηλών ταχυτήτων σε σχέση με τις συμβατικούς σιδηροδρόμους.

Στον πίνακα 8 δίνονται οι τιμές που παίρνει η υπερύψωση με βάση τον διαχωρισμό των συρμών ανάλογα με το είδος τους και την ταχύτητά τους:

Κατηγορίες κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς συρμούς	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς συρμούς *	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για υψηλές ταχύτητες
(ταχύτητα σε km/h)	$80 \leq V \leq 120$	$120 < V \leq 200$	$200 < V \leq 300$	$V \leq 230$ (ή 250)	$250 \leq V \leq 300$
Συνιστώμενη οριακή τιμή [mm/s]	160	160	160	160	160
Μέγιστη οριακή τιμή [mm/s]	180	180	180	180	200

Πίνακας 8

Πηγή ENV 13803.01

* για τις μικτές γραμμές κυκλοφορίας με ταχύτητες $V \leq 230$ (ή 250 km/h) όπου χρησιμοποιούνται οχήματα με ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο .

Επίσης σε ορισμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα γραμμής όπως επίπεδες διασταυρώσεις, γέφυρες και σήραγγες, λαμβάνουμε την υπερύψωση περιορισμού.

Για να αποφύγουμε τον εκτροχιασμό των “δύσκαμπτων στρεφόμενων” εμπορευματικών συρμών επάνω σε μικρές (απότομες) ακτίνες καμπύλης η υπερύψωση θα πρέπει να περιοριστεί στην ακόλουθη τιμή (αναφορά του ORE B 55/Rp and 8) :[29]

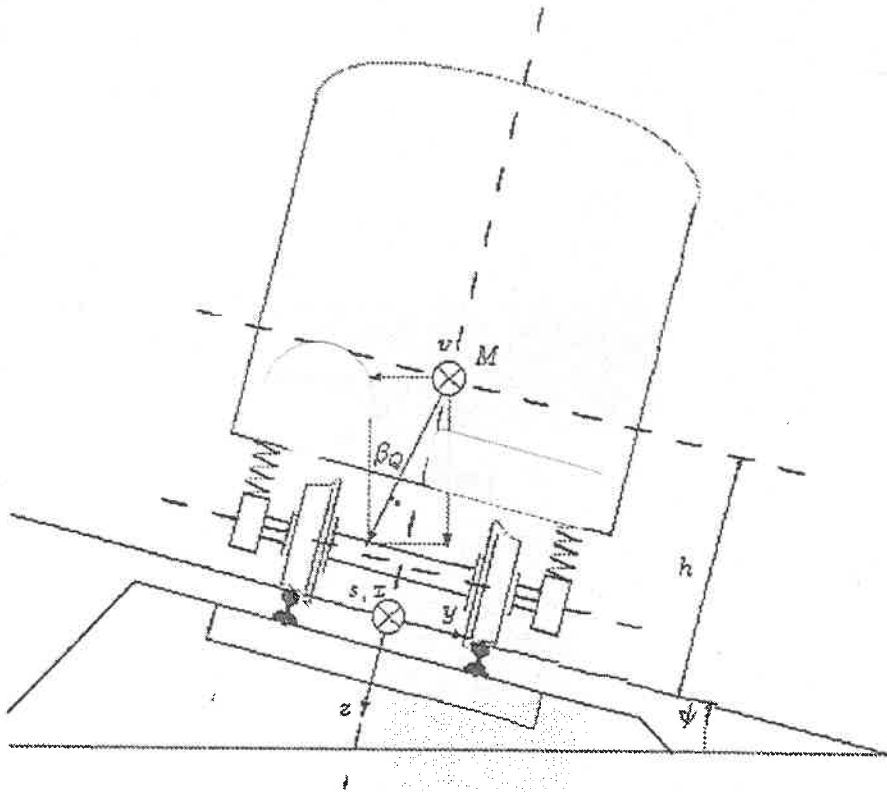
$$D_i = \frac{R - 50}{1,5} \quad [\text{mm}] \quad [3.4.2.1]$$

3.4.3 Υπερύψωση σε καμπύλες – θεωρητική απόδειξη της υπερύψωσης

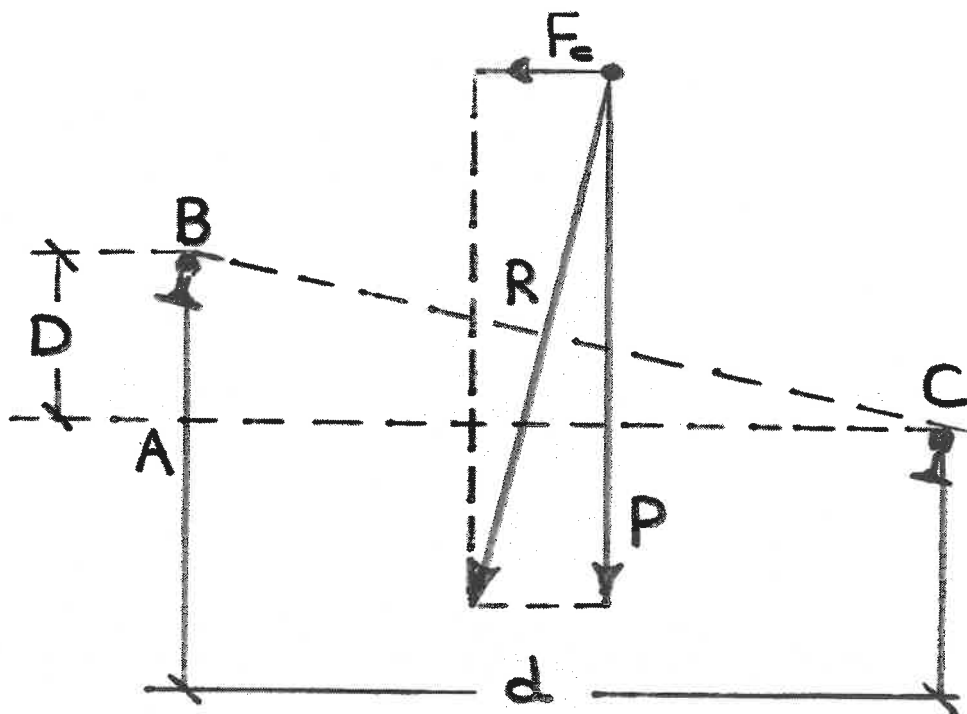
Σε καμπύλες τροχιές για να δείξουμε την δράση της φυγόκεντρου δύναμης με μια συνιστώσα του βάρους του οχήματος στο οποίο ασκείτε, λαμβάνεται υπόψη η υπερύψωση της εξωτερικής σιδ/χίας σε σχέση με την εσωτερική που μας δίνει την υψομετρική εξέλιξη, πορεία, της κατασκευής.

Το μέγεθος αυτό της υπερύψωσης εξαρτάται από την ακτίνα της καμπύλης και από την ταχύτητα που την διανύει, καθώς η υπερύψωση αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας διαγραφής και μειώνεται με την ακτίνα.

Στα σχήματα 6α και 6β που ακολουθούν, διακρίνεται πως ασκείται η φυγόκεντρος δύναμη F_c με μια υπερύψωση D (στο νέο Ευρωπαϊκό Πρότυπο η υπερύψωση εμφανίζεται με D) και την συνισταμένη R που δημιουργούν οι αντιδράσεις του βάρους P και της φυγόκεντρου F_c . [34]



σχήμα 6α



σχήμα 6β υπερύψωση της εξωτερικής σιδ/χιας και αρχή της ισορροπίας σε καμπύλη

Με βάση το σχήμα 6β θα ισχύει:

$$\frac{F_c}{P} = \frac{(AB)}{(AC)} = \frac{P/g \cdot v^2/R}{P} = \frac{D}{d} \quad [3.4.3.1]$$

από 'δω θα έχουμε :

$$D = \frac{v^2 \cdot d}{g \cdot R} \rightarrow \quad [3.4.3.2]$$

$$\rightarrow D = \frac{V^2 \cdot d}{3,6^2 \cdot g \cdot R} \approx 11.8 \frac{V^2}{R} \quad [3.4.3.3]$$

[(CB)= α: η απόσταση κύκλου έγγραφης σε mm. Για κανονικό εύρος, δηλαδή 1500 mm και για στενό εύρος 805 mm] [9]

Η φυγόκεντρος δύναμη μπορεί να προκαλέσει:

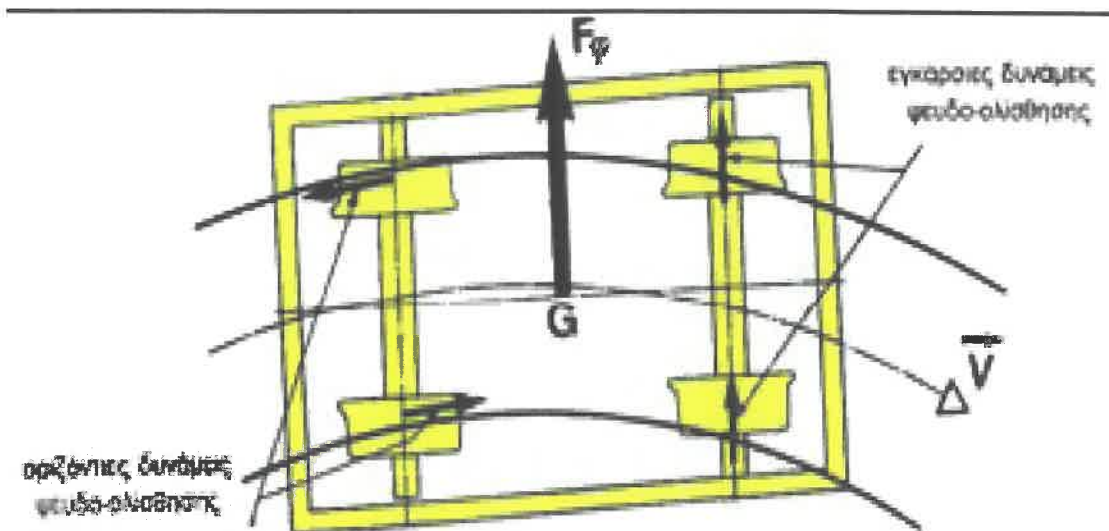
- μετατόπιση του φορτίου των οχημάτων και ανατροπή τους,
- εγκάρσιες επιταχύνσεις με αποτέλεσμα την μείωση της εγκάρσιας δυναμικής άνεσης των επιβατών,
- εγκάρσιες μετατοπίσεις των αξόνων, των φορέων και του αμαξώματος,
- εμφάνιση δυνάμεων καθοδήγησης και κατά συνέπεια αύξησης της αντίστασης κίνησης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

Εκτός όμως από την φυγόκεντρο δύναμη σε καμπύλα τμήματα αυξάνονται και οι δυνάμεις ψευδο – ολίσθησης που επενεργούν στην επιφάνεια επαφής τροχών – σιδ/χιας (βλέπε σχήμα 7). Στις καμπύλες, λόγω της γεωμετρίας της γραμμής, η έγγραφη 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 οριζόντιων και εγκάρσιων δυνάμεων ψευδό – ολίσθησης.

Η αύξηση των δυνάμεων ψευδό – ολίσθησης προκαλεί:

- θόρυβο κατά την κύλιση
- πρόσθετες φθορές στην επιφάνεια επαφής τροχού – σιδ/χιας και κόπωση των υλικών επαφής
- πέρα από μια ορισμένη τιμή, ολίσθηση των τροχών ,επαφή του όνυχας με την εσωτερική παρειά της σιδ/χιας, και εμφάνιση δυνάμεων καθοδήγησης.



σχήμα 7 *Εγκάρσιες και οριζόντιες δυνάμεις ψευδό - ολίσθησης*

Στην περίπτωση που καμπύλη δεδομένης ακτίνας **R** και υπερύψωσης **D** κυκλοφορεί με ταχύτητα **V**, τότε δημιουργείται γενικώς μια μη αντισταθμισμένη φυγόκεντρη πλάγια επιτάχυνση **a_q**, η οποία ωθεί τους επιβάτες και τα εμπορεύματα προς την εξωτερική / εσωτερική πλευρά της καμπύλης και έχει τιμή :

$$a_q = \left[\frac{V^2}{13R} \right] - \left[\frac{D}{102 \times \alpha} \right] \quad [3.4.3.4]$$

είναι :

a_q [m/sec²] , V [km/h] , D [mm] , $\alpha=1,5m$

Με $\alpha=1,5 m$ ο τύπος [3.4.3.4] γίνεται :

$$a_q = \left[\frac{V^2}{13 R} \right] - \left[\frac{D}{153} \right] \quad [3.4.3.5]$$

Εάν η a_q είναι θετική, η μη αντισταθμισμένη επιτάχυνση κατευθύνεται προς την εξωτερική πλευρά της καμπύλης και αν είναι αρνητική προς την εσωτερική πλευρά.

Παράδειγμα:

-για $R=400 m$, $D=100mm$ και $V=80 km/h$ είναι

$$a_q = 80^2 / 13 \times 400 - 100 / 153 = +0,58 m/sec^2$$

-για $R=3000 m$, $D=160 mm$ και $V=250 km/h$ είναι

$$a_q = 250^2 / 13 \times 3000 - 160 / 153 = +0,55 m/sec^2$$

Για δεδομένη ακτίνα καμπύλης R και ταχύτητα V , υπάρχει μια συγκεκριμένη υπερύψωση η οποία θεωρητικά μηδενίζει την επιτάχυνση αυτή ($a_q=0$). Η υπερύψωση αυτή καλείται θεωρητική (εξισωτική) υπερύψωση D_θ , διότι εξισορροπεί την φυγόκεντρο δύναμη και υπολογίζεται από τον τύπο [3.4.3.5] όταν τεθεί και επιλυθεί ως προς D όποτε έχουμε :

$$D_\theta = \frac{11,8}{R} V^2 \quad [3.4.3.6]$$

είναι (D σε mm, V σε km/h, και R σε m)

Κατόπιν τούτου για το παραπάνω παράδειγμα έχουμε:

$$D_0 = 11,8 \times 80^2 / 400 = 189 \text{ mm}$$

Γενικώς η θεωρητική υπερύψωση δεν ανταποκρίνεται με την εφαρμοζόμενη στην πράξη και τούτο διότι οι συρμοί κυκλοφορούν με διαφορετικές ταχύτητες στην ίδια γραμμή. Αυτό έχει σαν συνέπεια στις καμπύλες να επενεργεί πάντοτε μια μη αντισταθμισμένη επιτάχυνση η οποία όμως δεν επιτρέπεται να είναι πολύ μεγάλη διότι επηρεάζει την προσφερόμενη ποιότητα (ενοχλεί τους επιβάτες και μετατοπίζει τα φορτία με ότι αυτό συνεπάγεται) και σε ακραίες περιπτώσεις μπορεί ακόμη να προκληθεί και ανατροπή βαγονιών, γι' αυτό τίθενται ανώτερα και κατώτερα σταθερά όρια γι' αυτή την επιτάχυνση a_q .

Για το κατώτερο όριό της a_{qu} (επιτάχυνση προς το εσωτερικό της καμπύλης), επιτρέπεται μεγαλύτερη τιμή έναντι της επιτρεπόμενης τιμής του ανώτερου ορίου αυτής a_{qo} (επιτάχυνση προς το εξωτερικό τις καμπύλης), διότι η επιτάχυνση a_{qu} εμφανίζεται σε μικρή ταχύτητα ή σε διαδικασία ακινητοποίησης του συρμού ($V=0$) όπου οι δυναμικές επιδράσεις είναι μικρές και δεν αντιμετωπίζεται κίνδυνος εκτροχίασης από αναπήδηση του τροχού εκτός γραμμής (αναπήδηση σιδ/χίας από τον όνυχα του τροχού).

Η θεωρητική τιμή της υπερύψωσης εφαρμόζεται μόνο, όταν υφίσταται επαρκείς πρόβλεψη ότι οι συρμοί θα κινούνται με ομοιόμορφες ταχύτητες, ίσες περίπου με την ταχύτητα μελέτης (συνήθως στα δίκτυα Μητροπολιτικών Σιδηροδρόμων ΜΣ). Στους Γερμανικούς Σιδ/μους DB και σε πολλά αλλά Σιδ/κα δίκτυα ισχύει ως κατώτερο όριο πλάγιας επιτάχυνσης $a_{qu} = - 0,98 \text{ m/sec}^2$ και ως ανώτερο όριο $a_{qo} = + 0,65 \text{ m/sec}^2$ ή ακόμα και την τιμή $a_q = 1 \text{ m/sec}^2$ σε δίκτυα πολύ υψηλών ταχυτήτων επειδή τα οχήματα προσφέρουν μεγαλύτερη άνεση στον επιβάτη στον εσωτερικό τους χώρο και οι επιβάτες στους συρμούς αυτούς είναι καθήμενοι.

Η προς το εσωτερικό της καμπύλης μέγιστη μη αντισταθμισμένη επιτάχυνση εμφανίζεται κατά την διαδικασία ακινητοποίησης ($V=0$) του συρμού και αυτό θα πρέπει πάντοτε να λαμβάνεται υπόψη στην επιλογή της μέγιστης επιτρεπόμενης υπερύψωσης, για τον ΟΣΕ $D_{max} = 160 \text{ mm}$ και σε ειδικές περιπτώσεις συρμών με πολύ υψηλές ταχύτητες μέχρι 180 mm (βλέπε πίνακα 12). Η ελάχιστη επιτρεπόμενη υπερύψωση για συμβατικές γραμμές και γραμμές υψηλών ταχυτήτων είναι αντίστοιχα :

$$D_{min} = \left[\frac{11,8 \text{ V}^2}{R} \right] - 105 \quad [3.4.3.7]$$

$$D_{min} = \left[\frac{11,8 \text{ V}^2}{R} \right] - 153 \quad [3.4.3.8]$$

Αυτό σημαίνει, όσον αφορά τον ΟΣΕ, ότι η υπερύψωση επιτρέπεται σε εξαιρετικές περιπτώσεις και μετά από έγκριση της ΔΓ (Διεύθυνσης Γραμμής), να είναι κατά 105 mm μικρότερη από την θεωρητική υπερύψωση D_0 του τύπου [3.4.3.6]. Γενικώς στον ΟΣΕ εφαρμόζεται για κάθε περίπτωση η υπερύψωση:[9]

$$D = [D_{\max} / (D_{\max} + \alpha_{\max})] D_0 = [160 / (160 + 105)] \times [11,8 \times V^2/R] =$$

$$D = \frac{7,12}{R} V^2 \quad [3.4.3.9]$$

Με βάση στοιχεία από τους Ιταλικούς Σιδ/μους FS στην περίπτωση μικτών σιδ/κών γραμμών η μη αντισταθμισμένη (φυγόκεντρη) επιτάχυνση a_q δίνεται από τον τύπο :

$$a_q = \frac{V_{\max}^2}{R} - \frac{V^2}{R} \quad [3.4.3.10]$$

Το μέγεθος αυτό είναι συνδεδεμένο με την άνεση των επιβατών και με τον τύπο του οχήματος (ειδικά από την ελαστικότητα, ευλυγισία του αμαξώματος και την θέση του κέντρου βάρους αυτού κτλ). Για οχήματα με αμάξωμα παλαιού τύπου παίρνει την τιμή $a_q = 0,6 \text{ m/sec}^2$, ενώ για νέους τύπους αμαξώματος (αυτοκινητάμαξες ή ηλεκτρικά τρένα) οι οριακές τιμές μπορούν να φθάσουν από $a_q = 0,8 \text{ m/sec}^2$ μέχρι και $a_q = 1,0 \text{ m/sec}^2$.

Στην περίπτωση που βρισκόμαστε σε γραμμές μικτής κυκλοφορίας με μέγιστες και ελάχιστες ταχύτητες, θεωρούμε σαν μια ταχύτητα ισορροπίας

$$V = \sqrt{\frac{V_{\max}^2 + V_{\min}^2}{2}} \quad [3.4.3.11]$$

(όπου $V_{\max}^2$ και $V_{\min}^2$ είναι μέγιστη και ελάχιστη ταχύτητα που διαγράφει ο συρμός στη γραμμή)

ενδεδειγμένη υποπολλαπλάσια της μέγιστης ταχύτητας, $V = c \cdot V_{\max}$ (με c να εξαρτάται από την αποδεκτή μη αντισταθμισμένη φυγόκεντρη επιτάχυνση και από την μέγιστη υπερύψωση την δοθείσα στην γραμμή) η σχέση [3.4.3.3] γίνεται:

$$D = 11,8 \cdot \frac{(c \cdot V_{\max})^2}{R} \quad [3.4.3.12]$$

Αυτή η σχέση επιτρέπει την επιλογή της απαιτούμενης υπερύψωσης και τον τύπο του οχήματος.

Θέτοντας για $R = R_{\min}$, $D = 160 \text{ mm}$ και βάζοντας $a_q = 0,60 \text{ m/sec}^2$ (για συρμό τοπικό) έχουμε το σύστημα:

$$D = 11,8 \cdot \frac{c^2 \cdot V_{\max}^2}{R} = 160 \text{ mm}$$

$$a_q = \frac{v_{\max}^2 - v^2}{R} = \frac{V_{\max}^2 - V^2}{12,96 R} = \frac{V_{\max}^2}{12,96 R} \cdot (1 - c^2) = 0,60$$

οπότε λύνοντας το σύστημα έχουμε :

$$\frac{V_{\max}^2}{R} = \frac{160}{11,8 \cdot c}$$

$$\frac{V_{\max}^2}{R} = \frac{0,60 \cdot 12,96}{1 - c^2}$$

και βρίσκουμε το c :

$$c = \sqrt{\frac{D}{153 \cdot a_q + D}} \approx 0,80 \quad [3.4.3.13]$$

όποτε για την τιμή αυτή του c η σχέση [3.4.3.12] και η σχέση $V = 0,291\sqrt{(D \cdot R)}$ γίνονται :

$$D = 7,552 \cdot \frac{V_{\max}^2}{R} = 160 \text{ mm} \rightarrow$$

$$\rightarrow V_{\max} = 4,60 \cdot \sqrt{R_{\min}} \quad [3.4.3.14]$$

όποτε για $a_q = 0,80 \text{ m/sec}^2$ προκύπτει, με βάση την παραπάνω διαδικασία, ότι $c = 0,75$ και για $a_q = 1 \text{ m/s}^2$ προκύπτει το $c = 0,71$ άρα:

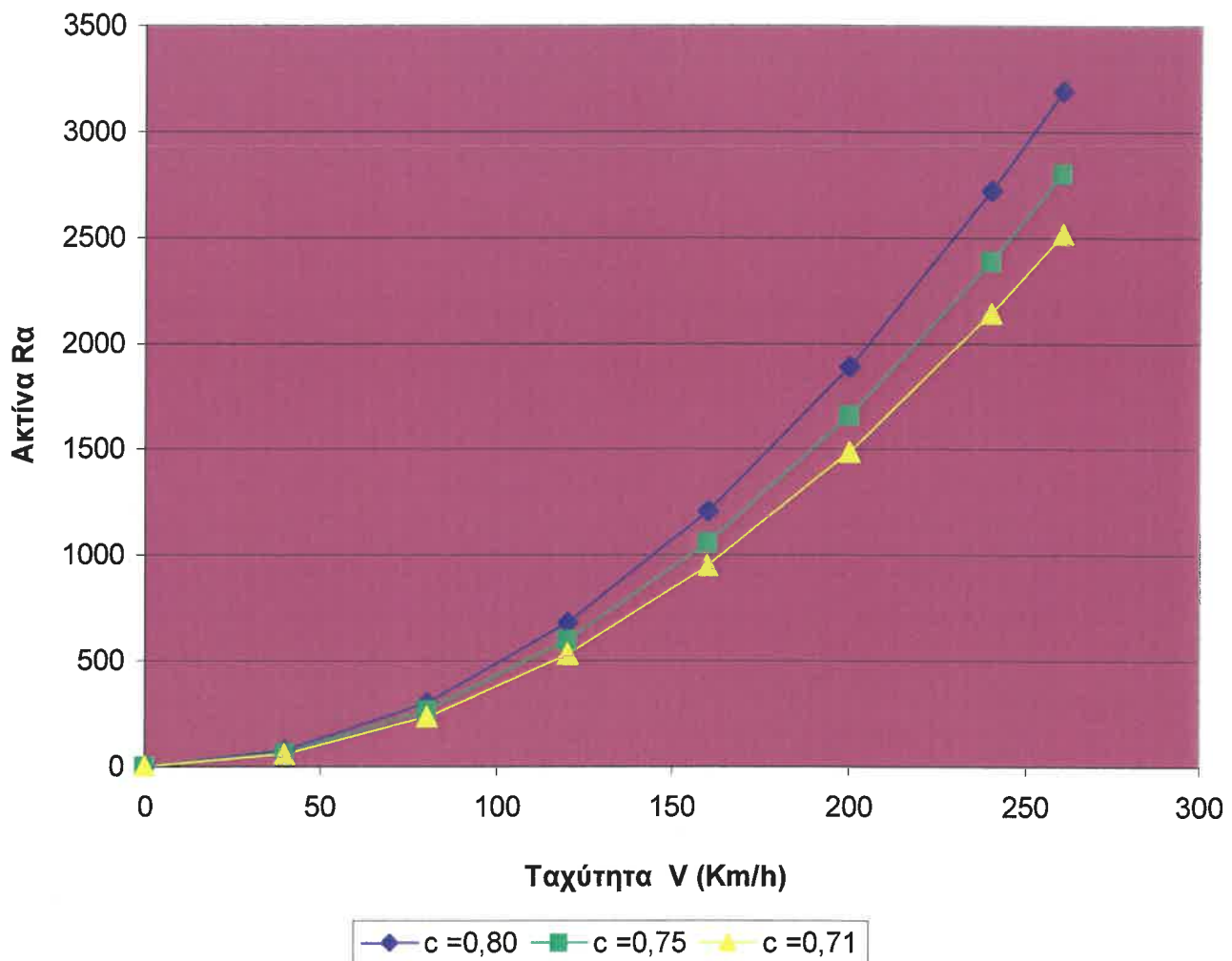
$$V_{\max} = 0,388 \sqrt{D \cdot R} = 4,908 \sqrt{R_{\min}} \quad \text{για } c=0,75 \quad [3.4.3.15]$$

και

$$V_{\max} = 5,18 \sqrt{R_{\min}} \quad \text{για } c=0,71 \quad [3.4.3.16]$$

Όποτε με βάση τους τύπους αυτούς προκύπτει στο διάγραμμα 21 την σχέση της μέγιστης ταχύτητας σε καμπύλη συναρτήσει της ακτίνας (με την μέγιστη υπερύψωση) για διαφορετικές τιμές της μη αντισταθμισμένης φυγόκεντρος επιτάχυνσης και $c = 0,8$, $c = 0,75$ και $c = 0,71$ για διαφορετικά είδη συρμών. Παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή του a_q τόσο μικραίνει ο συντελεστής c και στο διάγραμμα όσο πιο μεγάλη είναι η μη αντισταθμισμένη φυγόκεντρο επιτάχυνση τόσο μεγαλώνουν και ο τιμές της ακτίνας R και ανάλογα μεγαλώνει και η ταχύτητα. Αυτό προκύπτει και από τους παραπάνω τύπους όπου η ταχύτητα είναι μέγεθος ανάλογο της ακτίνας. [34]

Μέγιστη ταχύτητα V_{max} συναρτήσει της ακτίνας R και του συντελεστή c σε καμπύλη τροχιά



Διάγραμμα 21 Μέγιστη ταχύτητα V συναρτήσει της ακτίνας R και της μη αντισταθμισμένης πλευρικής επιτάχυνσης a_l σε καμπύλη τροχιά

3.4.4 Ανεπάρκεια υπερύψωσης I

Η υιοθέτηση της κανονικής υπερύψωσης έχει ως συνέπεια για τους μεν γρήγορους συρμούς να υπάρχει μια ανεπάρκεια υπερύψωσης, ενώ για τους αργούς συρμούς ένα πλεόνασμα υπερύψωσης. Η διάφορα μεταξύ της θεωρητικής υπερύψωσης για την μέγιστη ταχύτητα και της κανονικής υπερύψωσης ονομάζεται ανεπάρκεια υπερύψωσης I.

Για δοθείσες τιμές ακτίνας R και υπερύψωσης D η ανεπάρκεια υπερύψωσης θα πρέπει να καθορίζει την μέγιστη ταχύτητα σε μια καμπύλη ώστε:

$$I = \frac{11,8 V^2}{R} - D \leq I_{lim} \quad (\text{mm}) \quad [3.4.4.1]$$

Το I_{lim} μπορεί να αντικατασταθεί από την τιμή $(a_q)_{lim}$:

$$a_q = \frac{V_{max}^2}{12,96 R} - \frac{g D}{1500} = \frac{I}{153} \leq (a_q)_{lim} = \frac{I_{lim}}{153} \quad (\text{m/s}^2) \quad [3.4.4.2]$$

Η οριακή ανεπάρκεια υπερύψωσης I_{lim} παίρνει τιμές βάση του διαχωρισμού των συρμών ως προς τις ταχύτητες τους όπως φαίνεται στον πίνακα 9:

Κατηγορίες κυκλοφορίας ταχύτητα (km/h)		Συνιστώμενη οριακή τιμή ^a (mm)		Μέγιστη οριακή τιμή (mm)	
		Φορτία	Επιβάτες	Φορτία	Επιβάτες
Μικτές γραμμές κυκλοφορίας $80 \leq V \leq 120$	$R < 650$ m	110	130	130	160
	$R \geq 650$ m	110	150	130	165
Μικτές γραμμές κυκλοφορίας $120 < V \leq 160$		110	150	160 ^d	165
Μικτές γραμμές κυκλοφορίας $160 < V \leq 200$		110	150	160 ^d	165
Μικτές γραμμές κυκλοφορίας για επιβατικούς συρμούς $200 < V \leq 300$	$200 < V \leq 250$	100	100	150 ^d	150
	$250 < V \leq 300$	80	80	130 ^c	130 ^c
Μικτές γραμμές κυκλοφορίας για επιβατικούς συρμούς μέχρι 230 km/h (ή 250 km/h)*	$V \leq 160$	110	160 ^b	160 ^d	180 ^b
	$160 < V \leq 200$	X	140	X	160
	$200 < V \leq 230$	X	120	X	160
	$230 \leq V \leq 250$	X	100	X	150
Γραμμές υψηλών ταχυτήτων για επιβατικούς συρμούς $250 \leq V \leq 300$	$V = 250$	X	100	X	150
	$V > 250$	X	80	X	130 ^c

Πίνακας 9

πηγή EN 13803-1

Όπου

* αναφερόμαστε σε συρμούς με ειδικά μηχανικά χαρακτηριστικά

^a : για συνδέσεις γραμμών η ανεπάρκεια υπερύψωσης παίρνει τιμές όπως διευκρινίζονται από την σύμβαση

^b : αυτά τα όρια ανεπάρκειας υπερύψωσης θα εφαρμοστούν μόνο σε οχήματα με ειδικούς χαρακτηριστικούς μηχανισμούς όπως χαμηλό άξονα φορτίων, μάζες μη αιωρημένες, χαμηλό συντελεστή κύλισης.

^c : η ανεπάρκεια υπερύψωσης 130 mm μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για γραμμές χωρίς έρμα για ταχύτητες πάνω από 250 km/h.

^d : αυτές οι τιμές ισχύουν μόνο για εμπορευματικούς συρμούς με ειδικά χαρακτηριστικά των βαγονιών των οποίων η απόδοση είναι όμοια με τα οχήματα των επιβατικών συρμών.

Με βάση τον πίνακα 9 θα πρέπει να διατηρηθεί η ανεπάρκεια υπερύψωσης 20 mm κάτω από την συνιστώμενη οριακή τιμή. Ο πίνακας έχει δημιουργηθεί λαμβάνοντας υπόψη τις περισσότερες από τις μέγιστες περιοριστικές τιμές από διαφορετικούς Ευρωπαϊκούς Σιδ/μους σε εμπορική λειτουργία και για νέες και υπάρχουσες γραμμές (είτε για αναβάθμιση ταχύτητας γραμμών είτε για την βελτιστοποίηση των ταχυτήτων όπου, και οι δυο κατηγορίες, εμπορικά και επιβατικά τρένα χρησιμοποιούν τις ίδιες διαδρομές). Είναι δηλαδή μια εξεταστική διαδικασία οχημάτων για τη δυναμική συμπεριφορά αυτών στις τιμές που υποδεικνύονται. Όλες οι τιμές αυτές ισχύουν μόνο για την προοδευτική αύξηση της ανεπαρκείας υπερύψωσης για ταχύτητες πάνω από 80 km/h.

Οι τιμές I_{lim} και $a_{q\ lim}$ είναι υπολογισμένες με βάση τις ακόλουθες εκτιμήσεις:

➤ δυνάμεις σιδ/κης γραμμής και ασφάλεια

η ανεπάρκεια υπερύψωσης έχει επιπτώσεις στις κάθετες και πλευρικές δυνάμεις στην εξωτερική σιδ/χία και οι πλευρικές δυνάμεις στο δυναμικό φορτίο της γραμμής. Το μέγεθος των δυνάμεων αυτών, μεταξύ άλλων παραγόντων, εξαρτάται από :

1. τον τύπο δομής της γραμμής (ΣΣΣ ή σύνδεση γραμμής)
2. την κατάσταση συντήρησης γραμμής
3. την γεωμετρία γραμμής
4. την ανάρτηση οχήματος
5. το φορτίο αξόνων και τις μη αναρτημένες μάζες οχημάτων
6. τις συνθήκες συντήρησης οχημάτων

Οποιαδήποτε έγκριση μιας υψηλότερης τιμής του I θα προϋποθέτει ότι το τμήμα σιδ/χιων, τύπος στρωτήρα, απόσταση στρωτήρα, σύνδεσμοι σιδ/χιων, στρώμα έρματος και η ικανότητα μεταφοράς της υποδομής είναι κατάλληλη γι' αυτήν την υψηλότερη τιμή. Επιπλέον θεωρείται ότι οι πλευρικές δυνάμεις που ασκούνται από τους άξονες δεν υπερβαίνουν την φορτωμένη αντίσταση της γραμμής στην πλευρική παραμόρφωση. Αυτή η αντίσταση δεν είναι μονό μια λειτουργία δομής γραμμής, ειδικά ο τύπος υλικού έρματος, αλλά και ο βαθμός σταθεροποίησης έρματος.

- οικονομίες πτυχές της συντήρησης της σιδ/κης γραμμής
- ποιότητα άνεσης και προσθετό συντελεστή πλευρικής επιτάχυνσης για οχήματα με μη ελεγχόμενη ανάρτηση (s) [31]

Γενικά η ανεπάρκεια υπερύψωσης δίνεται από την σχέση:

$$I = D_{\theta} - D \quad [3.4.4.3]$$

τότε με βάση τον τύπο [3.4.3.8] σημαίνει ότι η οριακή τιμή της ανεπάρκειας της υπερύψωσης επιτρέπεται να είναι έως 105 mm το πολύ (για τους DB ισχύει 130 mm). Με την ανεπάρκεια υπερύψωσης η οποία ισούται με το γινόμενο της μη αντισταθμισμένης (εξισορροπημένης) επιτάχυνσης (για τον ΟΣΕ 0,7m/sec) επί το εύρος της γραμμής (150 cm περίπου), οι γρήγορες αμαξοστοιχίες των οποίων η απαιτούμενη υπερύψωση D_{θ} είναι μεγαλύτερη από την υπάρχουσα στη γραμμή, ασκούν επί της γραμμής και προς το εξωτερικό της καμπύλης εγκάρσιες δυνάμεις ανάλογες προς την ανεπάρκεια της υπερύψωσης I . Η εξωτερική σιδ/χια υπερφορτώνεται οι δε επιβάτες υποβάλλονται σε εγκάρσια επιτάχυνση στην οποία είναι ευαίσθητοι. Για μικρή ταχύτητα V ή μεγάλη ακτίνα R μπορεί η $D_{\min}$ να είναι αρνητική (υποβίβαση), η πραγματική υπερύψωση πρέπει πάντοτε και για κάθε περίπτωση να κυμαίνεται μεταξύ $D_{\min}$ και $D_{\max}$.

Το ερώτημα που τίθεται, όμως, είναι ποια τελικώς υπερύψωση επιλέγεται για δεδομένη κατάσταση κυκλοφορίας;

Σε τμήματα γραμμής στα οποία η κυκλοφορία όλων των τρένων διεξάγεται σχεδόν με την ίδια ταχύτητα π.χ. τρένα για κυκλοφορία πόλεων, γραμμές που εξυπηρετούν μόνον εμπορική κυκλοφορία κλπ, επιλέγεται βεβαίως η θεωρητική υπερύψωση (εξισωτική) η οποία υπολογίζεται από τον τύπο [3.4.3.6]. Επειδή όμως οι σιδ/κές γραμμές των περισσότερων δικτύων είναι μικτής κυκλοφορίας δηλαδή κυκλοφορούν όλων των ειδών τα τρένα, εμπορικά με μικρές ταχύτητες έως 100 km/h, επιβατικά με ταχύτητες μέχρι 160 km/h και τρένα υψηλών ταχυτήτων πάνω από 200 km/h, η εφαρμογή για παράδειγμα της θεωρητικής υπερύψωσης D_{θ} που αντιστοιχεί στους γρήγορους συρμούς θα ήταν πολύ μεγάλη για τους υπόλοιπους συρμούς με συνέπεια την πρόσθετη καταπόνηση

των εσωτερικών σιδ/χιων στις καμπύλες και την αύξηση των προβλημάτων και των δαπανών συντήρησης της γραμμής. Εάν όμως εφαρμοστεί μια μέση υπερύψωση D , τότε θα έχουμε για μεν τα γρήγορα τρένα μια θετική μη αντισταθμισμένη φυγόκεντρο επιτάχυνση a_q (πρόσθετη καταπόνηση εξωτερικής σιδ/χίας) για δε αργά τρένα μια αρνητική μη αντισταθμισμένη φυγόκεντρο επιτάχυνση $-a_q$ (πρόσθετη καταπόνηση εσωτερικής σιδ/χίας).

Από άποψη σιδ/κης τεχνικής, ευνοϊκότερο θα είναι – αφού ληφθούν υπόψη όλα τα μετακινούμενα επί της γραμμής φορτία – να εφαρμοστεί τέτοια υπερύψωση ώστε η πρόσθετη καταπόνηση των σιδ/χιων να έχει την ίδια τιμή για όλες τις περιπτώσεις. [9]

Οπότε, λοιπόν, στην περίπτωση μικτής κυκλοφορίας συρμών η επιλογή της υπερύψωσης πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο, ώστε να μην πραγματοποιηθεί υπέρβαση των οριακών τιμών $D_{\min}$ και $D_{\text{επ}}$ ($D_{\text{επ}}$ = επιτρεπόμενη υπερύψωση)

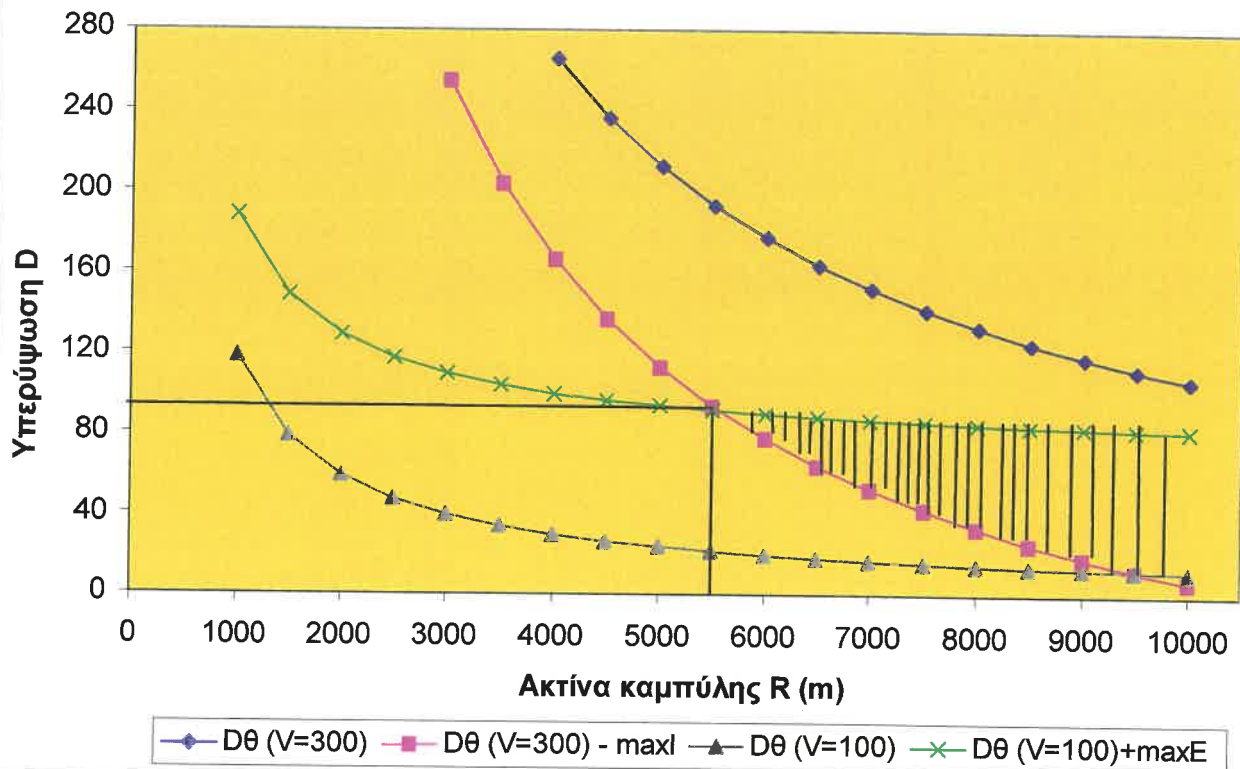
$$D_{\min} = D_{\theta} - I \quad [3.4.4.4]$$

$$D_{\text{επ}} = D_{\theta} + E \quad [3.4.4.5]$$

Προς τούτο η $D_{\min}$ υπολογίζεται με την μέγιστη ταχύτητα $V_{\max}$, ενώ η $D_{\text{επ}}$ από την ταχύτητα γενικά των εμπορικών συρμών, η οποία θεωρείται $V_{\min}$. Ενδιάμεσες ταχύτητες δεν λαμβάνονται συνήθως υπόψη.

Απεικονίζονται οι συνθήκες [3.4.4.4] και [3.4.4.5] στο διάγραμμα 22, διάγραμμα ακτίνας R και υπερύψωσης D για ταχύτητες $V_{\max} = 300 \text{ km/h}$ και $V_{\min} = 100 \text{ km/h}$ προκύπτει η διαγραμμισμένη περιοχή ισχύος της κανονικής υπερύψωσης. Στην περιοχή αυτή η υπερύψωση δεν είναι μονοσήμαντη. Εξαίρεση αποτελεί το σημείο τομής των καμπυλών $D_{\min}$ και $D_{\text{επ}}$, το οποίο αντιστοιχεί στην ελάχιστη ακτίνα $R_{\min}$ και στην συσχετιζόμενη υπερύψωση $D_{(R_{\min})}$. Η υπερύψωση αυτή πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση των 180 mm (για γραμμές υψηλών ταχυτήτων) ή όποιας άλλης έχει ορισθεί ως μέγιστη κατασκευαστική τιμή (για τον ΟΣΕ $D=160\text{mm}$).

**Υπερύψωση για μικτή κυκλοφορία συρμών (V=300 Km/h
,V=100Km/h)**



Διαγρ. 22 Υπερύψωση για μικτή κυκλοφορία συρμών διάφορων ταχυτήτων ($V_{max}=300\text{km/h}$, $V_{min}=100\text{km/h}$)

Η ελάχιστη αυτή ακτίνα υπολογίζεται, εφόσον εξισώσουμε τους τύπους [3.4.4.4] και [3.4.4.5] δηλαδή:

$$D_{min} = D_{\epsilon\pi\tau} \rightarrow \frac{11,8 \cdot V_{max}^2}{R} - I = \frac{11,8 \cdot V_{min}^2}{R} + E \rightarrow$$

$$\rightarrow R_{min} = 11,8 \frac{V_{max}^2 - V_{min}^2}{I + E} \quad [3.4.4.6]$$

και η υπερύψωση για την ελάχιστη ακτίνα προκύπτει αν στην σχέση [3.4.4.6] εισάγουμε τις σχέσεις του D_{min} και $D_{\epsilon\pi\tau}$ δηλαδή :

$$D_{\max} = (I + E) \frac{V_{\max}^2}{V_{\max}^2 - V_{\min}^2} - I \quad [3.4.4.7]$$

Αυτή είναι η υπερύψωση στο σημείο τομής των καμπυλών $D_{\theta} (V=300) - \max I$ και $D_{\theta} (V=100) + \max E$, όπως διακρίνεται στο διάγραμμα 22.

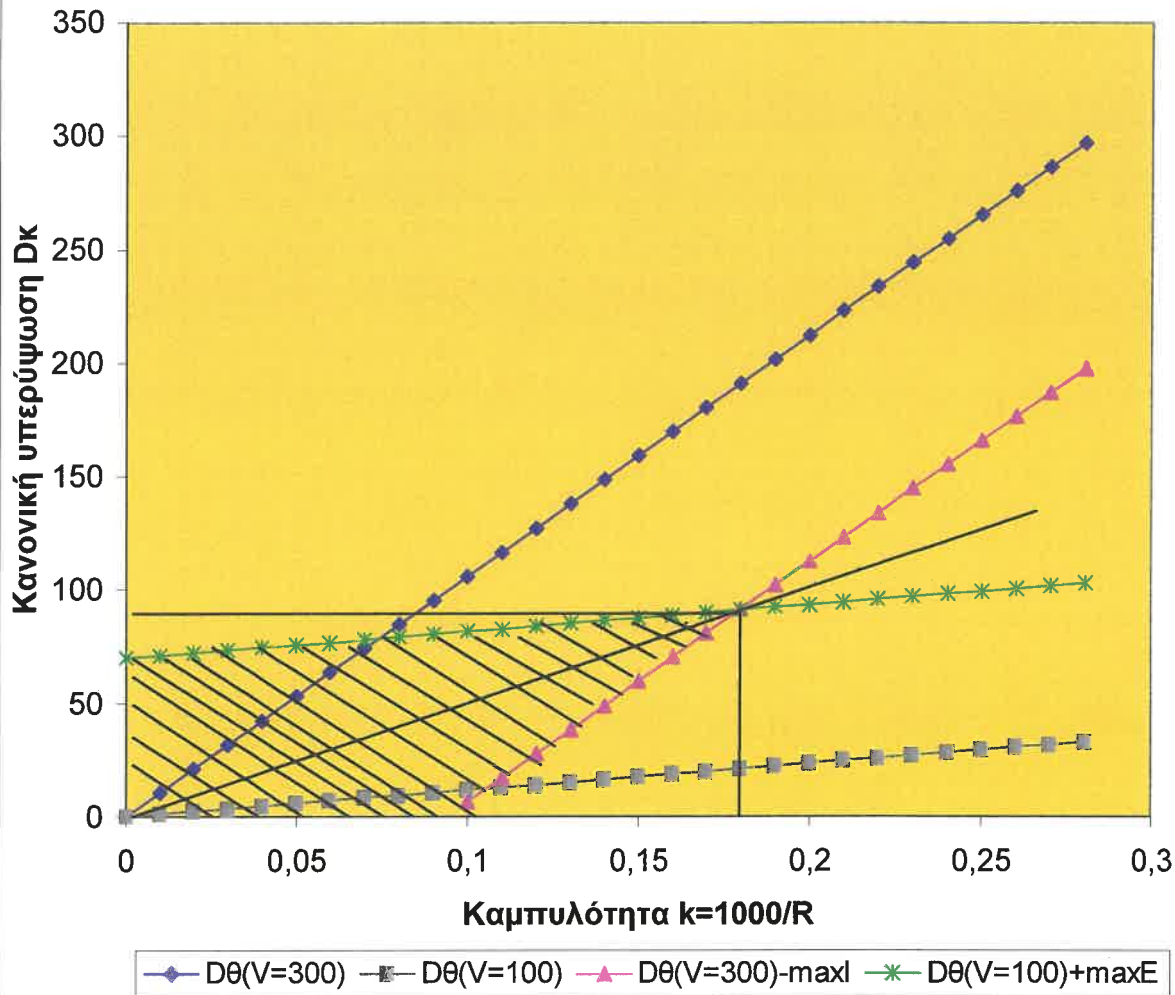
Επειδή η $D_{\max}$ μπορεί να ορισθεί ανεξάρτητα της $R_{\min}$ θεωρείται πρακτικότερο να υπολογισθεί κατ'αρχήν η $D_{\max}$, διότι, στην περίπτωση που προκύψει μεγαλύτερη από 160 mm ή 180 mm (για ειδικές περιπτώσεις υψηλών ταχυτήτων) τότε θα πρέπει να επαναυπολογισθεί.

Η σχέση [3.4.4.6] μετασχηματίζεται με την βοήθεια της [3.4.4.7] και προκύπτει:

$$R_{\min} = \frac{11,8 \cdot V_{\max}^2}{D_{\max} + I} \quad [3.4.4.8]$$

Για την $R_{\min}$ η υπερύψωση αυτή δεν είναι μονοσήμαντη αλλά μπορεί να θεωρηθεί ανεπαρκής για υψηλές ταχύτητες. Για να υπάρχει και στην περιοχή $D > D_{\min}$, γραμμικοποιείται το διάγραμμα 22. Προς τούτο ο άξονας των x εκφράζεται με την καμπυλότητα $k = (1000/R)$ (βλέπε διάγραμμα 23).

Καθορισμός της κανονικής υπερύψωσης D_k



διάγραμμα 23

Καθορισμός της κανονικής υπερύψωσης D_k

Στο διάγραμμα αυτό οι θεωρητικές υπερυψώσεις για 300 Km/h και 100Km/h απεικονίζονται ως ευθείες που διέρχονται από την αρχή των αξόνων. Παράλληλα προς αυτές διατρέχουν οι D_{min} κάτω από την θεωρητική υπερύψωση για ταχύτητα 300 Km/h και η $D_{επ}$ πάνω από την θεωρητική για ταχύτητα 100 km/h. Η τομή των δυο έχει τις συντεταγμένες $D_{max} = 91,98 \text{ mm}$ και ακτίνα $R_{min} \approx 5550 \text{ m}$. Η σύνδεση του σημείου τομής με την αρχή των συντεταγμένων δίνει την ευθεία για την κανονική υπερύψωση D_k . Η επιλογή της κανονικής υπερύψωσης επί της ευθείας αυτής διατηρεί την σχέση I / E περίπου σταθερή. Στην περιοχή $R > R_{min}$ ισχύει ότι η κανονική υπερύψωση προς την καμπυλότητα είναι ανάλογη της D_{max} προς $1000 / R_{min}$. Επομένως μπορεί να γράφει:

$$D_k = \frac{D_{max} \cdot R_{min}}{R}$$

[3.4.4.9]

Οπότε θέτοντας στις σχέσεις [3.4.4.8] και [3.4.4.9] την ανεπάρκεια υπερύψωσης Ι ίση με 105 mm και $D_{\max} = 160 \text{ mm}$, προκύπτει η σχέση της κανονικής υπερύψωσης για τις δυο περιπτώσεις :

$$D_k = 7,12 \frac{V_{\max}^2}{R} \quad [3.4.4.10]$$

Οπότε από τα παραπάνω προκύπτει ότι για τις διαφορετικές κατηγορίες συρμών με διαφορετικές ταχύτητες που υφίστανται σε ένα τέτοιο δίκτυο υψηλών ταχυτήτων θα εμφανίζεται συνεχώς πλεόνασμα ή ανεπάρκεια υπερύψωσης, που στην προκείμενη περίπτωση οι συρμοί των υψηλών ταχυτήτων θα υπόκεινται συνεχώς σε μια ανεπάρκεια υπερύψωσης μεγάλη με αποτέλεσμα μεγάλη να είναι και η καταπόνηση που θα δέχεται η εξωτερική σιδ/χια. Συνέπεια αυτού είναι οι σιδ/χίες στην καμπύλη γραμμή να καταπονούνται πλευρικά αφενός, αφετέρου δε η εσχάρα θα δέχεται πλάγιες δυνάμεις προς την μια ή την άλλη κατεύθυνση. Άρα είναι δύσκολο να συνυπάρχουν συρμοί αυτού του είδους σε ένα δίκτυο υψηλών ταχυτήτων μικτής κυκλοφορίας.

Ακολουθεί αριθμητικό παράδειγμα που έχει σκοπό την εύρεση της υπερύψωσης στην περίπτωση γραμμών με μικτή κυκλοφορία συρμών.

Έστω ότι ημερησίως διέρχονται από την γραμμή τα παρακάτω φορτία σε τόνους (t):

Φ_1 με ταχύτητα V_1

Φ_2 με ταχύτητα V_2

Φ_3 με ταχύτητα V_3

.....
.....

Φ_n με ταχύτητα V_n

Το συνολικό φορτίο είναι :

$$\Phi = \sum \Phi_i \quad [3.4.4.11]$$

Και η ευνοϊκότερη υπερύψωση είναι :

$$D_m = \frac{11,8}{R \Phi} \times \sum (\Phi_i \times V_i^2) \quad [3.4.4.12]$$

(D_m σε mm, Φ σε t, V σε km/h, R σε m)

Εάν η υπολογισθείσα από τον τύπο [3.4.4.12] υπερύψωση D_m είναι μικρότερη από την D_{min} του τύπου [3.4.3.7], τότε θα πρέπει να εφαρμοστεί κατ' ελάχιστον η υπερύψωση D_{min} .

Η υπερύψωση D_m είναι κατ' αρχήν σωστή, αλλά δεν εφαρμόζεται από τα Σιδ/κα δίκτυα για τους εξής δυο λόγους:

1. Επειδή σε δεδομένη γραμμή οι σχέσεις εκμετάλλευσης είναι δυνατόν να διαφοροποιηθούν από την μια δρομολογιακή περίοδο στην άλλη, δεν είναι δυνατόν, για οικονομικούς κυρίως λόγους, να μεταβάλλονται κάθε φορά και οι υπερυψώσεις, γι' αυτό οι εφαρμοζόμενες υπερυψώσεις δεν συμπίπτουν πάντοτε με την μέση υπερύψωση D_m .
2. Γίνεται προσπάθεια από τα Σιδ/κα δίκτυα να διαμορφώνονται σχέσεις ευνοϊκές για τα γρήγορα τρένα ώστε να αυξάνεται η προσφερόμενη προς τους επιβάτες ποιότητα, με αύξηση βέβαια της αρνητικής επιτάχυνσης - a_q για τα αργά τρένα.

Ως εκ τούτου οι DB για τις μεγάλες δρομολογιακές ταχύτητες χρησιμοποιούν σαν εφαρμοζόμενη υπερύψωση τα 2/3 περίπου της υπερύψωσης D_θ (τύπος [3.4.3.6]), δηλαδή:

$$D = 0,6 D_\theta = \frac{7,1 V^2}{R} \leq D_{max} \quad [3.4.4.13]$$

Είναι D =εφαρμοζόμενη υπερύψωση σε mm, V = επιτρεπόμενη μέγιστη ταχύτητα γρήγορων τρένων σε km/h, R σε m και ταυτόχρονα τίθεται περιορισμός της D : Δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από την D_{min} (τύπος [3.4.3.7] και μεγαλύτερη από την $D_{max}=160$ mm, εντός Σιδ/κου σταθμού είναι 100 mm (**στους DB : Σκυρογραμμή = 160mm., Σ.Ε. = 170 mm, Αποβάθρες = 100mm**). Έτσι οι τύποι [3.4.3.8] και [3.4.4.13] ισχύουν μόνον μεταξύ αυτών των ορίων.

Παράδειγμα

➤ Συμβατικοί συρμοί

Δίνονται, $R = 1000 \text{ m}$, ημερήσιο φορτίο $\Phi = 43000 \text{ t}$ μεταφερόμενο ως εξής:

$$\Phi_1 = 8.000 \text{ t} \quad \mu\epsilon \quad V_1 = 120 \text{ km/h}$$

$$\Phi_2 = 10.000 \text{ t} \quad \mu\epsilon \quad V_2 = 80 \text{ km/h}$$

$$\Phi_3 = 25.000 \text{ t} \quad \mu\epsilon \quad V_3 = 60 \text{ km/h}$$

Από τον τύπο [3.4.4.5] έχουμε

$$D_m = 11,8 \times 269200000 / 1000 \times 43000 = 74 \text{ mm}$$

αυτή η υπερύψωση μπορεί να εφαρμοστεί διότι είναι μεγαλύτερη από την

$$D_{\min} = [11,8 \times 120^2 / 1000] - 105 = 65 \text{ mm}$$

Αυτό όμως δεν συμβαίνει πάντοτε και μάλιστα όταν στη γραμμή αυτή κυκλοφορούν και συρμοί με υψηλές ταχύτητες. Ας θεωρηθεί στο παραπάνω παράδειγμα ότι εκτός των δεδομένων τρένων κυκλοφορούν και δυο ακόμη τρένα με συνολικό φορτίο $\Phi = 360 \text{ t}$ και $V = 140 \text{ km/h}$. Στην περίπτωση αυτή ο υπολογισμός δίνει $D_m = 75 \text{ mm}$ (αντί 74 mm) και η ελάχιστη απαιτούμενη υπερύψωση για $V = 140 \text{ km/h}$ είναι :

$$D_m = [11,8 \times 140^2 / 1000] - 105 = 127 \text{ mm}$$

Στο παραπάνω παράδειγμα καμπύλης με ακτίνα $R = 1000 \text{ m}$ και $V = 120 \text{ km/h}$ η εφαρμοζόμενη υπερύψωση, σύμφωνα με τους τύπους [3.4.3.8] και [3.4.4.13], είναι :

$$D = 7,12 V^2 / R = 7,12 \times 120^2 / 1000 = 103 \text{ mm}$$

Αυτή είναι αρκετά μεγαλύτερη από την υπολογισθείσα $D_m = 75 \text{ mm}$ και έτσι η ανεπάρκεια της υπερύψωσης για τα γρήγορα τρένα είναι μόνον $I = 67 \text{ mm}$
 $\{I = D_\theta - D = [11,8 \times 120^2 / 1000] - 103 = 67 \text{ mm}\}$ αντί $I = 96 \text{ mm}$ για $D_m = 74 \text{ mm}$.
Με τον τρόπο αυτό ότι αυξάνεται η ανεπάρκεια υπερύψωσης I , φυσικό, εφόσον η γραμμή διανύεται και από συρμούς με πιο μεγάλη ταχύτητα από αυτές που επικρατούν. Άρα σε συμβατικές γραμμές αύξηση της ταχύτητας έχει σαν αποτέλεσμα να αυξάνεται η ανεπάρκεια υπερύψωσης και οι συρμοί να συναντούν δυσκολίες στην μετακίνησή τους.

➤ **Συρμοί υψηλών ταχυτήτων**

Στην περίπτωση γραμμών υψηλών ταχυτήτων θα είναι :

Για $\Phi = 10000 \text{ t}$ και ακτίνα $R = 4000 \text{ m}$ έχουμε :

$$\Phi_1 = 2000 \text{ t με } V_1 = 280 \text{ km/h}$$

$$\Phi_2 = 3000 \text{ t με } V_2 = 250 \text{ km/h}$$

$$\Phi_3 = 5000 \text{ t με } V_3 = 200 \text{ km/h}$$

$$D_m = 11,8 \times 544300000 / 4000 \times 10000 = 160.56 \text{ mm}$$

η οποία υπερύψωση μπορεί να εφαρμοστεί εφόσον είναι μεγαλύτερη από την

$$D_{\min} = [11,8 \times 280^2 / 4000] - 105 = 231,28 - 105 = 126,26 \text{ mm}$$

Στην περίπτωση εμφάνισης συρμού με μικρότερη ταχύτητα, δηλαδή $V = 160 \text{ km/h}$ και $\Phi_4 = 5000 \text{ t}$ όποτε συνολικό φορτίο $\Phi = 15000 \text{ t}$ τότε για την γραμμή θα ισχύει με βάση τους παραπάνω υπολογισμούς :

$$D_m = 109,53 \text{ mm (αντί } 160, 56 \text{ mm)}$$

και για το $D_{\min}$ θα ισχύει

$$D_{\min} = 126,26 \text{ mm}$$

που σημαίνει ότι εφόσον η D_m είναι μικρότερη δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και κάνουμε χρήση της $D_{\min}$.

Για την εφαρμοζόμενη υπερύψωση θα είναι:

$$D = 7,12 \times V^2 / R = 7,12 \times 280^2 / 4000 = 139,55 \approx 140 \text{ mm}$$

Αυτή η υπερύψωση είναι αρκετά μεγαλύτερη από την $D_m = 109,53 \text{ mm}$ και έτσι η ανεπάρκεια υπερύψωσης στην προκειμένη περίπτωση θα είναι :

$$I = D_{\theta} - D = [11,8 \times 280^2 / 4000] - 140 = 91,28 \text{ mm}$$

[9]

3.4.5 Ρυθμός μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου dD / dt

Η μεταβολή της υπερύψωσης παρουσιάζεται σε καμπύλες συναρμογής. Ενδέχεται όμως να δοθεί υπερύψωση σε καμπύλες μετάβασης και ευθείες. Για ομοιόμορφη κλίση πρανούς, δηλαδή, για γραμμική μεταβολή της υπερύψωσης η ακόλουθη σχέση με το ΔD που συμβολίζει την μεταβολή υπερύψωσης είναι:

$$\frac{dD}{dt} = \frac{\Delta D \cdot V_{\max}}{3,6 \cdot L} \leq \left(\frac{dD}{dt} \right)_{\lim} \quad (\text{mm/s}) \quad [3.4.5.1]$$

για κλίση πρανούς μεταβλητή, μη γραμμική μεταβολή της υπερύψωσης, η τιμή του dD / dt δεν είναι σταθερή. Συνήθως αυτές οι μεταβάσεις δεν εφαρμόζονται σε μικρές μεταβολές υπερύψωσης. Η τιμή του dD / dt θα επιλεγθεί λαμβάνοντας υπόψη την άνεση και την δυνατότητα μιας μη βέλτιστης κλίνης γραμμής .
Ανάλογα με τις ταχύτητες των συρμών και το αν έχουμε ομοιόμορφη ή μεταβλητή κλίση πρανούς γίνεται ο διαχωρισμός των τιμών του ρυθμού μεταβολής της υπερύψωσης σύμφωνα με τον πίνακα 10 και 11 :

Κατηγορίες κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας $80 \leq V \leq 120$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας $120 < V \leq 200$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς συρμούς $200 < V \leq 300$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς συρμούς * $V \leq 230(\text{ή} 250)$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για υψηλές ταχύτητες $250 \leq V \leq 300$
(ταχύτητα σε km/h)					
Συνιστώμενη οριακή τιμή [mm/s]	50	50	50	50	50
Μέγιστη οριακή τιμή [mm/s]	55	60	60	60	60

Πίνακας 10

πηγή ENV 13803-1

Υπερύψωση με ομοιόμορφη κλίση πρανούς (γραμμική μεταβολή

Κατηγορίες κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας $80 \leq V \leq 120$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας $120 < V \leq 200$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς συρμούς $200 < V \leq 300$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς συρμούς *	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για υψηλές ταχύτητες $250 \leq V \leq 300$
Συνιστώμενη οριακή τιμή [mm/s]	55	55	55	55	55
Μέγιστη οριακή τιμή [mm/s]	70	70	70	70	70

Πίνακας 11

πηγή ENV 13803-1

Υπερύψωση με μεταβλητή κλίση πρανούς (μη γραμμική μεταβολή)

Παρατηρούμε ότι η υπερύψωση στα τμήματα μετάβασης παίρνει διάφορες τιμές ανάλογα με την καμπυλότητα, καθώς και το γεγονός ότι λόγω της περιορισμένης εμπειρίας για τις συναρμογές με τις μεταβλητές κλίσεις, οι τιμές του πίνακα είναι ενδεικτικές. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στις υψηλότερες σε διάφορες χώρες. Επίσης διαφαίνεται ότι οι τιμές του ρυθμού μεταβολής της υπερύψωσης για μεταβλητή κλίση πρανούς έχει μεγαλύτερες μέγιστες και ελάχιστες τιμές εφόσον δεν έχουμε γραμμική μεταβολή της υπερύψωσης. [29]

3.4.6 Ρυθμός μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του μήκους dD /dl

Η μετάβαση από ένα τμήμα γραμμής με μηδενική υπερύψωση, σε άλλο με υπερύψωση D , καθώς και η μετάβαση από τμήμα γραμμής με υπερύψωση D_1 σε τμήμα με υπερύψωση D_2 (μεγαλύτερη ή μικρότερη), πραγματοποιείται με ευθύγραμμο πρανές υπερύψωσης σύμφωνα με τον Ν.Κ.Ε.Γ. (Νέο Κανονισμό Επιδομής Γραμμής). Η μεταβολή της υπερύψωσης ανά μονάδα μήκους ονομάζεται κλίση του πρανούς υπερύψωσης και εκφράζεται με τον λόγο dD/dl όπου dD η μεταβολή της υπερύψωσης, που αντιστοιχεί σε μήκος συναρμογής dl . [33]

Στην προκειμένη περίπτωση θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η πιο οριακή τιμή με βάση την άνεση και την ασφάλεια:

a) παρατήρηση απαιτήσεων ασφαλείας :

σε μικρές καμπύλες συναρμογής, η μέγιστη τιμή της μεταβολής της υπερύψωσης π.χ. dD/dl σε μεταβλητές κλίσεις πρανούς ή $\Delta D/L$ στην περίπτωση ομοιόμορφων κλίσεων, θα πρέπει να ταυτισθεί η ασφάλεια σε σχέση με τον εκτροχιασμό αργών εμπορευματικών συρμών. [32]

b) παρατήρηση απαιτήσεων άνεσης :

οι ακόλουθες τιμές έχουν αντληθεί από τον πίνακα 14 χρησιμοποιώντας την σχέση :

$$\frac{dD}{dl} = \frac{3,6 \cdot dD}{V_{\max} \cdot dt} \quad (\text{mm/m}) \quad [3.4.6.1]$$

με αναφορά στα α) και β) και λαμβάνοντας υπόψη τον τύπο του οχήματος, οι τιμές είναι :

- **συνιστάμενη οριακή τιμή :** **2,25 mm/m**
- **μέγιστη οριακή τιμή :** **2,5 mm/m**

3.4.7 Ρυθμός μεταβολής της ανεπάρκειας υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου dl/dt

Για συναρμογές με ομοιόμορφη μεταβολή της καμπυλότητας και ομοιόμορφη μεταβολή της ανεπάρκειας, έχει αντληθεί η ακόλουθη σχέση, όπου Δl η μεταβολή της ανεπάρκειας υπερύψωσης :

$$\frac{dl}{dt} = \frac{V_{\max}}{3,6 \cdot L} \cdot \Delta l \leq \left(\frac{dl}{dt} \right)_{\lim} \quad (\text{mm/s}) \quad [3.4.7.1]$$

Παρομοίως, η μεταβολή της μη αντισταθμισμένης φυγόκεντρης επιτάχυνσης στην επιφάνεια της γραμμής έχει καθοριστεί από την ολική μεταβολή της φυγόκεντρης επιτάχυνσης Δa_q κατά μήκος όλης της συναρμογής όπως :

$$\frac{da_q}{dt} = \frac{V_{\max}}{3,6 \cdot L} \cdot \Delta a_q \leq \left(\frac{da_q}{dt} \right)_{\lim} \quad (\text{m/sec}^3) \quad [3.4.7.2]$$

Οι τιμές dl/dt και da_q/dt δεν είναι σταθερές για συναρμογές με μη γραμμική μεταβολή της καμπυλότητας και μη γραμμική μεταβολή της υπερύψωσης. Πραγματοποιούν τις μέγιστες τιμές τους στην μέση της καμπύλης συναρμογής. Για τους γρήγορους επιβατικούς συρμούς, οι επιλεγμένες τιμές για $(dl/dt)_{\lim}$ θα πρέπει να σχετίζονται με την άνεση στην περίπτωση κατά την οποία επικρατούν συνθήκες μη βέλτιστης κλίσης της γραμμής.

Η τιμή $(dl/dt)_{lim}$ θα πρέπει να τεθεί λαμβάνοντας υπόψη τον προσθετό συντελεστή πλευρικής επιτάχυνσης για οχήματα με μη ελεγχόμενη ανάρτηση των γρήγορων επιβατικών συρμών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω οι τιμές που υπεισέρχονται κατά τον ρυθμό μεταβολής της ανεπάρκειας υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου στις καμπύλες συναρμογής, φαίνονται στον πίνακα 12 ανάλογα πάντα με την διανυόμενη ταχύτητα.

Παρατηρούμε την μέγιστη τιμή **75** που παίρνει ο ρυθμός μεταβολής σε πολύ υψηλές ταχύτητες $200 < V \leq 300$ και την τιμή **90** που παρουσιάζεται σε ταχύτητες μικρότερες $V < 200$ km/h. Αυτό συμβαίνει επειδή στις υψηλές ταχύτητες όπως προαναφέραμε, δίνεται μεγάλη σημασία στην άνεση των επιβατών στο όχημα καθώς, όπως έχουμε προαναφέρει, και στην ασφάλεια η οποία σχετίζεται με τις μέγιστες οριακές τιμές του πίνακα με αποτέλεσμα να μειώνεται κατά τον δυνατόν ο ρυθμός μεταβολής της ανεπάρκειας υπερύψωσης κατά την διέλευση από καμπύλες μετάβασης με αυτές τις ταχύτητες. Επίσης κάνουμε λόγο στην περίπτωση της τιμής 90, για οχήματα με ειδικά τεχνικά χαρακτηριστικά που προσδίδουν κατά κάποιο τρόπο μια πιο καλή συμπεριφορά στην αντιμετώπιση της μεταβολής αυτής, όποτε και δικαιολογούν την μεγαλύτερη τιμή του μεγέθους. Επίσης εφόσον έχουμε και ταχύτητες συμβατικών συρμών η τιμή αυτή (90) δεν επηρεάζει την άνεση σε τέτοιο βαθμό όπως γίνεται με τους συρμούς υψηλών ταχυτήτων όπου εκεί ο επιβάτης νιώθει την ενόχληση όποτε πρέπει να επικρατούν μικρότερες τιμές της μεταβολής. [29]

Κατηγορίες κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς συρμούς	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς * συρμούς	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για υψηλές ταχύτητες
(ταχύτητα σε km/h)	$80 \leq V \leq 120$	$120 < V \leq 200$	$200 < V \leq 300$	$250 \leq V \leq 300$
Συνιστώμενη οριακή τιμή [mm/s]	55	55	50	50
Μέγιστη οριακή τιμή [mm/s]	90	90	75	75

Πίνακας 12

πηγή EN13803-1

3.4.8 Μήκος στοιχείων χάραξης L_i (κυκλικές καμπύλες και ευθείες)

Το πραγματικό μήκος οποιουδήποτε στοιχείου χάραξης (εκτός των καμπυλών συναρμογής) πρέπει να τεθεί πάνω από μια ελάχιστη τιμή που δίνεται στον πίνακα 20, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές παραμέτρους σχεδίασης των στοιχείων ευθυγράμμισης (υπερύψωση, ανεπάρκεια υπερύψωσης και τις μεταβολές αυτών). Σε γραμμές υψηλών ταχυτήτων, μια γρήγορη εναλλαγή καμπυλών και ευθειών προκαλεί μείωση στην άνεση, ειδικά όταν το μήκος του κάθε στοιχείου της χάραξης παίρνει τιμές τέτοιες, ώστε οι επιβάτες να υποβάλλονται σε αλλαγή επιτάχυνσης με ρυθμό που είναι ανάλογος με τις φυσικές συχνότητες συρμών.

Με βάση τα λεγόμενα παρουσιάζεται ο πίνακας 13 για καμπύλες και ευθείες.

Κατηγορίες κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για υψηλές ταχύτητες
(ταχύτητα σε km/h)	$80 \leq V \leq 120$	$120 < V \leq 200$	$200 < V \leq 300$	$V \leq 230$ (ή 250)	$250 \leq V \leq 300$
Συνιστώμενη οριακή τιμή [m] ^a	$\frac{V_{\max}}{3}$	$\frac{V_{\max}}{1,5}$	$\frac{V_{\max}}{2}$		
Ελάχιστη οριακή τιμή [m] ^a	$\frac{V_{\max}}{5}$				

Πίνακας 13

πηγή ENV13803-1

^a είναι επιθυμητό, όπου είναι δυνατόν, να ενωθούν δύο κυκλικές καμπύλες αντίστροφες από μια συνεχή καμπύλη συναρμογής αντί της τοποθέτησης ενός ευθύγραμμου τμήματος, ως εκ τούτου, σε αυτήν την περίπτωση, το μήκος του στοιχείου ευθειών γραμμών είναι μηδέν. [29]

3.5 Κάθετες καμπύλες

Οι κάθετες καμπύλες μπορούν να σχεδιαστούν και χωρίς καμπύλες συναρμογής. Πρόκειται για τις καμπύλες κυρτότητας και κοιλότητας. Μια κάθετη καμπύλη πρέπει να ορίζεται για τουλάχιστον 20 m σε κάθε μεταβολή της κλίσης του πρσανούς αν η διαφορά στην κλίση μεταξύ των παρακείμενων κλίσεων πρσανούς είναι μεγαλύτερη από:

- 2 mm/m για ταχύτητες έως 230 km/h
- 1 mm/m για ταχύτητες πάνω από 230 km/h.

3.5.1 Ακτίνες της κάθετης καμπύλης R_v

Η σύνδεση μεταξύ δυο επιπέδων γίνεται πάντα από το τόξο του κύκλου. Πρέπει να γίνει κατάλληλη επιλογή της ακτίνας στην περίπτωση που πραγματοποιείται μετάβαση από ένα επίπεδο σε ένα άλλο με φορά αντίθετη, κυρτότητα και κοιλότητα.

Στην πρώτη περίπτωση, κυρτότητα, η ακτίνα R_v της κάθετης καμπύλης βρίσκεται με βασικούς τύπους.

Ένα όχημα που διασχίζει την καμπύλη δέχεται μια φυγόκεντρη δύναμη που τείνει να απομακρύνει τους τροχούς από την σιδ/χια, σε τελευταία ανάλυση, μειώνεται το στατικό βάρος που επιβαρύνει την σιδ/χια και ακολουθεί η προσκόλληση. Για το βάρος η φυγόκεντρη δύναμη θα είναι :

$$F_c = \frac{v^2}{g \cdot R_v} = \frac{V^2}{3,6^2 \cdot 9,81 \cdot R_v} \approx \frac{V^2}{127,14 \cdot R_v} \quad [3.5.1.1]$$

Αν θεωρηθεί σαν αρχή το γεγονός ότι η μεταβολή του στατικού βάρους δεν ξεπερνά το 1,5 %, η σχέση μας επιτρέπει να βρούμε το R_v σε συνάρτηση με την ταχύτητα:

$$\frac{V^2}{127,14 \cdot R_v} = 0,015 \rightarrow V^2 = 1,91 R_v \quad [3.5.1.2]$$

Όποτε θα ισχύει από τύπο [3.5.1.2] :

- για ταχύτητα $V = 60 \text{ Km/h} \rightarrow R_v = 2000 \text{ m}$
- για ταχύτητα $V = 100 \text{ km/h} \rightarrow R_v = 5240 \text{ m}$
- για ταχύτητα $V = 200 \text{ km/h} \rightarrow R_v = 20.940 \text{ m}$

Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι οι ακτίνες θα κινούνται σε τιμές πάντα μεγαλύτερες της **2000 m** περίπου.

Στην περίπτωση της κοίλης καμπύλης η διαδικασία είναι περίπου η ίδια, μόνο που στην περιφέρεια αυτή, η αντίδραση της φυγόκεντρου δύναμης προσδίδει μια αύξηση στο στατικό φορτίο.

Για τις γραμμές υψηλών ταχυτήτων οι *F.S. (Ferovvie Strade)* έχουν προσδιορίσει τις ακόλουθες ελάχιστες τιμές για κάθετες ακτίνες **[34]** :

1. $R_v = 45.000$ για ταχύτητα $V = 300 \text{ km/h}$
2. $R_v = 30.000$ για ταχύτητα $V = 250 \text{ km/h}$
3. $R_v = 20.000$ για ταχύτητα $V = 200 \text{ km/h}$

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο **[29]** η ακτίνα κάθετης καμπύλης θα πρέπει να σχεδιάζεται με βάση τον τύπο :

$$R_v = \frac{V_{\max}^2}{12,96 \cdot a_v} \geq (R_v)_{\lim} \quad [3.5.1.3]$$

όπου a_v : κάθετη επιτάχυνση

Για διαφορετικές ταχύτητες η τιμή της ακτίνας ποικίλει, σύμφωνα με τον ακόλουθο πίνακα 14:

Κατηγορίες κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για υψηλές ταχύτητες
(ταχύτητα σε km/h)	$80 \leq V \leq 120$	$120 < V \leq 200$	$200 < V \leq 300$	$V \leq 230$ (ή 250)	$250 \leq V \leq 300$
Συνιστάμενη οριακή τιμή [m]	$0,35 \cdot V_{\max}^2$ ^c	$0,35 \cdot V_{\max}^2$	$0,35 \cdot V_{\max}^2$	$0,35 \cdot V_{\max}^2$	$0,35 \cdot V_{\max}^2$
Ελάχιστη οριακή τιμή [m]	$0,25 \cdot V_{\max}^2$ ^b	$0,175 \cdot V_{\max}^2$ ^a	$0,175 \cdot V_{\max}^2$ ^a	$0,25 \cdot V_{\max}^2$ ^b	$0,175 \cdot V_{\max}^2$ ^a

Πίνακας 14

πηγή **ENV 13803-1**

^a με ανοχή +10 % σε μια κυρτή και + 30% σε μια κοίλη καμπύλη.

^b με ακτίνα πάντα πάνω από 2.000 m

^c σε γραμμές όπου οι επιβάτες είναι όρθιοι προτείνεται το $R_v = 0,77 V^2$

Στον τύπο [3.5.1.3] εμφανίζεται και η a_v που η μέγιστη τιμή του πρέπει να επιλέγεται λαμβάνοντας υπόψη την άνεση στην περίπτωση κακής στρωματικής διάταξης στην περιοχή. Επιπροσθέτως θα πρέπει να λάβουμε υπόψη την ασφάλεια ώστε να μην επιτραπεί ο εκτροχιασμός που οφείλεται στην μεταπήδηση των τροχών πάνω σε διάφορα "εξογκώματα - ράχες". Παρόλα αυτά, το όριο ασφάλειας δεν λαμβάνεται υπόψη εκτός αν οι μέγιστες οριακές τιμές ξεπερασθούν.

Στον πίνακα 15 παρουσιάζονται οι τιμές αυτές της κάθετης επιτάχυνσης ανάλογα με τις ταχύτητες των συρμών.

Κατηγορίες κυκλοφορίας	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας $80 \leq V \leq 120$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας $120 < V \leq 200$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς συρμούς $200 < V \leq 300$	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για επιβατικούς * συρμούς $V \leq 230$ (ή 250)	Μικτές γραμμές κυκλοφορίας αποκλειστικά για υψηλές ταχύτητες $250 \leq V \leq 300$
(ταχύτητα σε km/h)					
Συνιστάμενη οριακή τιμή [m/sec ²]	0,22 ^b	0,22	0,22	0,22	0,22
Μέγιστη οριακή τιμή [m/sec ²]	0,31	0,31	0,44 ^a	0,31	0,44 ^a

Πίνακας 15

πηγή **ENV 13803-01**

^a με ανοχή +10% σε μια κυρτή και + 30% σε μια κοίλη καμπύλη

^b σε γραμμές όπου οι επιβάτες είναι όρθιοι προτείνεται $a_v \leq 0,1$ [29]

3.6 Καμπύλες συναρμογής

3.6.1 Κυβική παραβολή για συμβατικές γραμμές και γραμμές υψηλών ταχυτήτων

Για την βαθμιαία μετάβαση του σιδ/κου οχήματος από την μηδενική καμπυλότητα της ευθυγραμμίας στην μη μηδενική καμπυλότητα του κυκλικού τόξου χρησιμοποιείται η καμπύλη μετάβασης ή συναρμογής η οποία μπορεί να έχει διάφορες μορφές όπως κυβική παραβολή ή και κλοθοειδές.

Η καμπύλη συναρμογής είναι μια καμπύλη μεταβλητή με τιμές από $k = 0$ μέχρι $k = 1/R$.

Όπου k είναι η καμπυλότητα που ορίζεται σαν το αντίστροφο της ακτίνας μιας καμπύλης R . Μεταξύ ευθυγραμμίας όπου $R = \infty \Rightarrow k = 0$ και μιας καμπύλης, δημιουργείται μια απότομη μεταβολή της καμπυλότητας από το 0 μέχρι το $1/R$. Αυτή η απότομη μεταβολή της καμπυλότητας γίνεται αισθητή στον επιβάτη σαν ένα τίναγμα. 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 του.

Μια απότομη μετάβαση από την ευθυγραμμία στο κυκλικό τόξο θα προκαλούσε απότομη εφαρμογή της περίσσειας πλευρικής επιτάχυνσης με αποτέλεσμα την πρόκληση δυσάρεστου αισθήματος στους επιβάτες. Εξ' αλλού λόγω της αδράνειας (της γνωστής ιδιότητας των σωμάτων να αντιδρούν σε κάθε προσπάθεια μεταβολής της κινητικής τους κατάστασης) ο συρμός θα έτεινε να επανέλθει στην αρχική του κινητική κατάσταση (στην κίνησή του στην ευθυγραμμία) με αλλά λόγια θα έτεινε να εκτροχιαστεί.

Με εφαρμογή της καμπύλης συναρμογής επικρατούν διαφορετικές συνθήκες. Οι καμπύλες αυτές στους σιδηρόδρομους:

- Αποδίδουν βαθμιαία την εφαρμογή της φυγόκεντρης δύναμης από μια τιμή μηδενική σε ευθύ τμήμα σε μια ορισμένη τιμή σε καμπύλη και άρα περιορίζει την αναπήδηση
- Επιτρέπει την προοδευτική ανύψωση της εξωτερικής σιδ/χιας μέχρι να φθάσει την υπερύψωση D , ορισμένη για μια κυκλική καμπύλη

Γενικά σε ένα σύστημα δισδιάστατο (βλέπε σχήμα 8) έχοντας μηδέν (0) το αρχικό σημείο της σύνδεσης, βρίσκουμε την καμπύλη συναρμογής ικανοποιώντας την ισορροπία μεταξύ φυγόκεντρο δύναμης και δύναμη βάρους :

$$F_c = m \frac{v^2}{R} \quad [3.6.1.1]$$

$$B = m \cdot g$$

[3.6.1.2]

Από αυτό το σύστημα έχουμε :

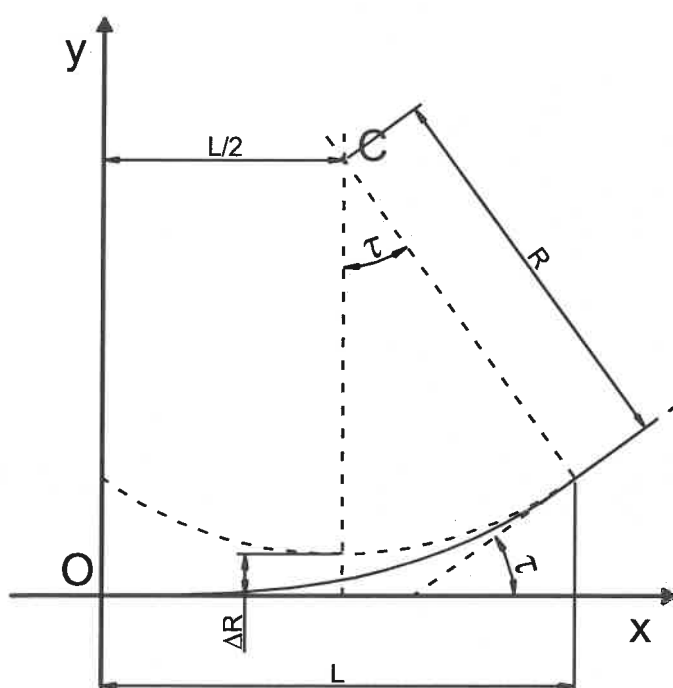
$$F_c = \frac{B}{g} \cdot \frac{v^2}{R} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{F_c}{B} = \frac{v^2}{g \cdot R} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{1}{R} = \frac{g \cdot F_c}{B \cdot v^2}$$

[3.6.1.3]

Από την στιγμή που κατά μήκος της σύνδεσης η εξωτερική σιδ/χια έρχεται να ανυψωθεί με σταθερά κλίση (p) θα έχουμε :



σχήμα 8

$$F_c = p \cdot s$$

[3.6.1.4]

s: τόξο

p : ομοιόμορφη κλίση για την υπερύψωση

και ισχύει επίσης :

$$dy / dx = \tan \tau \quad [3.6.1.5]$$

όπου **τ** είναι η γωνία που σχηματίζει η εφαπτόμενη της καμπύλης σε κάποιο σημείο με τον άξονα των **x**

Η καμπυλότητα της καμπύλης αυτής περιγράφει το ρυθμό μεταβολής της **τ**, όταν μεταβάλλεται το μήκος του τόξου **L** και ορίζεται :

$$k = d\tau / dL \quad [3.6.1.6]$$

από τις σχέσεις [3.6.1.5] και [3.6.1.6] ισχύει:

$$\frac{d^2y}{d^2x} = sc^2\tau \cdot \frac{d\tau}{dx^2} = sc^2\tau \cdot \frac{d\tau}{dL} \cdot \frac{dL}{dx} = k \cdot sc^2\tau \quad [3.6.1.7]$$

επίσης ισχύει ότι

$$sc\tau = (1 + \tan^2\tau)^{1/2} = \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{1/2} \quad [3.6.1.8]$$

όπου **sc** = τέμνουσα

και η σχέση [3.6.1.3] λόγω της [3.6.1.4] γίνεται:

$$\frac{1}{R} = \frac{g \cdot p}{B \cdot v^2} \cdot s \quad [3.6.1.9]$$

Επειδή **g** , **B** και **v** είναι σταθερά κατά μήκος της σύνδεσης, προκύπτει μια πραγματική εξίσωση μεταξύ κυρτότητας (καμπυλότητας) και τετμημένης καμπυλόγραμμης δίνοντας μια εξίσωση κλωθοειδούς :

$$\frac{1}{R} = \frac{s}{\mu} \quad [3.6.1.10]$$

όπου:

$$\frac{1}{\mu} = \frac{g}{B} \cdot \frac{\rho}{v^2} \quad [3.6.1.11]$$

Η καρτεσιανή εξίσωση της καμπυλότητας (κυρτότητας) είναι :

$$\frac{1}{R} = k = \frac{d^2y / dx^2}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}} \quad [3.6.1.12]$$

Για να αποδωθεί πιο κατανοητά η αναζήτηση της σύνδεσης, στην πραγματικότητα από τις καρτεσιανές συντεταγμένες στα σημεία αυτά, προκύπτουν δυο απλοποιήσεις:

- Η τετμημένη καμπυλόγραμμης s ορίζεται από την τετμημένη x ($s \equiv x$)
- Στην έκφραση της κυρτότητας αμελείται ο παράγοντας $(dy/dx)^2$ έτσι είναι:

$$\frac{1}{R} \equiv \frac{x}{\mu} \equiv \frac{d^2y}{dx^2} \quad [3.6.1.13]$$

Θέτοντας $y'(0) = 0$ και $y(0) = 0$, με διπλή ολοκλήρωση έχουμε :

$$y(x) = \frac{x^3}{6 \cdot \mu} \quad [3.6.1.14]$$

που είναι η εξίσωση της κυβικής παραβολής.

Με ορισμένες πράξεις φαίνεται ότι $\mu = LR$, από δω R είναι η ακτίνα της κυκλικής καμπύλης όπου ενώνει την κυβική παραβολή, L είναι το μήκος σύνδεσης. Φθάνουμε έτσι στην κλασσική εξίσωση της κυβικής παραβολής που χρησιμοποιείται στους σιδ/μους [35] :

$$y(x) = \frac{x^3}{6LR} \quad [3.6.1.15]$$

Για να βρούμε την θέση του κέντρου του κύκλου C , με βάση το σχήμα 8, έχουμε :

$$x_c \approx \frac{L}{2} \quad \text{και το} \quad y_c \approx R + \Delta R \quad [3.6.1.16]$$

όπου

$$\Delta R = R' - R = y - \frac{3}{4} y = \frac{1}{4} L^3 / 6RL = 1/24 \cdot L^2 / R = \frac{L^2}{24R} \quad [3.6.1.17]$$

άρα η σχέση [3.6.1.16] γίνεται:

$$y_c = R + \frac{L^2}{24 R} \quad [3.6.1.18]$$

Το εφαπτόμενο μήκος της καμπύλης συναρμογής L βρίσκεται από διαφορετικά κριτήρια για συμβατικούς συρμούς και συρμούς με υψηλές ταχύτητες.

Στην περίπτωση των συμβατικών συρμών παρουσιάζεται μια οριακή κατά μήκος κλίση (ανηφορική κλίση) όπως δείχνει ο πίνακας 16 :

	$p_{\max}$
$V \leq 50 \text{ km/h}$	3 ‰
$50 < V \leq 75 \text{ km/h}$	2,5 ‰
$75 < V \leq 100 \text{ km/h}$	2 ‰
$100 < V \leq 125 \text{ km/h}$	1,5 ‰
$V > 125 \text{ km/h}$	1,25 ‰

Πίνακας 16 Μέγιστη κατά μήκος κλίση

πηγή FS

Εδώ παρατηρείται η αλλαγή της υπερύψωσης με την αλλαγή της ταχύτητας στην διανυόμενη γραμμή, σύμφωνα με τους υπολογισμούς στις 2 Μαΐου 1935 στους Ιταλικούς Σιδ/μους FS. Από αυτά τα δεδομένα φαίνεται ότι, για ταχύτητα μεταξύ 100 km/h και 125 km/h με υπερύψωση περίπου $D = 160 \text{ mm}$, το μήκος της σύνδεσης, με κλίση $p = 1,5 \text{ ‰}$ είναι περίπου $L = 107 \text{ m}$ σύμφωνα με την παρακάτω ανισότητα :

$$L \geq \frac{D}{p_{\max}} \quad [3.6.1.19]$$

Αντιθέτως, στις γραμμές υψηλών ταχυτήτων, με βάση το μέγιστο όριο της δημιουργούμενης αναπήδησης (τίναγμα) C θα ισχύει:

$$C = \frac{da_q}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{v_{\max}^2}{R} - g \cdot \frac{F_c}{B} \right) \quad [3.6.1.20]$$

Το τίναγμα C είναι η παράγωγος της επιτάχυνσης ως προς τον χρόνο, ήτοι da_q/dt . Εκφράζει την ταχύτητα μεταβολής της επιτάχυνσης. Εδώ εξετάζεται το τίναγμα που αναφέρεται στην πλευρική επιτάχυνση. Μεταβολή της πλευρικής επιτάχυνσης υπάρχει, όταν μεταβάλλεται η καμπυλότητα $k = 1/R$.

Όπου $v_{\max}$ είναι η ταχύτητα των επιβατικών συρμών. Ονομάζοντας $L_{\max}$ το μήκος σύνδεσης της καμπύλης με ελάχιστη ακτίνα, με μια σειρά αλγεβρικών πράξεων οδηγούμαστε στην σχέση:

$$C_{\max} = \frac{V_{\max}}{3,6} \cdot \frac{a_{q,\max}}{L_{\max}} \quad [3.6.1.21]$$

και άρα θα έχουμε :

$$L_{\max} = \frac{V_{\max}}{3,6} \cdot \frac{a_{q,\max}}{C_{\max}} \quad [3.6.1.22]$$

Με βάση τον τύπο αυτό και για τιμές του τινάγματος και της μη αντισταθμισμένης πλευρικής επιτάχυνσης αντίστοιχα $C_{\max} = 0,15 \text{ m/sec}^3$ και $a_{q,\max} = 0,6 \text{ m/sec}^2$ που έχουν χρησιμοποιηθεί για να ορισθεί το μήκος παραβολικής σύνδεσης προκύπτει :

$$L_{\max} = 1,111 \cdot V_{\max} \quad [3.6.1.23]$$

Στην περίπτωση υπεραστικών σιδ/μων οι τιμές που φθάνει το τινάγμα C είναι $C_{\max} = 0,50 \text{ m/sec}^2$ ενώ για δευτερεύουσες γραμμές μπορεί να γίνει αποδεκτό $C_{\max} = 0,65 \text{ m/sec}^2$.

Αν η ακτίνα της καμπύλης είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη, όποτε η υπερύψωση είναι μικρότερη από την μέγιστη, εφαρμόζουμε το κριτήριο της αναλογικότητας , δηλαδή :

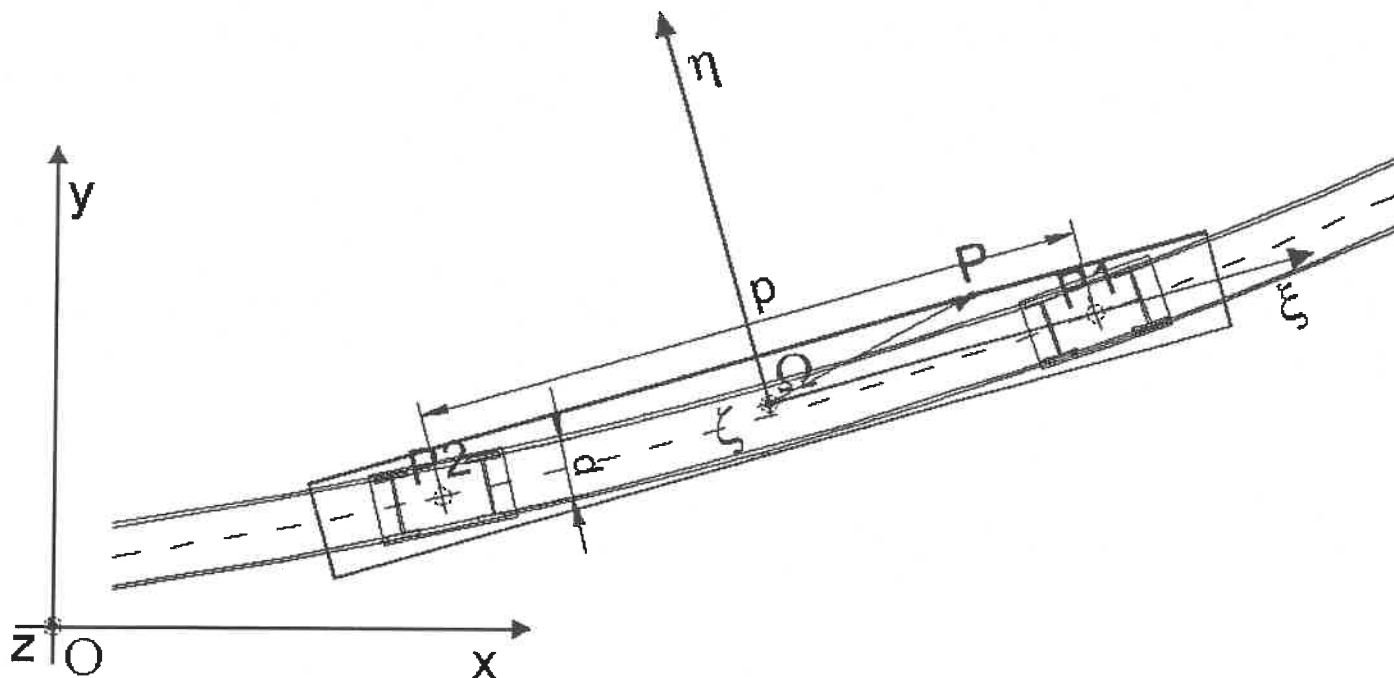
$$L = 1,111 \cdot \frac{D}{D_{\max}} \cdot V_{\max} \quad [3.6.1.24]$$

όπου $D_{\max}$ είναι η υπερύψωση που σημειώνεται στην ελάχιστη ακτίνα. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το μήκος L στις υψηλές ταχύτητες είναι ανάλογο της ταχύτητας ενώ το ίδιο δεν συμβαίνει σε μικρές ταχύτητες όπου εκεί το μήκος εξαρτάται από την υπερύψωση και την κατά μήκος κλίση. [36]

3.6.2 Ανάλυση της τρισδιάστατης κίνησης ενός σιδ/κου αμαξώματος (βαγόνι) κατά μήκος της κυβικής παραβολής

Το σιδ/κο αμάξωμα που ακολουθεί είναι σχηματισμένο από ένα κιβώτιο, δυο πλαίσια, δυο φορεία και τέσσερις άξονες (βλέπε σχ. 9). Η πλήρης μελέτη της κίνησης του οχήματος αναζητά του τύπους μιας εξίσωσης για κάθε βαθμό ελευθέριας των συστατικών τους. Από την στιγμή που το αμάξωμα υποδιαιρείται σε επτά (7) μέρη και καθένα έχει έξη (6) βαθμούς ελευθέριας στον χώρο, υποθέτουμε ότι είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα σύστημα από 42 διαφορικές εξισώσεις. Σε αυτή την περίπτωση αναλύονται οι άκαμπτες κινήσεις που δημιουργούνται από το κιβώτιο του σιδ/κου αμαξώματος όταν διασχίζει μια σύνδεση μετάβασης σχηματίζοντας μια κυβική παραβολή. Στόχος είναι να δοθεί ένα απλό κινηματικό μοντέλο ενός σιδ/κου οχήματος ορισμένο (σχήμα 9):

- Το όχημα αποτελείται από τρία μέρη: ένα κιβώτιο και δυο φορεία
- Τα φορεία περιστρέφονται γύρω από δυο σημεία σταθερά του κιβωτίου, δυο πείρους, (P_1 και P_2 όπως το σχήμα 4), τα οποία βρίσκονται πάντα κεντρικά σε σχέση με την γραμμή
- Η απόσταση p των πείρων είναι 19 m (αμάξωμα επιβατικό του τύπου **UIC – X** και **UIC – Z**)
- Το κιβώτιο παριστάνει ένα παραλληλεπίπεδο με βαρύκεντρο Ω στο κεντρικό σημείο του. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από διάφορες μετρήσεις, ισχύουν και στην περίπτωση που το Ω ,λόγο αναπόφευκτης ασυμμετρίας της διάταξης των φορτίων, δεν συμπίπτει με το κέντρο του παραλληλεπίπεδου.



σχήμα 9 Μοντέλο απλοποιημένο του σιδ/κου αμαξώματος

πηγη [45]

Με βάση το σχήμα 9 για το απλοποιημένο μοντέλο του σιδ/κου οχήματος θεωρείται :

- Οι τέσσερις τροχοί των αξόνων που ανήκουν σε ένα φορείο έχουν σημεία στήριξης σε θέσεις που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο (αμελείται έτσι η επιρροή μικρής στρέβλωσης)
- Καθένα φορείο εφάπτεται με την σιδ/κη γραμμή σε σχέση με τους πείρους
- Δεν αναζητούνται τα δυναμικά φαινόμενα προερχόμενα από τις αναρτήσεις, αλλά δεχόμαστε ότι η μεταβολή των αξόνων του κιβωτίου σε σύγκριση με τα φορεία πραγματοποιείται μόνον χάρη στην εμφάνισή τους.

Πιο απλά, αποκλείουν υψομετρικές μεταβολές του σιδ/κου άξονα διαφορετικές από την υπερύψωση της εξωτερικής σιδ/χιας και την βαθμιαία αύξηση της ταχύτητας του οχήματος θέτοντας σταθερή και ανάλογη με την ταχύτητα για διαφορετικές μηχανές.

Για την μελέτη της κίνησης του κιβωτίου θεωρούνται δυο συστήματα αναφοράς:

1. Ένα σύστημα σταθερό **Oxyz** με αρχή στο αρχικό σημείο της κυβικής παραβολής και άξονα x να εφάπτεται
2. Ένα σύστημα κινητό **Ωξηζ** πάνω στο κιβώτιο του σιδ/κου οχήματος έχοντας αρχή το βαρύκεντρό του. Ο άξονας ξ αντιπροσωπεύει τον κατά μήκος άξονα του κιβωτίου, ο άξονας η συμπίπτει με τον πλάγιο άξονα (εγκάρσιο), ο άξονας ζ είναι κάθετος στους δυο προηγούμενους και έτσι σχηματίζεται ένα τριαδικό δεξιόστροφο σύστημα.

Η απόλυτη ταχύτητα σε οποιοδήποτε σημείο **P** βρίσκεται με το θεώρημα σύνθεσης ταχύτητας :

$$\bar{\mathbf{v}}(\mathbf{P}) = \bar{\mathbf{v}}_r(\mathbf{P}) + \bar{\mathbf{v}}_t(\mathbf{P}) \quad [3.6.2.1]$$

όπου $\bar{\mathbf{v}}_r(\mathbf{P})$ είναι η πραγματική ταχύτητα του σημείου σε σύγκριση με το κινητό σύστημα και $\bar{\mathbf{v}}_t(\mathbf{P})$ είναι η ταχύτητα διαγραφής, ή η απόλυτη ταχύτητα που θα έχει το σημείο **P** αν σε σχέση με το κινητό σύστημα ισχύει:

$$\bar{\mathbf{v}}_t(\mathbf{P}) = \bar{\mathbf{v}}(\Omega) + \omega_t \wedge (\mathbf{P} - \Omega) \quad [3.6.2.2]$$

($\wedge$: το εξωτερικό γινόμενο)

όπου $\bar{\mathbf{v}}(\Omega)$ είναι η απόλυτη ταχύτητα του βαρύκεντρου του κιβωτίου και ω_t είναι η γωνιακή ταχύτητα του κιβωτίου γύρω από το Ω . Επειδή ζητούνται τα σταθερά σημεία που ανήκουν στο κιβώτιο ισχύει :

$$\bar{\mathbf{v}}_r(\mathbf{P}) = 0 \rightarrow \bar{\mathbf{v}}(\mathbf{P}) = \bar{\mathbf{v}}_t(\mathbf{P}) = \bar{\mathbf{v}}(\Omega) + \omega_t \wedge (\mathbf{P} - \Omega) \quad [3.6.2.3]$$

γι' αυτό η κίνηση ενός οποιουδήποτε σημείου του κιβωτίου με βάση την γεωμετρία της γραμμής ονομάζεται "*κίνηση διαγραφής – χάραξης*".

Όσον αφορά την απόλυτη επιτάχυνση, βρίσκεται από τον τύπο :

$$\bar{\mathbf{a}}(\mathbf{P}) = \bar{\mathbf{a}}_r(\mathbf{P}) + \bar{\mathbf{a}}_t(\mathbf{P}) + \bar{\mathbf{a}}_c(\mathbf{P}) \quad [3.6.2.4]$$

όπου :

$\bar{\mathbf{a}}_r(\mathbf{P})$: η πραγματική επιτάχυνση του $\mathbf{P}$ στο κινητό σύστημα

$\bar{\mathbf{a}}_t(\mathbf{P})$: η επιτάχυνση διαγραφής του $\mathbf{P}$ η οποία βρίσκεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$\bar{\mathbf{a}}_t(\mathbf{P}) = \bar{\mathbf{a}}(\Omega) + \omega_t \wedge (\mathbf{P} - \Omega) + \omega_t \wedge [\omega_t \wedge (\mathbf{P} - \Omega)] \quad [3.6.2.5]$$

όπου :

$\bar{\mathbf{a}}_c(\mathbf{P})$: η επιτάχυνση Coriolis :

$$\bar{\mathbf{a}}_c(\mathbf{P}) = 2 \omega_t \wedge \bar{\mathbf{v}}_r(\mathbf{P}) \quad [3.6.2.6]$$

Αν το $\mathbf{P}$ είναι σταθερό στο κιβώτιο τότε είναι:

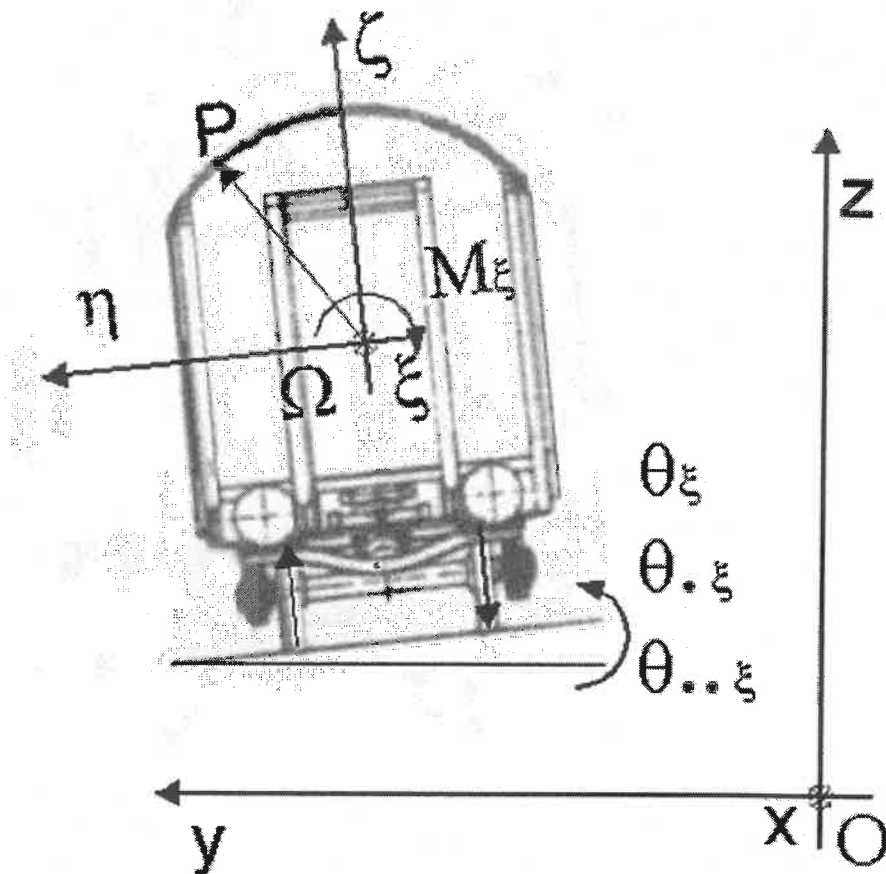
$$\bar{\mathbf{a}}_r(\mathbf{P}) = \bar{\mathbf{v}}_r(\mathbf{P}) = 0 \rightarrow \bar{\mathbf{a}}_c(\mathbf{P}) = 0 \quad [3.6.2.7]$$

και άρα το σημείο ορίζεται μόνο στην επιτάχυνση της διαγραφής.

Με αυτά τα διανύσματα προκύπτει ότι η κίνηση ενός οποιουδήποτε σημείου του κιβωτίου είναι το αποτέλεσμα της σύνδεσης της κίνησης του βαρυκέντρου και των τριών κινήσεων περιστροφής γύρω από τους άξονες ξ , η , ζ , οι οποίες είναι αντίστοιχα **κίνηση κατά μήκος**, **κίνηση ταλαντωτική κατά μήκος** (σκαμπανεβάσματα) και **κίνηση περιστροφική γύρω από τον άξονα του**.

◇ Κίνηση κατά μήκος

Είναι η κίνηση που γίνεται κατά μήκος του άξονα (ξ). Όταν το αμάξωμα διασχίζει μια καμπύλη μετάβασης, για την επιρροή της ανύψωσης της εξωτερικής σιδ/χιας το επίπεδο στήριξης του κάθε φορείου περιστρέφεται σε μια γωνιά που λέγεται γωνία κυλινδρική (βλέπε σχήμα 10).



σχήμα 10 Κατά μήκος κίνηση σιδηροδρομικού οχήματος

πηγή [45]

$$\theta_{\xi}(s) = \arctg \frac{h(s)}{d} \approx \frac{h(s)}{d} \quad [3.6.2.8]$$

η παροδική παράγωγος της κατά μήκος γωνίας ονομάζεται κατά μήκος γωνιακή ταχύτητα :

$$\dot{\theta}_{\xi}(s) = \frac{d}{dt} \theta_{\xi}(s) \approx \frac{1}{d} \dot{h}(s) \quad [3.6.2.9]$$

απ' όπου βλέπουμε ότι το $\dot{\theta}_{\xi}$ είναι ανάλογο με την ταχύτητα ανύψωσης της εξωτερικής σιδ/χίας $h(s)$.

Αν η κατά μήκος ταχύτητα μεταβάλλεται με τον χρόνο, στο όχημα ασκείται μια κατά μήκος επιτάχυνση ορισμένη :

$$\ddot{\theta}_{\xi}(s) = \frac{d^2}{dt^2} \theta_{\xi}(s) \approx \frac{1}{d} \ddot{h}(s) \quad [3.6.2.10]$$

οι κατά μήκος γωνίες των φορέων είναι :

$$\theta_{\xi,1} = \arctg \frac{z_1}{d/2} \approx \frac{z_1}{d/2} = \frac{h_1/2}{d/2} = \frac{h_1}{d} \quad [3.6.2.11]$$

$$\theta_{\xi,2} = \arctg \frac{z_2}{d/2} \approx \frac{z_2}{d/2} = \frac{h_2/2}{d/2} = \frac{h_2}{d} \quad [3.6.2.12]$$

και η κατά μήκος γωνία του κιβωτίου είναι ανάλογη με την μεγαλύτερη από τις κατά μήκος γωνίες των φορέων :

$$\theta_{\xi,\Omega} = \frac{\theta_{\xi,1} + \theta_{\xi,2}}{2} \approx \frac{h_1 + h_2}{2d} \quad [3.6.2.13]$$

οπότε η κατά μήκος ταχύτητα του κιβωτίου είναι :

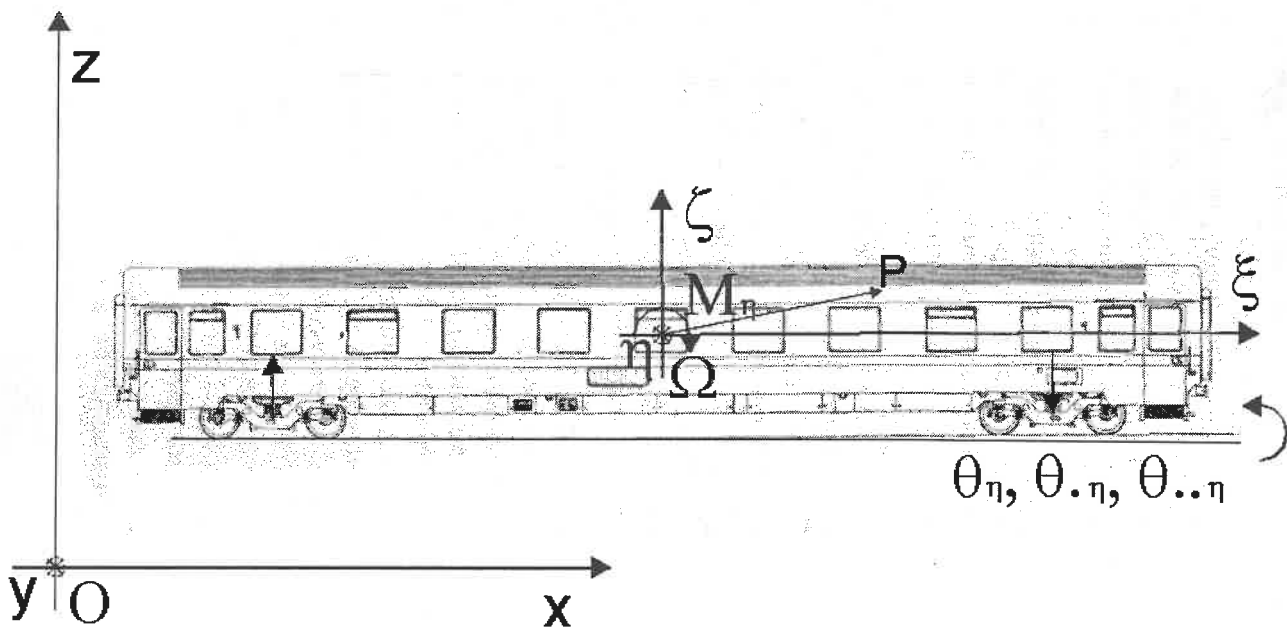
$$\ddot{\theta}_{\xi,\Omega} = \frac{\ddot{h}_1 + \ddot{h}_2}{2d} \quad [3.6.2.14]$$

η οποία εξαρτάται από το άθροισμα της ταχύτητας ανύψωσης των φορέων.

Γενικά η κατά μήκος ταχύτητα δεν αυξάνει κατά μήκος της παραβολικής σύνδεσης, μα υφίστανται δυο αυξήσεις και δυο μειώσεις, που γίνονται όταν ένα από τα δυο φορεία μπαίνει ή βγαίνει από την σύνδεση. Η απότομη αλλαγή της $\theta_{\xi,\Omega}$ δίνει μια κατά μήκος επιτάχυνση θεωρητικά άπειρη και άρα ένα ζεύγος ροπής $M_{\xi} = - J_{\xi} \ddot{\theta}_{\xi,\Omega}$ (όπου J = ροπή αδράνειας του κιβωτίου γύρω από τον άξονα ξ) άπειρο.

◇ Κίνηση ταλαντωτική (σκαμπανεβάσματα)

Είναι η κίνηση που πραγματοποιεί το κιβώτιο γύρω από τον εγκάρσιο άξονα (η) (βλέπε σχήμα 11).



σχήμα 11 *Κίνηση ταλαντωτική του σιδ/κου αμαξώματος* *πηγή [45]*

Αναζητάμε τις συντεταγμένες του z_1 και z_2 από τους δυο πείρους και την ταλαντωτική γωνία του αμαξώματος.

$$\theta_{\eta,\Omega} = \arctg \frac{z_1 - z_2}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} = \frac{z_1 - z_2}{p} = \frac{h_1 - h_2}{2p}$$

[3.6.2.15]

Η παράγωγος της ταλαντωτικής γωνιάς σε σχέση με τον χρόνο δίνει την ταλαντωτική ταχύτητα :

$$\dot{\theta}_{\eta,\Omega} = \frac{d}{dt} \theta_{\eta,\Omega} \approx \frac{\dot{h}_1 - \dot{h}_2}{2p} \quad [3.6.2.16]$$

απ' όπου φαίνεται ότι $\dot{\theta}_{\eta,\Omega}$ είναι ανάλογο με την διαφορά μεταξύ της ταχύτητας ανύψωσης των φορέων 1 και 2.

Παραγωγίζοντας δυο φορές σε σχέση με τον χρόνο την ταλαντωτική γωνία, πέρνουμε την ταλαντωτική επιτάχυνση :

$$\ddot{\theta}_{\eta,\Omega} = \frac{d^2}{dt^2} \theta_{\eta,\Omega} \approx \frac{\ddot{h}_1 - \ddot{h}_2}{2p} \quad [3.6.2.17]$$

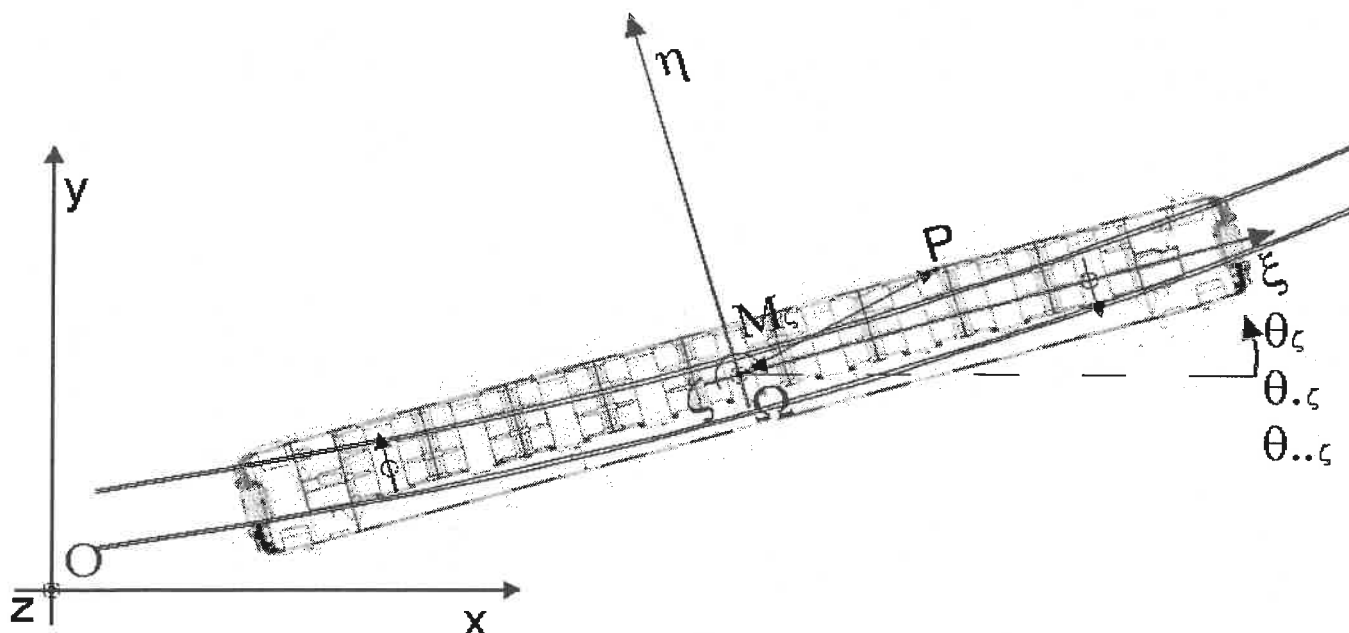
Έτσι, η ταλαντωτική γωνία του κιβωτίου αυξάνει όχι δύσκολα όταν το φορείο 1 αρχίζει να διασχίζει την παραβολική σύνδεση, παραμένει σταθερή όταν το φορείο 2 βρίσκεται στην καμπύλη μετάβασης και μειώνεται την στιγμή που το φορείο 1 διέρχεται από το τόξο του κύκλου.

Η ταλαντωτική ταχύτητα είναι διαφορετική του μηδενός μόνο στις δυο θέσεις, στην αρχή και στο τέλος της σύνδεσης.

◇ Κίνηση περιστροφική γύρω από τον άξονα του

Στην περιστροφική κίνηση (ή οφιοειδής) επιχειρείται η περιστροφή του οχήματος γύρω από τον άξονα ζ. Με βάση το σχήμα 12 η περιστροφική γωνία του κιβωτίου ορίζεται :

$$\theta_{\zeta,\Omega} = \arctg \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \approx \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} \quad [3.6.2.18]$$



σχήμα 12 Κίνηση περιστροφική γύρω από τον άξονα του σιδ/κου αμαξώματος
πηγή [45]

ανάλογα και η περιστροφική ταχύτητα και η περιστροφική επιτάχυνση δίνονται αντίστοιχα από τους τύπους:

$$\dot{\theta}_{\zeta,\Omega} = \frac{d}{dt} \theta_{\zeta,\Omega} \quad [3.6.2.19]$$

$$\ddot{\theta}_{\zeta,\Omega} = \frac{d^2}{dt^2} \theta_{\zeta,\Omega} \quad [3.6.2.20]$$

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η περιστροφική ταχύτητα κατά μήκος της κυβικής παραβολής αυξάνεται βαθμιαία, αλλά στο τέλος, όταν το φορείο 1 εισχωρεί στο τόξο του κύκλου, το $\theta_{\zeta,\Omega}$ είναι θεωρητικά άπειρο. Αυτό προκύπτει επίσης και όταν το φορείο 2 βαδίζει στο ίδιο σημείο (δεύτερη ασυνέχεια της κίνησης). Όταν και τα δυο φορεία βρίσκονται στο τόξο του κύκλου, η περιστροφική ταχύτητα είναι σταθερή και ανάλογη με την γωνιακή ταχύτητα περιστροφής οποιουδήποτε φορείου που γυρίζει στο κέντρο της περιφέρειας (v/R). [45]

3.6.3 Ασυνέχεια κυβικής παραβολής – τιμές σχεδιασμού για δυσμενή κατάσταση γραμμών υψηλών ταχυτήτων

Κατά την χάραξη της κυβικής παραβολής πρέπει να ισχύουν οι ακόλουθες συνθήκες:

- Στην αρχή και στο τέλος της σύνδεσης υπάρχει επαφή μεταξύ ευθύγραμμου τμήματος και παραβολής από την μια και παραβολής και κυκλικής καμπύλης από την άλλη.
- Στα αρχικά και τελικά σημεία της σύνδεσης οι δυο καμπύλες είναι σε επαφή και έχουν την ίδια εφαπτόμενη.

Για τις υψηλές ταχύτητες, η είσοδος στην παραβολική σύνδεση βασίζεται σε ένα συμβατικό κριτήριο το οποίο ορίζει το σημείο της αρχής σύνδεσης κατά μήκος της εφαπτόμενης στο σημείο T_0 του τόξου του κύκλου. Η μεταβίβαση αυτή στην παραβολή πραγματοποιείται για $L_t/2$ και καθορίζει την αρχή (σημείο 0) του συστήματος αναφοράς που ορίζεται η κυβική παραβολή.

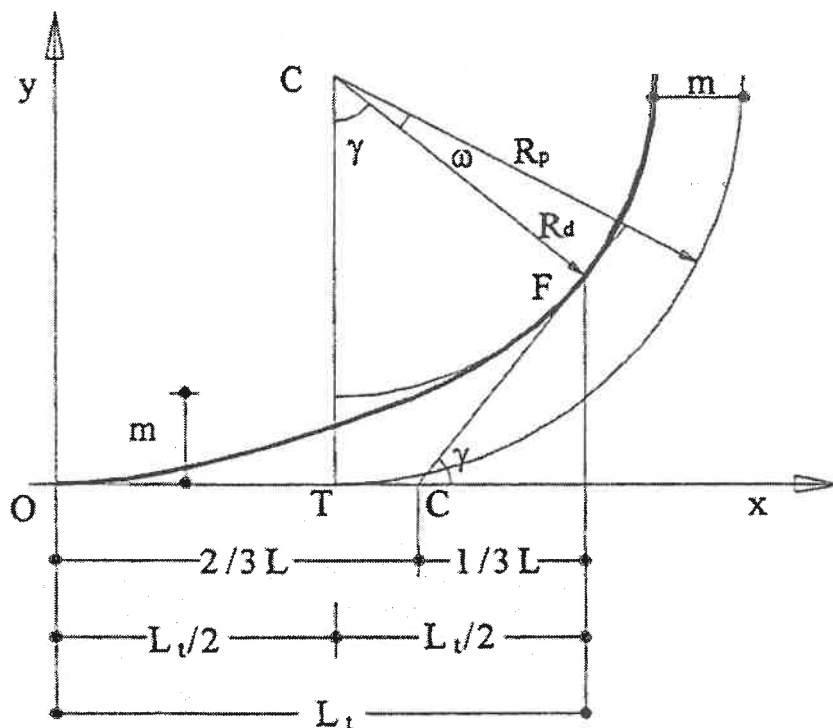
Στην περίπτωση αυτή προκύπτει μια καθυστέρηση στην κυκλική καμπύλη, σχήμα 13, με μια μεταβολή της ακτίνας της κυρτότητας από την ποσότητα m , την λεγόμενη **μετατόπιση** που προκαλεί η κυβική παραβολή μεταξύ του κυκλικού τόξου και της ευθυγραμμίας.

όπου

$$m = L_t^2 / 24R_d$$

$$R_p = R_d + m$$

$$\gamma = \arctg(L_t / 2R_d)$$



σχήμα 13

Για την πρώτη συνθήκη της χάραξης, η καθυστέρηση $L_t/2$ του σημείου επαφτομένης T μεταξύ ευθύγραμμου τμήματος και κυκλικής καμπύλης, δίνει μια ασυνέχεια στις συντεταγμένες του σημείου επαφής F μεταξύ των δυο τόξων, του παραβολικού και του κυκλικού. Οι εκφράσεις των συντεταγμένων του σημείου F με απόδοση για την παραβολή και την κυκλική καμπύλη είναι αντίστοιχα:

$$x(F_{\text{παραβολής}}) = L_t \quad [3.6.3.1]$$

$$y(F_{\text{παραβολής}}) = x^3 / 6 L_t R_d \quad [3.6.3.2]$$

$$x(F_{\text{κύκλου}}) = L_t \quad [3.6.3.3]$$

$$y(F_{\text{κύκλου}}) = R_p - (R_d \cdot \cos \gamma) \quad [3.6.3.4]$$

Στον πίνακα 17 διακρίνονται οι τιμές του σημείου F στις δυο γεωμετρίες. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από τιμές των γραμμών υψηλών ταχυτήτων της κατασκευαστικής ακτίνας R_d και από την ανάπτυξη του παραβολικού τόξου L_t , τιμές που αποτελούν τις πιο δυσμενείς καταστάσεις.

Ακτίνα κατασκευής R_d	5300,000 m
Ανάπτυξη της παραβολικής σύνδεσης L_s	330,000 m
Διάταξη αναφοράς στην παραβολή $\gamma(F_{\text{παραβολής}})$	3,423866 m
Διάταξη αναφοράς στον κύκλο $\gamma(F_{\text{κύκλου}})$	3,424489 m
Διαφορά $\Delta\gamma$	0,623 mm
Διαφορά ποσοστού (%)	0,018 %

Πίνακας 17

πηγή FS

όπου

$$L_s = L_t + (1/10) \cdot [L_t^3 / (2R_d)^2] - (1/72) [L_t^5 / (2R_d)^4] + (1/208) [L_t^7 / (2R_d)^6] + \dots$$

Για την δεύτερη συνθήκη η απαίτηση της συνέχειας επαφής επιβάλλει την ανταπόκριση μεταξύ εφαπτόμενης της σύνδεσης και του κύκλου στο σημείο επαφής F. Για να επαληθεύεται η αρχή αυτή, θα πρέπει να ενισχυθούν οι δυο αντιδράσεις της εφαπτόμενης στο σημείο F, παραγωγίζοντας σχετικά την σχέση [3.6.4.2] και η καρτεσιανή εξίσωση του κύκλου είναι :

$$\text{tg } \gamma_{\text{παραβολής}} = \frac{L_t}{2 \cdot R_d} \quad [3.6.3.5]$$

$$\text{tg } \gamma_{\text{κύκλου}} = \frac{L_t}{2 \cdot \sqrt{R_d^2 - (L_t^2 / 4)}} \quad [3.6.3.6]$$

Για να εντοπιστεί η διάφορα μεταξύ των τιμών της γωνίας απόκλισης γ , στο σημείο επαφής F, για τις δυο καμπύλες, με βάση την αρχή κατασκευής, δίνονται οι ελάχιστες τιμές υιοθετημένες από τις γραμμές υψηλών ταχυτήτων για ακτίνα R_d και ανάπτυξη L_s στον πίνακα 18. [42]

Ακτίνα κατασκευής R_d	5.300,000 m
Ανάπτυξη της παραβολικής σύνδεσης L_s	330,000 m
Προβολή της παραβολικής σύνδεσης L_t	329,968 m
Γωνία απόκλισης (εκτροπής) $\gamma_{\text{παραβολής}}$	0,031119 rad
Γωνία απόκλισης $\gamma_{\text{κύκλου}}$	0,031134 rad
Διαφορά $\Delta\gamma$	0,000960
Διαφορά ποσοστού (%)	0,048 %

Πίνακας 18

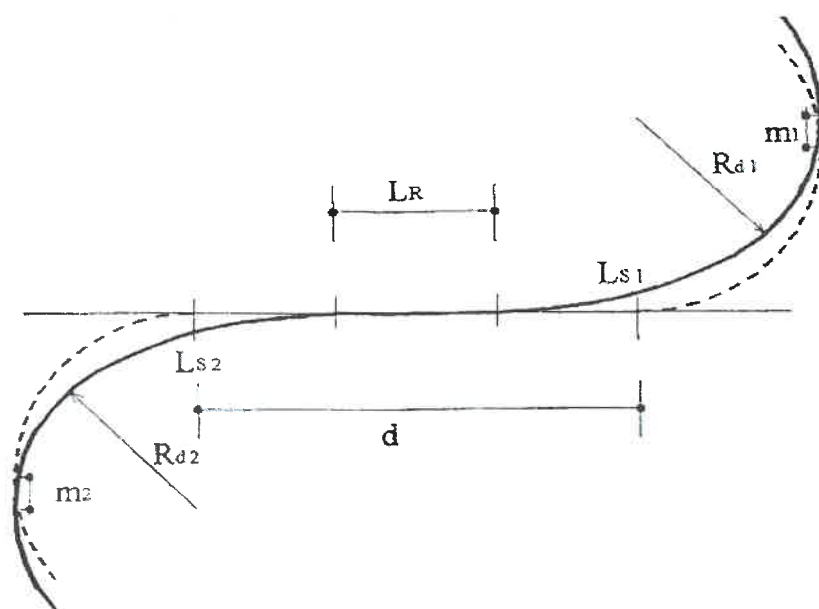
πηγή FS

3.7 Σύνδεση δυο αντίρροπων κυκλικών καμπυλών με ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα

Στις γραμμές υψηλών ταχυτήτων, δεν χρησιμοποιείται μια γεωμετρία ειδική για την κατασκευή συνεχόμενων αντίρροπων καμπυλών, αλλά με απλούς υπολογισμούς δυο αντίρροπων καμπυλών μετάβασης (δυο κυβικές παραβολές) χωρισμένες με ένα ευθύγραμμο τμήμα (βλέπε σχήμα 14).

Όσον αφορά τις δυο κυβικές παραβολές πραγματοποιούνται από κανονικές συνδέσεις συναρμογής που βρίσκονται από γεωμετρικούς τύπους που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες.

Αντίθετα, στο ευθύγραμμο τμήμα που μεσολαβεί μεταξύ των δυο αυτών καμπυλών πρέπει να υπολογίζεται το μήκος L_R που επιτρέπει στο βαγόνι του συρμού να επανακτήσει την πραγματική του προηγούμενη θέση, κάθετη, πριν την καμπύλη, για να αντιμετωπίσει την επόμενη κυκλική καμπύλη.



σχήμα 14 Σύνδεση δυο αντίρροπων κυκλικών καμπυλών με ενδιάμεσο ευθύγραμμο τμήμα
πηγή ING. FER.

Αυτό το μήκος μπορεί να βρεθεί από τον υπολογισμό της απόστασης **d** που πρέπει να μεσολαβεί μεταξύ των δυο σημείων επαπτόμενης στην ευθυγραμμία με τις δυο κυκλικές καμπύλες, στην περίπτωση υψηλών ταχυτήτων, βγάζοντας την σχέση :

$$d = 2 \cdot \frac{V_{\max} \cdot a_q}{2 \cdot 3,6 \cdot C} \quad [3.7.1]$$

όπου

a_q = μη αντισταθμισμένη επιτάχυνση

$$C = \frac{a_q}{t} = \frac{V_{\max} \cdot a_q}{3,6 \cdot L_s} \quad (\text{αναπήδηση}) \quad [3.7.2]$$

L_s = μήκος παραβολικής σύνδεσης

Με βάση το σχήμα 14 η απόσταση **d** είναι ίση με το ημιάθροισμα των μήκων L_{s1} και L_{s2} από τις παρακείμενες κυβικές παραβολές και από το ανάπτυγμα L_R του ευθύγραμμου τμήματος. [43]

Για το L_R , με βάση εμπειρίες των Ιταλών μηχανικών στην Ιαπωνία, στηριζόμενοι στην μελέτη σιδ/κου οχήματος σε καμπύλη, προτείνουν, την υιοθεσία μιας σχέσης για το ευθύγραμμο μήκος που είναι:

$$L_R = \frac{1,5 \cdot V_{\max}}{3,6} \quad [3.7.3]$$

όπου 1,5 είναι ο χρόνος, σε δευτερόλεπτα (sec), που πρέπει να τηρηθεί απαραίτητα για την επαναφορά της κίνησης του οχήματος στην κανονική του θέση, την κάθετη.

Αυτή η τιμή για το L_R μετά από ορισμένες πράξεις είναι ίση με την ποσότητα $V_{\max} / 2$, που η τιμή της είναι σίγουρα μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή 30 m που ισχύει για τις ταχύτητες από 100 km/h < V < 160 km/h με τιμή 50 m που ισχύει για ταχύτητες μεγαλύτερες του 160 km/h.

Σταθεροποιώντας έτσι μια τιμή ενδεικτική του L_R , βρίσκουμε τις ποσότητες L_{s1} και L_{s2} από τα δυο παραβολικά τόξα με βάση και την σχέση [3.7.2] και την D , υπερύψωση στην καμπύλη της εξωτερικής σιδήχιας, και είναι δυνατόν να βρεθεί αν η απόσταση d είναι ανάλογη με την ακόλουθη σχέση που ισχύει για τις γραμμές υψηλών ταχυτήτων :

$$d = \frac{L_{s1} + L_{s2}}{2} + 50 = \frac{V_{\max} \cdot a_{q,\max}}{2 \cdot 3,6 \cdot C \cdot D_{\max}} \cdot (D_1 + D_2) + 50 \quad [3.7.4]$$

Άρα, τα στοιχεία εκείνα που συνθέτουν την αποκαλούμενη, κατά FS, **σύνδεση ευκαμπψίας**, μπορούν να βρεθούν από την ανάλυση των μεγεθών a_q και του ε στην περιοχή όπου παρατηρείται η αλλαγή της επιπεδομετρικής καμπυλότητας.

Δίνοντας τα οριακά στοιχεία για την γεωμετρία των γραμμών υψηλών ταχυτήτων, σχηματίζοντας την σύνδεση αυτή με παρεμβολή ενός ευθύγραμμου τμήματος L_R , των 50 m, μπορεί να βρεθεί η εξέλιξη της μη αντισταθμισμένης φυγόκεντρης επιτάχυνσης a_q και της αναπήδησης C με την μεταβολή του χρόνου, παίρνοντας για την αναζήτηση της υπερύψωσης D , σε σχέση με την ακτίνα της καμπυλότητας r :

$$D = 6,29 \cdot V_{\max}^2 / r \quad [3.7.5]$$

$$a_q = \frac{g}{1500} \cdot \left(11,8 \cdot \frac{V_{\max}^2}{r} - D \right) \quad [3.7.6]$$

$$C = \frac{\Delta a_q}{\Delta t} \quad [3.7.7]$$

Οι τιμές του a_q και του C , εφικτές, επιτρέπουν την εμφάνιση μιας ασυνέχειας δυναμικού τύπου, προφανές για δεδομένα στοιχεία αναζητώντας την αναπήδηση C , στην πραγματικότητα, στα σημεία όπου βρίσκονται σε επαφή διαφορετικά γεωμετρικά στοιχεία (βλέπε πίνακα 19).

Εξεταζόμενο σημείο	Αναπήδηση C [m/sec ³]
Τέλος πρώτης κυκλικής καμπύλης	0
Αρχή πρώτης παραβολικής σύνδεσης	0,145857
Τέλος πρώτης παραβολικής σύνδεσης	- 0,146959
Αρχή ευθύγραμμου τμήματος	0
Τέλος ευθύγραμμου τμήματος	0
Αρχή δεύτερης παραβολικής σύνδεσης	0,146959
Τέλος δεύτερης παραβολικής σύνδεσης	- 0,145857
Αρχή δεύτερης κυκλικής καμπύλης	0

Πίνακας 19

πηγή FS

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων του πίνακα 25, επιτρέπει την ανίχνευση μιας προφανής ασυνέχειας για την μη αντισταθμισμένη φυγόκεντρη επιτάχυνση σε συνδυασμό με το ευθύγραμμο τμήμα. Αυτή η ασυνέχεια, επιβεβαιωμένη από τα πραγματικά δεδομένα της αναπήδησης, αποδεικνύει μια μείωση του επιπέδου της άνεσης για τους επιβάτες και γενικά μια χειροτέρευση της εξυπηρέτησης. [44]

3.8 Κατά μήκος κλίσεις

Η παρουσία των κατά μήκος κλίσεων σε μια γραμμή προκαλεί:

- ~ αύξηση της αντίστασης κίνησης του συρμού
- ~ κατακόρυφες επιταχύνσεις
- ~ προβλήματα στην ομαλή και ασφαλή πορεία των συρμών στις κατωφέρειες και τις ανωφέρειες
- ~ μείωση της ορατότητας των μηχανοδηγών

Τα παραπάνω φαινόμενα έχουν δυσμενής επιπτώσεις στο τροχαίο υλικό, στην 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 (δηλαδή η ποσοτική και ποιοτική ενόχληση των επιβατών από τις επιταχύνσεις του αμαξώματος, ενόχληση η οποία εξαρτάται από την διεύθυνση των επιταχύνσεων, την ταχύτητα μεταβολής της επιτάχυνσης, την στάση των επιβατών καθήμενοι ή όρθιοι κτλ)
- Απαιτούνται μεγαλύτερες δυνάμεις τροχοπέδησης

Οι FS δίνουν τον τρόπο κατά τον οποίο αναζητούνται οι μέγιστες κατά μήκος κλίσεις p ($p \equiv i$ για το διάγραμμα 24) βάση της δυνατότητας που μπορούν να προσφέρουν οι διάφοροι τύποι μηχανών των συρμών για σταθερές ταχύτητες, δηλαδή:

- Το τμήμα σύνθεσης του τύπου του συρμού :επιβατικά με αμάξωμα 50 t ρυμουλκό ή με αμάξωμα ηλεκτροκίνητο με την ταχύτητα γραμμής. Εμπορικά 25 βαγονιών με 36 t σύνθεσης για οποιοδήποτε τύπο γραμμής εκτός από την περίπτωση κίνησης στις υψηλές ταχύτητες όπου εκεί υπάρχει μια ειδική σύνθεση.
- Θεωρείται ένας τύπος ατμομηχανής αντιπροσωπευτικός και έτσι βρίσκεται η δύναμη του αγκιστρίου (γάντζου), T_g , βγάζοντας την αντίσταση της κίνησης R_0 , την αντίσταση για την κλίση R_i και αυτή της καμπύλης R_c της ατμομηχανής από την δύναμη έλξης T :

$$T - (R_0 + R_i + R_c) \quad , \quad \text{με} \quad T = \frac{367 \text{ W}}{V} \quad [3.8.1]$$

όπου :

$$T = Kg$$

$$W = \text{η ισχύς της ατμομηχανής σε kilowatt}$$

$$V = Km/h$$

$$R_0 = 3,2 P + 0,053 V^2 \quad , \quad \text{με } P \text{ το βάρος της ατμομηχανής σε τόνους}$$

$$R_i = P \cdot i \text{ ‰}$$

$$R_c \approx 0$$

- Αναζητούνται για τους δυο τύπους τρένων τα αθροίσματα της αντίστασης σε σχέση με την κλίση :

$$R \text{ (συρμός εμπορικού τύπου)} = P_r (2,5 + 0,0005 V^2 + i)$$

όπου P_r = βάρος των ρυμουλκούμενων αμαξωμάτων σε τόνους

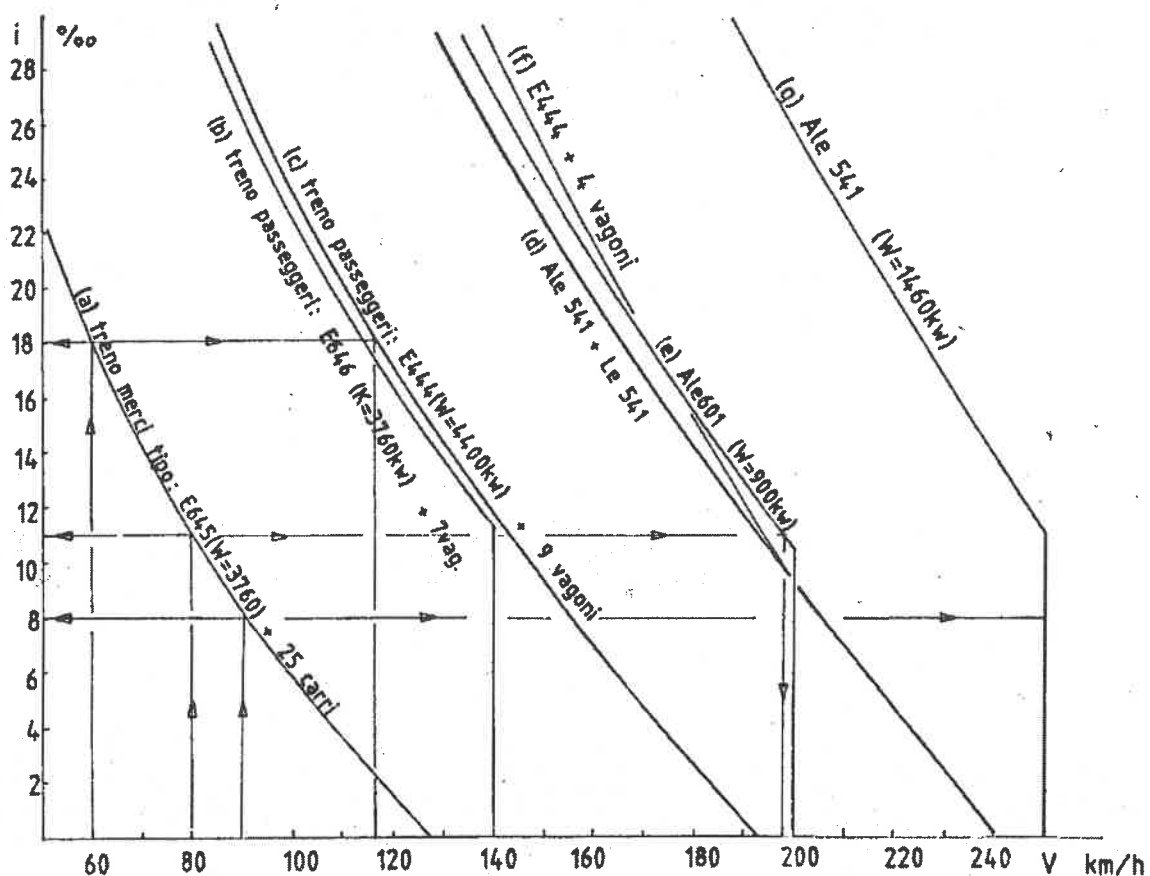
$$R \text{ (συρμός επιβατικού τύπου)} = P'_r (2,5 + 0,0003 V^2 + i)$$

όπου P'_r = βάρος των επιβατικών αμαξωμάτων σε τόνους

όπου R (Kg) , V (Km/h) , i ‰

➤ Μπορεί τώρα να απεικονιστεί το διάγραμμα 24 όπου δίνει για έναν δεδομένο τύπο συρμού σε σχέση με την ταχύτητα την κατά μήκος κλίση.

➤ Για κάθε τύπο σιδ/κης γραμμής ορίζεται ένα ζεύγος ελάχιστων ταχυτήτων (για επιβατικά και εμπορικά) όπως για π.χ. : νέες γραμμές 250 – 90 Km/h, συμβατικές 200 – 80 Km/h, τοπικές 120 – 60 Km/h και αντίστοιχα με αυτές στο διάγραμμα 25 διαβάζονται οι μέγιστες κατά μήκος κλίσεις.



Διαγρ 24 Διάγραμμα ταχύτητας – κατά μήκος κλίσης, για διάφορους τύπους σιδ/μικών οχημάτων πηγή FS

Για τους επιβατικούς συρμούς σε γραμμές υψηλών ταχυτήτων αλλά και συμβατικές ο τύπος του συρμού μπορεί να σχηματιστεί :

1. Για γραμμές με ταχύτητα $V_{\max} = 200 \text{ km/h}$ ή από ένα όχημα σιδ/κο που αποτελείται από μια ατμομηχανή *E444* ($W = 4400 \text{ KW}$) + 4 βαγόνια των 50 t ή από ένα ηλεκτροτρένο συμπληρωμένο με αυτοκινητάμαξες, π.χ. του τύπου *ALe 601* ($W = 900 \text{ KW}$) ή ηλεκτροτρένο του τύπου *ALe 541* + ρυμουλκό *Le 541*
2. Για σιδ/κες γραμμές με ταχύτητα $V_{\max} = 250 \text{ km/h}$ από ένα ηλεκτροτρένο συμπληρωμένο με όλες τις αυτοκινητάμαξες π.χ. του τύπου *ALe 541* ($W = 1460 \text{ KW}$).
3. Για γραμμές με ταχύτητα $V=140 \text{ Km/h}$ από μια ατμομηχανή *E646* ($K=3760 \text{ KB}$) + 7 βαγόνια. [37]

Συνήθως η κατά μήκος κλίση σε κύριες γραμμές υπεραστικών σιδ/μων δεν υπερβαίνει την τιμή 12,5 ‰. Ο ΟΣΕ δέχεται 16 ‰. Στους μητροπολιτικούς σιδ/μους επιτρέπεται 40 ‰ και στο τραμ 100 ‰, διότι η αναλογία ισχύος κινητήρα –ελκόμενο βάρος είναι μεγαλύτερη αυτής των υπεραστικών σιδ/μων.

Στους σταθμούς η κατά μήκος κλίση οφείλει να μην υπερβαίνει το 2,5 ‰, σε γραμμές σταθμών διαλογής το 1,67 ‰ και σε σήραγγες μήκους έως 1000 m τουλάχιστον το 2 ‰ και για μεγαλύτερο των 1000 m τουλάχιστον 4‰.

Σε γραμμές υψηλών ταχυτήτων ($V \geq 250 \text{ Km/h}$) η μέγιστη επιτρεπόμενη κατά μήκος κλίση φθάνει το 40 ‰, καθόσον στις ταχύτητες αυτές οι συρμοί έχουν αποκτήσει μεγάλη κινητική ενέργεια που τους διευκολύνει να υπερβαίνουν τις κλίσεις αυτές χωρίς σημαντική μείωση της ταχύτητάς τους. [41]

3.9 Η σημασία της διατήρησης της υφισταμένης χάραξης στα σιδ/κα δίκτυα – Συρμοί με ανακλινόμενο αμάξωμα

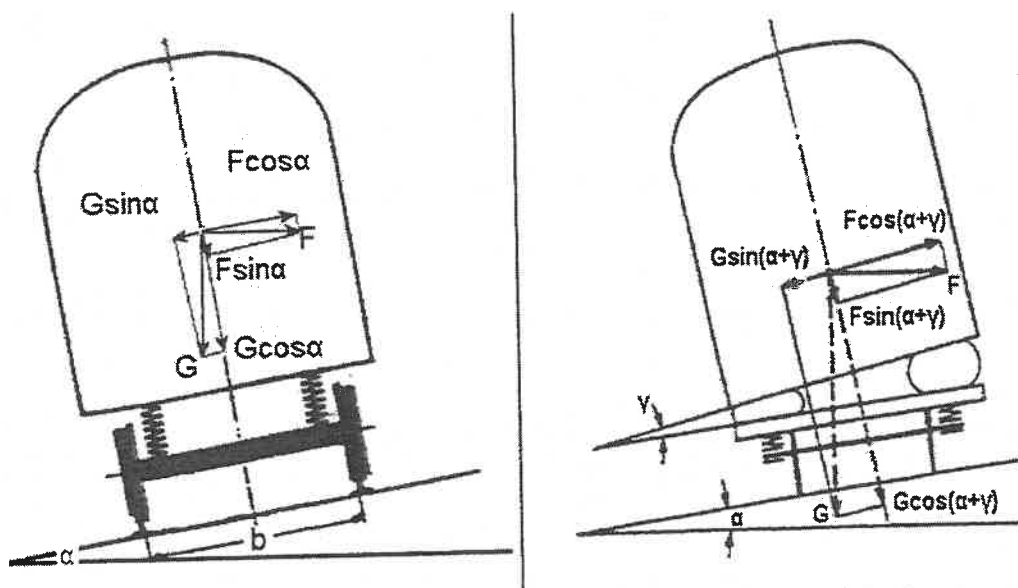
Τις τελευταίες τέσσερις δεκαετίες, οι σιδηροδρομικές εταιρείες προσπάθησαν να προσαρμοστούν στις αυξημένες ανάγκες για μεταφορές, βελτιώνοντας κυρίως τα βασικά υλικά της επιδομής (σιδ/χίες, στρωτήρες, έρμα), χωρίς, πάντως, στην πλειοψηφία τους να προχωρήσουν σε νέες ή βελτιωμένες χαράξεις. Παρά, λοιπόν, τις σχετικά μεμονωμένες περιπτώσεις, όπου κατασκευάστηκαν καινούργιες γραμμές υψηλών ταχυτήτων (*TGV –Train à Grande Vitesse* στη Γαλλία, *ICE –InterCity Express* στη Γερμανία), το μεγαλύτερο ποσοστό του υφιστάμενου σιδηροδρομικού δικτύου διατηρεί την ίδια μορφή με αυτή της αρχικής κατασκευής του. Η χάραξη, εξάλλου, ενός νέου δικτύου προϋποθέτει, εκτός από την πραγματοποίηση τεράστιων επενδύσεων, την ύπαρξη σημαντικής έκτασης ελεύθερου χώρου, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και ενδεχομένως έχει περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Επιπλέον, πρέπει να σημειωθεί ότι οι επενδύσεις μεγάλου μεγέθους για βελτιώσεις υποδομής στα σιδηροδρομικά δίκτυα θα είναι δυσκολότερο να εγκριθούν στο μέλλον, αφού θα πραγματοποιούνται μόνο ύστερα από εκτενή χρηματοοικονομική ανάλυση σκοπιμότητας.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες, γίνεται σαφές ότι η αύξηση της ταχύτητας των συρμών και, συνεπώς, η μείωση του χρόνου ταξιδιού θα πρέπει να επιτευχθεί χωρίς την πολυτέλεια νέων χαράξεων ή δαπανηρών επεμβάσεων στις υπάρχουσες γραμμές.

Συρμοί με ανακλινόμενο αμάξωμα

Με βάση, λοιπόν τα παραπάνω, **οι συρμοί με καθοδηγούμενα ανακλινόμενο αμάξωμα (*tilting trains*)** προσφέρονται ως μια αξιόπιστη και αρκετά οικονομική λύση πάνω στο πρόβλημα της μείωσης του χρόνου διαδρομής σε υφισταμένη χάραξη. Η αρχή της λειτουργίας τους είναι αρκετά απλή: κατά τη διέλευση του συρμού από μια καμπύλη επιτυγχάνεται, με τη χρήση ενός ειδικού μηχανισμού ανάρτησης, επιπλέον κλίση του αμαξώματος σε σχέση με το φορείο προς το εσωτερικό της καμπύλης (βλέπε εικ. 32) και σαν αποτέλεσμα η παραμένουσα φυγόκεντρος δύναμη που επιδρά στους επιβάτες μειώνεται, λόγω της αυξημένης συνιστώσας το βάρους που την αντισταθμίζει. Η ύπαρξη της φυγόκεντρου δύναμης αποτελεί, ως γνωστόν, το βασικό αίτιο περιορισμού της ταχύτητας στις καμπύλες, αφού δημιουργεί αίσθημα όχλησης στους επιβάτες του τρένου. Η ανάκλιση του αμαξώματος επιτρέπει, συνεπώς, την επίτευξη υψηλότερων ταχυτήτων από αυτές που αναπτύσσουν οι συνήθεις συρμοί σε μια δεδομένη καμπύλη, χωρίς αυτό να έχει καμία επίπτωση στην άνεση και στην ασφάλεια των επιβατών. Οι φυγόκεντρες επιταχύνσεις εξισορροπούνται περίπου κατά 75%, ενώ η αύξηση της ταχύτητας και, συνεπώς, η μείωση του χρόνου διαδρομής μπορεί να φθάσει το 30 – 35%, ανάλογα με τη μορφή της χάραξης και το σύστημα ανάκλισης που χρησιμοποιείται.



εικ. 32 Απεικόνιση των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε συμβατικό (αριστερά) και ανακλινόμενο (δεξιά) συρμό. Στην τελευταία περίπτωση, η συνιστώσα του βάρους G

$\sin(a + \gamma)$ αντισταθμίζει ένα σημαντικότερο ποσοστό της φυγόκεντρης δύναμης F που ασκείται στους επιβάτες, λόγω της πρόσθετης κλίσης του αμαξώματος προς το εσωτερικό της καμπύλης κατά γωνία γ .

Το πρόβλημα που προκύπτει με την υιοθέτηση υψηλότερων ταχυτήτων σε δεδομένες καμπύλες είναι η αύξηση της καταπόνησης της σιδηρίας και του τροχού (ιδιαίτερα του όνυχας) αφού οι εγκάρσιες δυνάμεις επαφής που δρουν κατά την κύλιση στην καμπύλη εξαρτώνται από το τετράγωνο της ταχύτητας και προφανώς δεν επηρεάζονται από την ανάκλιση του αμαξώματος. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου χρησιμοποιούνται συχνά ειδικά **φορεία με ακτινικά καθοδηγούμενους άξονες**, ενώ παράλληλα περιορίζεται το μέγιστο επιτρεπτό βάρος ανά άξονα (14 tn περίπου για συρμούς με κλασικά φορεία).

Το κόστος για την εγκατάσταση και την λειτουργία συρμών με ανακλινόμενο αμάξωμα προκύπτει, λόγω της διατήρησης της χάραξης, αισθητά μειωμένο (περίπου 10 φορές, ως τάξη μεγέθους) συγκριτικά με αυτό που απαιτείται για την κατασκευή μιας νέας γραμμής. Εκτός από το προσθετό κόστος για την προμήθεια και την συντήρηση των συρμών, απαιτούνται κάποιες προσαρμογές στη γραμμή, το κόστος των οποίων εκτιμάται στην Γαλλία σε 153.000 ευρώ ανά χιλιόμετρο (τιμές 1996), χωρίς όμως να υπολογίζονται τα απαραίτητα τεχνικά έργα ή άλλες κατασκευές (ανισόπεδες διαβάσεις), που αυξάνουν αισθητά το παραπάνω ποσό. Σε κάθε περίπτωση, η τιμή εξακολουθεί να είναι σημαντικά χαμηλότερη από τα 7,63 εκατ. ευρώ ανά χιλιόμετρο που κοστίζει περίπου η τοποθέτηση μιας νέας γραμμής. **[41]**

4. Συμπεράσματα – Γενικά σχόλια για την ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών συμβατικών και συρμών υψηλών ταχυτήτων

Επιδομή – Υποδομή σιδηροδρομικής γραμμής

► Ως προς το κατασκευαστικό κόστος της Σταθερής Επιδομής σε σχέση με την Σκυρογραμμή, αρχικά το κόστος της Σ.Ε. ξεπερνούσε κατά πολύ (περίπου 1,8 φορές μεγαλύτερο) αυτό της Σκυρογραμμής. Στην συνέχεια όμως έγιναν προσπάθειες να βρεθούν και άλλοι τύποι Σ.Ε. και σύμφωνα με τους κ. J. *Eisenmann* και κ. *Laykauf* διαπιστώνεται ότι «το κόστος κατασκευής Σ.Ε. επάνω σε επίχωμα συγκρινόμενο με το κόστος σκυρογραμμής υψηλών ταχυτήτων είναι ελάχιστα αυξημένο. Εάν όμως ληφθεί υπόψη το αυξημένο κόστος συντήρησης της σκυρογραμμής, κατά τακτά χρονικά διαστήματα και η ανωμαλία που επιφέρει στην κυκλοφορία η εν λόγω συντήρηση, τότε η Σ.Ε. που δεν χρειάζεται συντήρηση, βρίσκεται σε πλεονεκτική θέση».

► Στην περίπτωση χρησιμοποίησης ελαστικού υποθέματος και κατάλληλου συνδέσμου τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα αυξημένης ελαστικότητας υποθέματα (μαλακά) επιτρέπουν στην σιδηροτροχιά αισθητά μεγαλύτερη κίνηση στην θέση συσφίξεως, έναντι των αντίστοιχων σκληρών υποθεμάτων συνθετικής ύλης. Η δυνατότητα αυξημένης κίνησης της σιδηροτροχιάς κάτω από τον σύνδεσμο, προκαλεί μεγάλη καταπόνηση στο ελατηριωτό αγκύριο. Είναι σημαντικό να επιτευχθεί η σωστή απόκριση του ελατήριου με το σύνδεσμο για να προσδωθεί, με τον τρόπο αυτό, καλύτερη βύθιση της σιδ/χίας και να αποτραπεί η όδευση της πάνω στον στρωτήρα σε οποιοδήποτε είδος γραμμής και να χρησιμοποιηθούν. Η βελτίωση των φορτίσεων επί του έρματος είναι ανάλογη με αυτής της χρησιμοποίησης μαλακών ελαστικών υποθεμάτων, καθώς η αντοχή του ελαστικού μειώνεται σημαντικά από την τριβή του με το σκύρο.

► Στην περίπτωση της αντίδρασης – φόρτισης της υποδομής, η σκληρή (ανυποχώρητη) υποδόμη (βύθιση σε 20 t αξονικό φορτίου μόνον 0,15 mm αντί 0,35 mm) επιφέρει ιδιαίτερα δυσμενή αποτελέσματα για ορισμένες παραμέτρους. Οπότε μια μαλακότερη υποδομή επιδρά ευνοϊκότερα στο έρμα.

► Στη Σκυρογραμμή η διάδοση της καταπόνησης και της παραμόρφωσης της γραμμής αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας και το μέγεθος της είναι ανάλογο με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η επιδομή γραμμής. Συνέπεια αυτού είναι η πλήρης καταστροφή του έρματος, παρά την χρησιμοποίηση σκληρών πετρωμάτων (βασαλτικά, γρανιτικά, κλπ), και η μεγάλη αύξηση του κόστους συντήρησης της γραμμής, σε αντίθεση με την Σ.Ε. που τόσο η ποιότητα και η ασφάλεια της κυκλοφορίας όσο και το ελάχιστο κόστος συντήρησης είναι στοιχεία που επιβάλλουν την αντικατάσταση της Σκυρογραμμής.

► Με βάση τον υπολογισμό κατάσταση της γραμμής με την μέθοδο της 4^{ης} και της 2^{ας} δύναμης και το είδος των χρησιμοποιούμενων στρωτήρων και σιδ/χιων

ισχύει, ότι, η βαριά επιδομή (σιδ/χίες UIC 60, στρωτήρες B70 ανά 60 cm) με φορτίο εκμετάλλευσης 50.000 έως 80.000 τόνους ημερησίως, με ανώτερη ταχύτητα για IC 160 έως 200 Km/h, παρουσιάζει μεγάλη ικανότητα για μακροχρόνια διατήρηση της καλής κατάστασης της γραμμής. Θα πρέπει επίσης για την ασφαλή κυκλοφορία να γίνεται επιλογή κατάλληλης σιδ/χίας. Για παράδειγμα για ταχύτητες από 140 Km/h έως και 180 Km/h θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο σιδ/χίες UIC 60 στις οποίες οι θραύσεις είναι περιορισμένες έναντι των σιδ/χιων S49 ή S 54. Για την περίπτωση στρωτήρων, σε μεγαλύτερες ταχύτητες, 220 έως 230 Km/h, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται στρωτήρες μεγαλύτερου μήκους με μεγαλύτερη ενεργό επιφάνεια έδρασης όπως π.χ. ο στρωτήρας B75 (2800x330mm). Λόγω της αυξημένης δυναμικής καταπόνησης του έρματος από τους συρμούς υψηλών ταχυτήτων και την εκ της αιτίας αυτής προκαλούμενη γρήγορη αποσταθεροποίηση της γραμμής, η χρησιμοποίηση της 2^{ης} δύναμης παρέχει ρεαλιστικά αποτελέσματα ως προς την αύξηση του χρόνου διατήρησης της καλής κατάστασης της γραμμής. Έτσι από την χρησιμοποίηση του στρωτήρα B75 ανά 65cm αναμένεται να βελτιωθεί η μεταβολή κατάστασης της γραμμής η οφειλόμενη στην μεγάλη καταπόνηση, λιγότερο με την 2^η δύναμη, απ' ό,τι με τον υπολογισμό με την 4^η δύναμη. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη, τέλος, το γεγονός ότι κατά την χρησιμοποίηση σε γραμμές υψηλών ταχυτήτων του στρωτήρα B75 και της δυνατότητας επαύξησης της υπερύψωσης και της ανεπάρκειας υπερύψωσης, συνεπάγεται χρησιμοποίηση μικρότερων ακτινών καμπυλότητας από αυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα.

► Στις μικρές ταχύτητες η δύναμη αλληλεπίδρασης «τροχός – σιδ/χία» διαφέρει ελάχιστα από την στατική δύναμη του τροχού και για τον υπολογισμό των επιδράσεων της γραμμής χρησιμοποιήθηκε ο τύπος του Zimmermann. Σε υψηλές ταχύτητες του κυλιόμενου φορτίου οι διαφοροποιήσεις της δύναμης του τροχού επί της σιδ/χίας (η ονομαζόμενη «δυναμική φόρτιση τροχού») είναι πολύ υψηλότερες. Αντιστοίχως τροποποιούνται οι δυνάμεις μεταξύ σιδ/χίας και στρωτήρα καθώς και μεταξύ στρωτήρα και έρματος.

Χάραξη σιδηροδρομικής γραμμής

► Για την ακτίνα καμπυλότητας, ο διαχωρισμός που γίνεται, χωρίς να είναι απόλυτος, οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές συνθήκες κύλισης που παρουσιάζουν τα συμβατικά φορεία κατά την εγγραφή τους στις διάφορες κατηγορίες καμπυλών. Επίσης η επιλογή των ακτινών καμπυλότητας αποτελεί βασική παράμετρο για την σωστή λειτουργία ενός σιδ/κου δικτύου καθώς όσο μικρότερη είναι η ακτίνα καμπυλότητας, τόσο μεγαλύτερα και περισσότερα είναι τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά την διέλευση των συρμών. Η επιλογή των ακτινών καμπυλότητας, γενικά, πρέπει να γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τους παρακάτω παράγοντες:

- την τοπογραφία του εδάφους σε σχέση με την υπάρχουσα χρηματοδότηση
- τις ταχύτητες διέλευσης του ταχύτερου και του αργότερου συρμού που προβλέπεται να κυκλοφορήσουν στην γραμμή
- τις κατηγορίες των κυκλοφορούντων συρμών (επιβατικοί, εμπορικοί κτλ)

καθώς επίσης και την ποσοστιαία αναλογία τους

- τα τεχνικά χαρακτηριστικά του επιλεγέντος τροχαίου υλικού και της επιδομής
- τη συμπεριφορά του ανθρώπινου σώματος στις εγκάρσιες επιταχύνσεις
- τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ενδεχόμενης χάραξης

Ο τύπος που δίνει την τιμή της ακτίνας της καμπύλης για συμβατικές και γραμμές υψηλών ταχυτήτων είναι:

$$\frac{11,8 \cdot V_{\min}^2}{D - E} \geq R \geq \frac{11,8 \cdot V_{\max}^2}{D + I} \quad (m)$$

► Στην περίπτωση της υπερύψωσης σε μια γραμμή μικτής κυκλοφορίας, λόγω της ιδιότητας της γραμμής να κυκλοφορούν πολλών ειδών συρμοί, είναι αναγκαία η εύρεση μιας μέσης τιμής ανάμεσα στην ανεπάρκεια και το πλεόνασμα υπερύψωσης που να εξασφαλίζει για όλους τους συρμούς :

1. Ασφαλή κυκλοφορία
2. Δυνατότητα παραμονής και εκκίνησης στις καμπύλες
3. Ικανοποιητική εγκάρσια δυναμική άνεση των επιβατών
4. Καταπόνηση της επιδομής και του τροχαίου υλικού σε ανεκτά επίπεδα

Η τιμή αυτή είναι η κανονική υπερύψωση και ουσιαστικά εκφράζει την επί τόπου μετρούμενη υπερύψωση μιας συγκεκριμένης καμπύλης. Η κανονική υπερύψωση είναι πάντοτε μικρότερη από την θεωρητική υπερύψωση που αντιστοιχεί στους συρμούς υψηλών ταχυτήτων. Επίσης βρέθηκε ότι, στην περίπτωση επιβατικού συρμού με μέγιστη ταχύτητα $V_{\max} = 300 \text{ Km/h}$ και ενός συρμού εμπορευματικού με μέγιστη ταχύτητα $V_{\max} = 100 \text{ Km/h}$ σε μικτή γραμμή κυκλοφορίας το πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι για τον επιβατικό συρμό καθώς θα εμφανίζει συνεχώς μια ανεπάρκεια υπερύψωσης μεγάλη και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να καταπονείτε η εξωτερική σιδ/χια πολύ περισσότερο από την εσωτερική και τα προβλήματα να μεγαλώνουν τόσο για την ασφάλεια και την άνεση των επιβατών στην γραμμή όσο και για την ποιότητα της γραμμής (καταστροφή σιδ/χιας, συνεχείς συντήρηση γραμμής κτλ) .

► Τα χαρακτηριστικά στοιχεία που πρέπει να προσεχθούν σε καμπύλες κατά την κατασκευή συμβατικών και γραμμών υψηλών ταχυτήτων , καθώς εκεί παρουσιάζονται οι διαφορές στις τιμές τους είναι:

1. Η εφαρμοσμένη υπερύψωση
2. η ανεπάρκεια υπερύψωσης
3. τα πλεόνασμα υπερύψωσης
4. η μεταβολή της εφαρμοζόμενης υπερύψωσης
5. η μεταβολή της ανεπάρκειας υπερύψωσης

Για κάθε ένα από αυτά τα στοιχεία δόθηκαν οι μέγιστες οριακές και οι προτεινόμενες τιμές, ανάλογα με την διανυόμενη ταχύτητα των συρμών στην γραμμή.

Η εφαρμοζόμενη υπερύψωση παίρνει την μέγιστη τιμή της $D=180$ mm και έχει ως προτεινόμενη την $D=160$ mm για όλες τις ταχύτητες των συρμών. Η ανεπάρκεια υπερύψωσης για κάθε είδους συρμό δίνεται από τον πίνακα 9 όπου φαίνονται οι ελάχιστες και οι μέγιστες τιμές! Η μεταβολή της ανεπάρκειας υπερύψωσης στην μονάδα του χρόνου υπολογίζετε μικρότερη από την τιμή 60 ή 63 mm/sec σταθερή κατά μήκος της παραβολικής συναρμογής.

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

► Στην περίπτωση σύνδεσης δυο καμπύλων ομόρροπων η σύνδεση γίνεται με ενιαία παραβολική συναρμογή χωρίς μεσολάβηση ευθυγράμμου τμήματος, ενώ στην περίπτωση αντίστροφων καμπυλών της κύριας γραμμής θα πρέπει οπωσδήποτε να μεσολαβεί ένα ευθύγραμμο τμήμα αρκετά μεγάλο, ώστε να μπορούν να παρεμβληθούν από μια παραβολική συναρμογή προς κάθε κυκλική καμπύλη, ειδικά στις γραμμές υψηλών ταχυτήτων εφόσον μια γρήγορη εναλλαγή καμπυλών και ευθειών μπορεί να προκαλέσει μειώσει στην άνεση των επιβατών. Μεταξύ των δυο αυτών συναρμογών πρέπει να παρεμβάλλεται ευθύγραμμο τμήμα ελάχιστου μήκους 30 m για συμβατικούς συρμούς, ενώ για γραμμές υψηλών ταχυτήτων το μήκος αυτό ξεπερνάει τα 50 m. Στην περίπτωση που δεν είναι δυνατή η παρεμβολή του ελάχιστου ευθύγραμμου τμήματος, θα πρέπει το τμήμα αυτό να παραλείπεται και οι δυο συναρμογές να έχουν κοινή αρχή, κοινή εφαπτόμενη και την ίδια μεταβολή καμπυλότητας.

► Για τις κατακόρυφες συναρμογές, όσον αφορά την άνεση της κυκλοφορίας, πρέπει να επιδιώκεται, η ακτίνα της κατακόρυφης κυκλικής συναρμογής να είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη. Επίσης, δεν πρέπει να γίνονται αλλαγές κλίσεις, εκεί όπου οριζοντιογραφικά υπάρχουν παραβολικές συναρμογές και συνεπώς πρηνή υπερύψωσης. Στην περίπτωση που η ταυτόχρονη συνύπαρξη συναρμογών σε οριζοντιογραφία και μηκοτομή δεν μπορεί να αποφευχθεί, εφαρμόζεται η μεγαλύτερη δυνατή ακτίνα καμπυλότητας.

Παρατηρώντας τον τρόπο κατά τον οποίο συμβάλουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά στην επίτευξη γραμμών με υψηλές ταχύτητες, στοιχεία που βρίσκονται σε στάδιο ερευνάς είναι η επίδραση της συμπίεσης του έρματος και η επίπτωση των δονήσεων (κραδασμών) στην αιτία της όχι ομοιόμορφης βύθισης του έρματος και την εξ' αυτής επιδείνωση της κατάστασης της γραμμής καθώς και η εκ του λόγου τούτου προκαλούμενη φθορά του έρματος.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Γενικός πίνακας συμβόλων

1	2	3	4
No	Σύμβολο	Προσδιορισμός	Μονάδες
1	a_q	Μη αντισταθμισμένη πλευρική επιτάχυνση	m/sec ²
2	da_q/dt	Ρυθμός μεταβολής της μη αντισταθμισμένης επιτάχυνσης συναρτήσει του χρόνου	m/sec ³
3	a_l	Σχεδόν-στατική πλευρική επιτάχυνση παράλληλη στο δάπεδο οχημάτων	m/sec ²
4	da_l/dt	Ρυθμός μεταβολής της σχεδόν-στατικής πλευρικής επιτάχυνσης παράλληλη στο δάπεδο του οχήματος	m/sec ³
5	a_v	Κάθετη επιτάχυνση σε κάθετη καμπύλη	m/sec ²
6	D	Υπερύψωση	mm
7	D_i	Οριακή υπερύψωση	mm
8	dD/dt	Ρυθμός μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου	mm/sec
9	dD/dL	Ρυθμός μεταβολής υπερύψωσης συναρτήσει του μήκους	mm/m
10	E	Πλεόνασμα ή υπερβολή κλίσης	mm
11	e	Απόσταση μεταξύ επιφάνειας κύλισης των αξόνων (1500 mm)	mm
12	h_q	Ύψος κέντρου βάρους	mm
13	I	Ανεπάρκεια υπερύψωσης	mm
14	dI/dt	Ρυθμός μεταβολής ανεπάρκειας υπερύψωσης συναρτήσει του χρόνου	mm/sec
15	L	Το μήκος καμπύλης συναρμογής ή βαθμός κλίσης	m
16	L_i	Μήκος στοιχείων χάραξης (κυκλικές καμπύλες και ευθυγραμμίες)	m
17	R	Ακτίνα οριζόντιας καμπύλης	m
18	R_v	Ακτίνα κάθετης καμπύλης	m
19	s	προσθετός συντελεστής πλευρικής επιτάχυνσης για οχήματα με μη ελεγχόμενη ανάρτηση κατά UIC 505-5 OI	-
20	t	Χρόνος	sec
21	V	Ταχύτητα γραμμής	km/h
22	V_{max}	Μέγιστη ταχύτητα στην καμπύλη των "γρήγορων" τρένων	km/h
23	V_{min}	Ελάχιστη ταχύτητα στην καμπύλη των "αργών" τρένων	km/h
24	g	Επιτάχυνση λόγω βαρύτητας	m/sec ²
25	lim	Οριακές τιμές	-
26	Δa_q	Μεταβολή της μη-αντισταθμισμένης πλευρικής επιτάχυνσης κατά μήκος της καμπύλης συναρμογής	m/sec
27	ΔI	Μεταβολή της ανεπάρκειας υπερύψωσης κατά μήκος μιας καμπύλης συναρμογής	mm
28	ΔD	Συνολική μεταβολή υπερύψωσης κατά μήκος μιας καμπύλης συναρμογής, μεταξύ μιας ευθείας και μιας καμπύλης γραμμής ή μεταξύ δυο παρακείμενων καμπυλών διαφορετικών ακτινών	mm
29	Q	Δυναμικό φορτίο ανά τροχό	N
30	ΔQ	Μεταβολή φορτίων ανά τροχό	N
31	Y	Κινητήρια δύναμη στην επαφή τροχού- σιδ/χιας	N

⇒ Τύποι υπολογισμού για Τάση –Βύθιση –Πίεση (σελ.76 – 82)

Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα :

- στατικό φορτίο τροχού **$Q=100000 \text{ N}$**
- απόσταση μεταξύ των στρωτήρων **$a=650 \text{ mm}$**
- ενεργός επιφάνεια του στρωτήρα κάτω από την μια σιδ/χια είναι
 $F=2\bar{u} b_s = 250000 \text{ mm}^2$

Όπου

b_s : πλάτος του στρωτήρα [mm]

$\bar{u}$: απόσταση άξονα σιδ/χιας μέχρι την άκρη (μέτωπο) του στρωτήρα

- μέτρο ελαστικότητας **$E=210000 \text{ N/mm}^2$**
- σιδηροτροχιά **$S 49$**
- διατομή σιδ/χιας **(J, W_u) $J = 1819 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$ και $W_u = 248 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$**
- πλάτος ιδανικού στρωτήρα **$b=F/a = 384,6$**

Με αυτά τα δεδομένα θα προκύψουν:

a) Τάση στο πέλμα σιδ/χιας :

$$\sigma = \frac{Q \cdot L}{4 \cdot W_u} \quad (\text{N/mm}^2)$$

Μεταβολή της καταπόνησης: $\sigma^* = K\sigma \cdot \sigma$

b) Βύθιση :

$$y = \frac{Q}{2 \cdot b \cdot C \cdot L} \quad (\text{mm})$$

Μεταβολή της καταπόνησης : $y^* = K_y \cdot y$

ς) Πίεση στρωτήρα – έρμα : $p = y \cdot C$ (N/mm²)

Μεταβολή της καταπόνησης : $p^* = K_p \cdot p$

**(Οι παράμετροι που φέρουν αστερίσκο αντιστοιχούν στις μεταβολές)*

Για την μεταβολή ενός από τα παραπάνω μεγέθη ισχύουν οι πίνακες 1,2,3,4

Μεταβολές	K_σ	K_y	K_p
C από 0,02 N/mm ³ σε 0,05 N/mm ³	$^4\sqrt{(0,02/0,05)}=0,79$	$^4\sqrt{(0,02/0,05)^3}=0,50$	$^4\sqrt{(0,05/0,02)}=1,25$
J,W από S 49 σε UIC 60	$^4\sqrt{\frac{3055}{1819} \cdot \frac{248}{377}} = 0,75$	$^4\sqrt{\frac{1819}{3055}} = 0,88$	
a από 650 mm σε 580 mm	$^4\sqrt{(580/650)} = 0,97$	$^4\sqrt{\left(\frac{580}{650}\right)^3} = 0,92$	
F από 500000 mm ² σε 600000 mm ²	$^4\sqrt{(5/6)} = 0,96$	$^4\sqrt{\left(\frac{5}{6}\right)^3} = 0,87$	
S 49 : $J = 1819 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$; $W_U = 248 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ UIC 60 : $J = 3055 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$; $W_U = 377 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$			

Πίνακας 1

Q=	100000	C					
a=	650		σ για α=650	σ για α=580	σ για α=650 και Kσ =0,97	σ για α =650 και Kσ =0,95	σ για αλλαγή σιδ/χιας
F=	250000	0,01	142,3	138,32	135,202	131,405	106,7385
E=	210000	0,02	119,7	116,31	113,6909	110,498	89,75599
I=	18190000	0,03	108,1	105,10	102,7313	99,84622	81,10369
W=	248000	0,04	100,6	97,81	95,60228	92,91737	75,47549
		0,05	95,2	92,50	90,41506	87,87583	71,38031
b=	384,6	0,06	90,9	88,38	86,38642	83,96033	68,1998
		0,07	87,5	85,04	83,12062	80,78624	65,62154
		0,08	84,6	82,25	80,39162	78,13389	63,46707
		0,09	82,2	79,86	78,05894	75,86672	61,62548
kσ =	0,97	0,1	80,0	77,78	76,0297	73,89447	60,02345
kσ =	0,95	0,11	78,1	75,95	74,23951	72,15456	58,61014
Kσ =	0,75	0,12	76,5	74,32	72,64203	70,60194	57,34897
		0,13	75,0	72,85	71,20286	69,20319	56,21278
		0,14	73,6	71,51	69,89583	67,93286	55,18092
		0,15	72,3	70,29	68,70059	66,77119	54,23731
		0,16	71,2	69,16	67,60102	65,70251	53,36923
		0,17	70,1	68,12	66,58418	64,71422	52,56646
		0,18	69,1	67,15	65,63948	63,79605	51,82064
		0,19	68,2	66,25	64,75821	62,93953	51,12491
		0,2	67,3	65,41	63,9331	62,13759	50,4735
		0,21	66,5	64,62	63,15801	61,38427	49,86159
		0,22	65,7	63,87	62,42774	60,67451	49,28506
		0,23	65,0	63,16	61,73782	60,00397	48,74039
		0,24	64,3	62,49	61,08442	59,36892	48,22454
		0,25	63,6	61,86	60,46419	58,76611	47,73489
		0,26	63,0	61,26	59,87423	58,19271	47,26913
		0,27	62,4	60,68	59,31197	57,64624	46,82524
		0,28	61,9	60,13	58,77515	57,1245	46,40144
		0,29	61,3	59,61	58,26178	56,62555	45,99614
		0,3	60,8	59,10	57,77008	56,14765	45,60796
		0,31	60,3	58,62	57,29845	55,68927	45,23562
		0,32	59,8	58,16	56,84546	55,249	44,87799
		0,33	59,4	57,71	56,40983	54,82561	44,53408
		0,34	58,9	57,28	55,9904	54,41795	44,20294
		0,35	58,5	56,87	55,58611	54,02502	43,88377
		0,36	58,1	56,47	55,196	53,64587	43,57579
		0,37	57,7	56,08	54,81922	53,27967	43,27833
		0,38	57,3	55,71	54,45495	52,92563	42,99075
		0,39	56,9	55,35	54,10247	52,58305	42,71248
		0,4	56,6	55,00	53,76112	52,25128	42,44299

Πίνακας 2 Τάση στο πέλμα σιδ/χιας συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C

Q=	100000	C	βύθιση γ για $\alpha=650$	γ με $K_y=0,92$ με αλλαγή του $\alpha=650$ σε $\alpha=580$	γ για αλλαγή στρωτήρα ($K_y=0,82$)
a=	650				
F=	250000	0,01	0,000920814	0,000847	0,000801
E=	210000	0,02	0,002190078	0,002015	0,001905
I=	18190000	0,03	0,003635579	0,003345	0,003163
W=	248000	0,04	0,005208912	0,004792	0,004532
		0,05	0,006884692	0,006334	0,00599
b=	384,6	0,06	0,008646913	0,007955	0,007523
		0,07	0,010484424	0,009646	0,009121
Ky =	0,92	0,08	0,01238895	0,011398	0,010778
Ky =	0,87	0,09	0,014354073	0,013206	0,012488
		0,1	0,01637465	0,015065	0,014246
		0,11	0,018446453	0,016971	0,016048
		0,12	0,020565941	0,018921	0,017892
		0,13	0,022730093	0,020912	0,019775
		0,14	0,024936303	0,022941	0,021695
		0,15	0,027182293	0,025008	0,023649
		0,16	0,029466055	0,027109	0,025635
		0,17	0,031785802	0,029243	0,027654
		0,18	0,034139932	0,031409	0,029702
		0,19	0,036527001	0,033605	0,031778
		0,2	0,0389457	0,03583	0,033883
		0,21	0,041394833	0,038083	0,036014
		0,22	0,043873307	0,040363	0,03817
		0,23	0,046380114	0,04267	0,040351
		0,24	0,048914326	0,045001	0,042555
		0,25	0,05147508	0,047357	0,044783
		0,26	0,054061576	0,049737	0,047034
		0,27	0,056673068	0,052139	0,049306
		0,28	0,059308858	0,054564	0,051599
		0,29	0,061968291	0,057011	0,053912
		0,3	0,064650753	0,059479	0,056246
		0,31	0,067355666	0,061967	0,058599
		0,32	0,070082485	0,064476	0,060972
		0,33	0,072830693	0,067004	0,063363
		0,34	0,075599803	0,069552	0,065772
		0,35	0,078389352	0,072118	0,068199
		0,36	0,0811989	0,074703	0,070643
		0,37	0,084028029	0,077306	0,073104
		0,38	0,08687634	0,079926	0,075582
		0,39	0,089743453	0,082564	0,078077
		0,4	0,092629007	0,085219	0,080587

Πίνακας 3 Βύθιση γ του στρωτήρα στο έρμα συναρτήσει του δείκτη αντίδρασης εδάφους C

Q=	100000	C	p:πίεση	p για αλλαγή του a	p για αλλαγή του στρωτήρα		p για αλλαγή σιδ/χιας
a=	650		9,21E-06	8,47E-06	8,01E-06	0,000921	8,1E-06
F=	250000	0,01	4,38E-05	4,03E-05	3,81E-05	0,00219	3,85E-05
E=	210000	0,02	0,000109	0,0001	9,49E-05	0,003636	9,6E-05
I=	18190000	0,03	0,000208	0,000192	0,000181	0,005209	0,000183
W=	248000	0,04	0,000344	0,000317	0,000299	0,006885	0,000303
		0,05	0,000519	0,000477	0,000451	0,008647	0,000457
b=	384,6	0,06	0,000734	0,000675	0,000639	0,010484	0,000646
		0,07	0,000991	0,000912	0,000862	0,012389	0,000872
Kp =	0,92	0,08	0,001292	0,001189	0,001124	0,014354	0,001137
Kp =	0,87	0,09	0,001637	0,001506	0,001425	0,016375	0,001441
Kp =	0,88	0,1	0,002029	0,001867	0,001765	0,018446	0,001786
		0,11	0,002468	0,00227	0,002147	0,020566	0,002172
		0,12	0,002955	0,002719	0,002571	0,02273	0,0026
		0,13	0,003491	0,003212	0,003037	0,024936	0,003072
		0,14	0,004077	0,003751	0,003547	0,027182	0,003588
		0,15	0,004715	0,004337	0,004102	0,029466	0,004149
		0,16	0,005404	0,004971	0,004701	0,031786	0,004755
		0,17	0,006145	0,005654	0,005346	0,03414	0,005408
		0,18	0,00694	0,006385	0,006038	0,036527	0,006107
		0,19	0,007789	0,007166	0,006777	0,038946	0,006854
		0,2	0,008693	0,007997	0,007563	0,041395	0,00765
		0,21	0,009652	0,00888	0,008397	0,043873	0,008494
		0,22	0,010667	0,009814	0,009281	0,04638	0,009387
		0,23	0,011739	0,0108	0,010213	0,048914	0,010331
		0,24	0,012869	0,011839	0,011196	0,051475	0,011325
		0,25	0,014056	0,012932	0,012229	0,054062	0,012369
		0,26	0,015302	0,014078	0,013313	0,056673	0,013466
		0,27	0,016606	0,015278	0,014448	0,059309	0,014614
		0,28	0,017971	0,016533	0,015635	0,061968	0,015814
		0,29	0,019395	0,017844	0,016874	0,064651	0,017068
		0,3	0,02088	0,01921	0,018166	0,067356	0,018375
		0,31	0,022426	0,020632	0,019511	0,070082	0,019735
		0,32	0,024034	0,022111	0,02091	0,072831	0,02115
		0,33	0,025704	0,023648	0,022362	0,0756	0,022619
		0,34	0,027436	0,025241	0,02387	0,078389	0,024144
		0,35	0,029232	0,026893	0,025431	0,081199	0,025724
		0,36	0,03109	0,028603	0,027049	0,084028	0,02736
		0,37	0,033013	0,030372	0,028721	0,086876	0,029051
		0,38	0,035	0,0322	0,03045	0,089743	0,0308
		0,39	0,037052	0,034087	0,032235	0,092629	0,032605
		0,4					

Πίνακας 4 Πίεση p στην επιφάνεια κάτω από τον στρωτήρα σε σχέση με τον δείκτη αντίδρασης εδάφους C

Υπερύψωση για μικτή κυκλοφορία συρμών διάφορων ταχυτήτων
($V_{max}=300\text{km/h}$, $V_{min}=100\text{km/h}$) (σελ 126)

R	Dθ(V=300)	Dθ (V=300) - maxI	Dθ (V=100)	Dθ (V=100)+maxE
500				
1000			118	188
1500			78,66	148,66
2000			59	129
2500			47,2	117,2
3000		254,55	39,33	109,33
3500		203,95	33,71	103,71
4000	265,5	166,05	29,5	99,5
4500	236	136,55	26,22	96,22
5000	212,4	112,95	23,6	93,6
5500	193	93,55	21,45	91,45
6000	177	77,55	19,66	89,66
6500	163,38	63,93	18,1	88,1
7000	151,71	52,26	16,8	86,8
7500	141,6	42,15	15,73	85,73
8000	132,75	33,3	14,75	84,75
8500	124,9	25,45	13,88	83,88
9000	118	18,55	13,11	83,11
9500	111,7	12,25	12,42	82,42
10000	106,5	7,05	11,8	81,8

Καθορισμός της κανονικής υπερύψωσης D_K (σελ 128)

k=1000/R	Dθ(V=300)	Dθ(V=100)	Dθ(V=300)-maxI	Dθ(V=100)+maxE	
0	0	0		70	131,45
0,01	10,62	1,18		71,18	131,45
0,02	21,24	2,36		72,36	131,45
0,03	31,86	3,54		73,54	131,45
0,04	42,48	4,72		74,72	131,45
0,05	53,1	5,9		75,9	131,45
0,06	63,72	7,08		77,08	131,45
0,07	74,34	8,26		78,26	131,45
0,08	84,96	9,44		79,44	131,45
0,09	95,58	10,62		80,62	131,45
0,1	106,2	11,8		81,8	131,45
0,11	116,82	12,98		82,98	131,45
0,12	127,44	14,16		84,16	131,45
0,13	138,06	15,34		85,34	131,45
0,14	148,68	16,52		86,52	131,45
0,15	159,3	17,7	6,3	87,7	131,45
0,16	169,92	18,88	16,92	88,88	131,45
0,17	180,54	20,06	27,54	90,06	131,45
0,18	191,16	21,24	38,16	91,24	131,45
0,19	201,78	22,42	48,78	92,42	131,45
0,2	212,4	23,6	59,4	93,6	131,45
0,21	223,02	24,78	70,02	94,78	131,45
0,22	233,64	25,96	80,64	95,96	131,45
0,23	244,26	27,14	91,26	97,14	131,45
0,24	254,88	28,32	101,88	98,32	131,45
0,25	265,5	29,5	112,5	99,5	131,45
0,26	276,12	30,68	123,12	100,68	131,45
0,27	286,74	31,86	133,74	101,86	131,45
0,28	297,36	33,04	144,36	103,04	

⇒ Τύποι υπολογισμού της υπερύψωσης D_θ (σελ. 128-129)

Για $V=300$ Km/h ισχύει:

$$D_\theta (V=300) = 11,8 \frac{V^2}{R} = \frac{1062000}{R}$$

Για διαφορετικές τιμές της ακτίνας R έχουμε :

$$R = 500 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 2124 \text{ mm}$$

$$R = 1000 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 1062 \text{ mm}$$

$$R = 1500 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 708 \text{ mm}$$

$$R = 2000 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 531 \text{ mm}$$

$$R = 2500 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 424,8 \text{ mm}$$

$$R = 3000 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 354 \text{ mm}$$

$$R = 3500 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 303,4 \text{ mm}$$

$$R = 4000 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 265,5 \text{ mm}$$

$$R = 4500 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 236 \text{ mm}$$

$$R = 5000 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 212,4 \text{ mm}$$

$$R = 5500 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 193 \text{ mm}$$

$$R = 6000 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 177 \text{ mm}$$

$$R = 6500 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 163,38 \text{ mm}$$

$$R = 7000 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 151,71 \text{ mm}$$

$$R = 7500 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 141,6 \text{ mm}$$

$$R = 8000 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 132,75 \text{ mm}$$

$$R = 8500 \text{ m} \rightarrow D_\theta = 124,9 \text{ mm}$$

Για την περίπτωση συρμού με ταχύτητα $V = 100 \text{ Km/h}$ αχούμε:

$$D_{\theta} = 11,8 \frac{V^2}{R} = \frac{118000}{R}$$

Οπότε για διαφορετικές τιμές της ακτίνας R θα ισχύει:

$$R = 500 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 236 \text{ mm}$$

$$R = 1000 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 118 \text{ mm}$$

$$R = 1500 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 78,66 \text{ mm}$$

$$R = 2000 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 59 \text{ mm}$$

$$R = 2500 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 47,2 \text{ mm}$$

$$R = 3000 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 39,33 \text{ mm}$$

$$R = 3500 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 33,71 \text{ mm}$$

$$R = 4000 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 29,5 \text{ mm}$$

$$R = 4500 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 26,22 \text{ mm}$$

$$R = 5000 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 23,6 \text{ mm}$$

$$R = 5500 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 21,45 \text{ mm}$$

$$R = 6000 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 19,66 \text{ mm}$$

$$R = 6500 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 18,1 \text{ mm}$$

$$R = 7000 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 16,8 \text{ mm}$$

$$R = 7500 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 15,73 \text{ mm}$$

$$R = 8000 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 14,75 \text{ mm}$$

$$R = 8500 \text{ m} \rightarrow D_{\theta} = 13,88 \text{ mm}$$

Για την περίπτωση της ανεπάρκειας υπερύψωσης στην ταχύτητα των $V = 300 \text{ Km/h}$ θα ισχύει :

$$D = D_{\theta} (V=300) - \max I$$

Όπου **maxl** είναι η μέγιστη τιμή της μέγιστης ανεπάρκειας που για υψηλές ταχύτητες είναι :

$$\text{maxl} = a_q \cdot 153 = 0,65 \cdot 153 = 99,45 \text{ mm}$$

όπου a_q : η μη αντισταθμισμένη φυγόκεντρο επιτάχυνση που φθάνει την τιμή **0,65 m / sec²** για συρμούς υψηλών ταχυτήτων.

Άρα για την υπερύψωση έχουμε :

$$\mathbf{D = D_{\theta} (V=300) - 99,45}$$

όποτε για διαφορετικές τιμές της ακτίνας R είναι :

R	D_θ (V=300) - maxl
500	
1000	
1500	
2000	
2500	
3000	254,55
3500	203,95
4000	166,05
4500	136,55
5000	112,95
5500	93,55
6000	77,55
6500	63,93
7000	52,26
7500	42,15
8000	33,3
8500	25,45
9000	18,55
9500	12,25
10000	7,05

Στην περίπτωση του πλεονάσματος της υπερύψωσης που εμφανίζεται για ταχύτητα **V =100 Km/h** είναι :

$$\mathbf{D = D_{\theta} (V=100) + max}$$

Όπου **max E** είναι το μέγιστο πλεόνασμα υπερύψωσης και ισούται:

maxE = 70 mm για βραδείς συρμούς εν κινήσει

Άρα η υπερύψωση θα είναι:

$$D = D_0(V=100) + 70$$

Οπότε για διαφορετικές τιμές του R είναι :

R	$D_0(V=100)+\max E$
500	306
1000	188
1500	148,66
2000	129
2500	117,2
3000	109,33
3500	103,71
4000	99,5
4500	96,22
5000	93,6
5500	91,45
6000	89,66
6500	88,1
7000	86,8
7500	85,73
8000	84,75
8500	83,88
9000	83,11
9500	82,42
10000	81,8

Άρα από το διάγραμμα που προκύπτει θα έχουμε την μέγιστη υπερύψωση για την ελάχιστη ακτίνα καμπύλης R .

Μέγιστη υπερύψωση $D_{\max} = 91,98 \text{ mm}$ και ελάχιστη ακτίνα $R_{\min} = 5.550 \text{ m}$ για $a_g = 0,65 \text{ m/sec}^2$

$$R_{\min} = \frac{11,8 \cdot V^2}{D_{\max} + I} = \frac{1062000}{91,98 + 99,45} \approx 5550 \text{ m}$$

Στην περίπτωση γραμμικοποίησης του διαγράμματος 22 όπου ο άξονα x εκφράζεται με την καμπυλότητα $k = 1000/R$ θα ισχύει:

Για διάφορες τιμές του R η καμπυλότητα γίνεται :

$k=1000/R$	$D\theta(V=300)$	$D\theta(V=100)$	$D\theta(V=300)-\max I$	$D\theta(V=100)+\max E$
0	0	0		70
0,01	10,62	1,18		71,18
0,02	21,24	2,36		72,36
0,03	31,86	3,54		73,54
0,04	42,48	4,72		74,72
0,05	53,1	5,9		75,9
0,06	63,72	7,08		77,08
0,07	74,34	8,26		78,26
0,08	84,96	9,44		79,44
0,09	95,58	10,62		80,62
0,1	106,2	11,8	6,75	81,8
0,11	116,82	12,98	17,37	82,98
0,12	127,44	14,16	27,99	84,16
0,13	138,06	15,34	38,61	85,34
0,14	148,68	16,52	49,23	86,52
0,15	159,3	17,7	59,85	87,7
0,16	169,92	18,88	70,47	88,88
0,17	180,54	20,06	81,09	90,06
0,18	191,16	21,24	91,71	91,24
0,19	201,78	22,42	102,33	92,42
0,2	212,4	23,6	112,95	93,6
0,21	223,02	24,78	123,57	94,78
0,22	233,64	25,96	134,19	95,96
0,23	244,26	27,14	144,81	97,14
0,24	254,88	28,32	155,43	98,32
0,25	265,5	29,5	166,05	99,5
0,26	276,12	30,68	176,67	100,68
0,27	286,74	31,86	187,29	101,86
0,28	297,36	33,04	197,91	103,04

Οπότε προκύπτει το διάγραμμα 23 που μας δίνει τις τιμές της κανονικής υπερύψωσης .

- [1] Προφυλλίδης Β. *“Σιδηροδρομική”* Τόμος Ι Αθήνα 1993
- [2] Walrave M. *“Le train a grande vitesse”*, Pour la science, Octobre 1981
- [3] Μουρατίδης Α. *“Σιδηρόδρομος υψηλής ταχύτητας, σύγχρονη κατάσταση και προοπτικές”* ΣΠΜΕ αρ.212 1993
- [4] Προφυλλίδης Β. *“Ο σιδηρόδρομος και οι μεγάλες ταχύτητες”* Τεχν. Χρον. – Α 1985
- [5] Ησαΐα - Κεραμίδα Χ. *“Μεγάλοι χερσαίοι συγκοινωνιακοί άξονες στην Ελλάδα”*
- [6] Γιαννακός Κ. *“Δράσεις στη σιδηροδρομική γραμμή”*
Αθήνα 04/ 2002
- [7] Ταλαμπέκος Γ. Ε. *“Σιδηροδρομικές γραμμές υψηλών ταχυτήτων”* Αθήνα 1999
- [8] Ταλαμπέκος Γ. Ε. *“Εγχειρίδιο κατασκευής Σταθερής Επιδομής”* Αθήνα 2000
- [9] Ταλαμπέκος Γ. Ε. *“Επιλεγμένα Σιδ/κα θέματα γραμμής”*
Αθήνα 12/2001
- [10] Eisenmann J. *ETR 39/1990*
- [11] Eisenman J. und Rumb R. *ETR 46/1997*
- [12] Eisenman J. und Rumb R *ETR 3/97*
- [13] Prud`homme A. *“Sollcitations Statiques et Dynamiques de la Voie”*
- [14] ORE :Question D 71, RP9, σελ. FIG 97

[15] **Γιαννακός Κ., Βλασοπούλου Ι., Ιορδανίδης Π.** *Έκθεση Επιτροπής Εμπειρογνομόνων του ΟΣΕ για την επίσκεψή τους στους SNCF «παράρτημα II»* 7/4/1989

[16] **Eisenmann J.** *“Schotteroberbau-Möglichkeiten und Perspektiven für die moderne Bahn”* 1988

[17] **Cooperation OSE/SNCF:** *“Comportement des traverses en relation avec les charges dynamiques”*

[18] **Τσουκαντάς Σ.Γ.** *“Ανάλυση, μελέτη και κριτική θεώρηση του τρόπου σχεδιασμού και κατασκευαστικών λεπτομερειών συστήματος Σ.Ε. τύπου RHEDA όπως πραγματοποιείται σήμερα στην Γερμανία.” (φάση τέταρτη) Αθήνα, Ιανουάριος 2000*

[19] **Γιαννακός Κ., Ιορδανίδης Π., Βλασοπούλου Ι.,** *“Έκθεση Επιτροπής Εμπειρογνομόνων του ΟΣΕ για την επίσκεψη τους στους SNCF «παράρτημα I και III»”* 7/4/1989

[20] **ORE:** *Question D 170, RP 2 Utrecht* 1974

[21] **Γιαννακός Κ. - Βλασοπούλου Ι.** *“Μελέτη για την καταπόνηση του έρματος και τη συμπεριφορά της επιδομής σε σχέση με το είδος των χρησιμοποιούμενων στρωτήρων”* 4/1989

[22] **Eisenmann J.** *“Verformungsverhalten der Schiene. Ayswirkungen auf die Oberbaubeanspruchung, Lagestabilität und Starung funktion”* ZEN – Glasers Annalen 2/1980.

[23] **Federation Internationale de la Precontrainte (F.I.P.),** *Concrete railway sleepers, London* 1987.

[24] **Müller – Boruttau F.H., Ebersbach D., Breitssamter N.,** *“Dynamische Fahrbahnmodelle für HGV – Strecken und Folgerungen für Komponenten”*, Eisenbahntechnische Rundschau, (47) Heft 11/November 1998.

[25] **Prof. Ing. Miguel R. Bugarin – Prof. Ing. Jose-Manuel Garcia Diaz-de-Villegas** *“Verso il progetto ottimizzato dei deviatori ferroviari (4/2002)”*

- [26] **AAHSO ROAD TEST:** *“Special Report 61 E, Highway Research Board, Publication Nr.954. National Academy of Sciences – National Research Council, Washington, D.C. 1963”*
- [27] **Scramm G.** *“Permanent Way Technique and Permanent Way Economy, Otto Elsner Verlagsgesellschaft, Darmstadt 1961.”*
- [28] **Tetzlaff Verlag** *“Handbuch Glais”*
- [29] **ΕΛΟΤ ENV 13803.1** 27-12-2002
- [30] **L. Mayer** (1986) *“Impianti ferroviari – Tecnica ed esercizio – CIFI – Roma*
- [31] **ORE C 138/Rp 9 and DT 150**
- [32] **ORE Report B 55 / Rp 8**
- [33] **N.K.E.Γ.** *“(Νέος Κανονισμός Επιδομής Γραμμής) 19/09/2000”*
- [34] **Tesoriere G.** *“Strade Ferrovie ed Aeroporti ,L` andamento plano-altimetrico delle linee Ferroviarie -UTET- Torino 1990”*
- [35] **Bordin M. , Stefanutti M.** (1999) *“ Ricerca dell` equazione intrinseca di una curva di transizione ferroviaria per la regolarità del moto dei rotabili ” - Atti del IX Convegno Nazionale S.I.I.V. “Pianificazione e gestione di infrastrutture ferroviarie e aeroportuali” - Cagliari, 28 ottobre 1999 -*
- [36] **Antonucci E.** (1993) *“ Infrastrutture ferroviarie ” -Ed Pitagora – Bologna. (1993)*
- [37] **Giannini F. , F. La Camera, Marchionna A.** *“ Appunti di Costruzione di Strade Ferrovie ed Aeroporti ” per il corso di laurea in Ingegneria Civile Trasporti Ottobre 1985*
- [38] **Λυμπέρης Κ.** *“ Εφαρμοσμένη σιδηροδρομική - Υποδομή Σιδηροδρομικής γραμμής ” 2004*
- [39] **Τζανακάκης Κ.** *“ 2^ο Συνέδριο Ανάπτυξης Σιδηρικών Μεταφορών – Σιδηροδρομικοί υψηλών ταχυτήτων στην Ευρώπη και τον κόσμο ” 2005*

- [40] Ταλαμπέκος Γ. Ε. “ Σταθερή Επιδομή Χθες - Σήμερα- Αύριο”
Αθήνα 8/2005
- [41] Λυμπέρης Κ. “ Εφαρμοσμένη Σιδηροδρομική – Χάραξη
σιδηροδρομικής Γραμμής ” Αθήνα 2004
- [42] RHEDA 2000 “ *The Monolithic Ballastless Track System*”
- [43] Zusammenstellung DB (Deutsche Bundesbahn)
- [44] Λυμπέρης Κ. “ Υπολογισμός επιδομής κατά ZIMERMANN /
EISENMANN ” Αθήνα 2004
- [45] A. Bourguet. – R. Joly (1996) “*Circolazione di un veicolo
ferroviario su curva di raggio costante R_c e di raggio variabile –
Calcolo degli sforzi e delle accelerazioni trasversali*” *Ingegneria
Ferroviaria* n. 7/ 96