

Παρουσίαση της πρώτης εφαρμογής στην Ελλάδα κατασκευής σιδηροδρομικής γραμμής του ΟΣΕ με τη μέθοδο της «Σταθερής Επιδομής^(x)» από σκυρόδεμα στην σήραγγα των Τεμπών.

Γ. Δ. Ντινόπουλος,
Διπλ. Πολ. Μηχ., Τεχν. Δ/ντής εταιρείας ΘΕΜΕΛΗ Α.Ε.

Σ. Γ. Τσουκαντάς,
Δρ. Πολ. Μηχ. Επ. Καθ. ΕΜΠ

Σ. Κ. Κόλιας,
Δρ. Πολ. Μηχ. Αν. Καθ. ΕΜΠ

Τ. Δ. Τοπιντζής,
Διπλ. Πολ. Μηχ.

Κ. Δ. Καλλιανός,
Διπλ. Πολ. Μηχ. Προϊστάμενος Δ/νουσας Υπηρεσίας Έργων Επιδομής της ΕΡΓΑ-ΟΣΕ Α.Ε.

Λέξεις Κλειδιά : Σταθερή Επιδομή, σήραγγα, ανοιχτή γραμμή, γέφυρες, πολυστρωματικό σύστημα, σιδηροτροχιά, στρωτήρας, φέρουσα πλάκα, κυλιόμενος μεταλλότυπος, στρώση γραμμής, ρύθμιση γραμμής.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η κατασκευαστική διαδικασία της υλοποίησης της γραμμής του ΟΣΕ Αθηνών - Θεσσαλονίκης, από την Χ.Θ. 374+625 έως Χ.Θ. 381+547, με χρήση για πρώτη φορά στην Ελλάδα της τεχνολογίας της Σταθερής Επιδομής με βάση το σκυρόδεμα και εφαρμογή του συστήματος Σ.Ε., Rheda. Η τεχνολογία της Σταθερής Επιδομής, μεταξύ των προαναφερθεισών χιλιομετρικών θέσεων, εφαρμόζεται κυρίως σε σήραγγα αλλά και σε ανοιχτή γραμμή καθώς και σε υπάρχουσες γέφυρες. Παρουσιάζονται οι αντίστοιχες διαφοροποιήσεις και επισημαίνονται ειδικά θέματα τεχνολογικής και κατασκευαστικής φύσεως, παράλληλα με απαιτήσεις ειδικού μηχανολογικού εξοπλισμού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κατόπιν διαγωνισμού που διενεργήθηκε από την ΕΡΓΑ ΟΣΕ Α.Ε. για την ανάδειξη αναδόχου κατασκευής του έργου “Κατασκευή επιδομής της νέας διπλής σιδηροδρομικής γραμμής με εφαρμογή της μεθόδου «Σταθερής επιδομής» (Slab Track) μεταξύ της Χ.Θ 374+625 έως Χ.Θ 381+547 της γραμμής Αθηνών - Θεσσαλονίκης”, μειοδότηρα αναδείχθηκε η Κ/ξία με την επωνυμία «STRABAG Strassen und Tiefbau A.G. – ΘΕΜΕΛΗ Α.Ε.»

Το έργο αποτελεί τμήμα της νέας σιδηροδρομικής γραμμής Αθηνών – Θεσσαλονίκης. Αφορά την κατασκευή της επιδομής με τη μέθοδο της σταθερής επιδομής, την σκυρόστρωση μερικών

^(x) Με τον όρο «Σταθερή Επιδομή» αποδίδεται στα Ελληνικά ο όρος “*slab track*” (στα Αγγλικά), ή “*Feste Fahrbahn*” (στα Γερμανικά), “*voies sur dalles*” (στα Γαλλικά), που αφορά την σύγχρονη τεχνολογία κατασκευής Σιδηροδρομικών γραμμών.

μεταβατικών τμημάτων καθώς και τις εργασίες ανακαίνισης της υπάρχουσας γραμμής στο Σ.Σ Ραψάνης και την σύνδεσή της με την σταθερή επιδομή.

Το μεγαλύτερο τμήμα της σταθερής επιδομής (10.786μ. μονής Σ.Γ.) είναι σε σήραγγες ενώ 2.661μ. μονής Σ.Γ. σε επίχωμα (εκ των οποίων 313μ. μονής Σ.Γ. είναι σε γέφυρες) και 84μ. μονής Σ.Γ. σε σκυρογραμμή (τομείς μετάβασης).

Με την επιλογή σταθερής επιδομής :

- επιτυγχάνονται ταχύτητες μεγαλύτερες και από 200km/h
- η συντήρηση της γραμμής (επίπονη-κοστοβόρα διαδικασία υπό τα μέχρι σήμερα δεδομένα) θα έχει ελάχιστο έως μηδενικό κόστος.

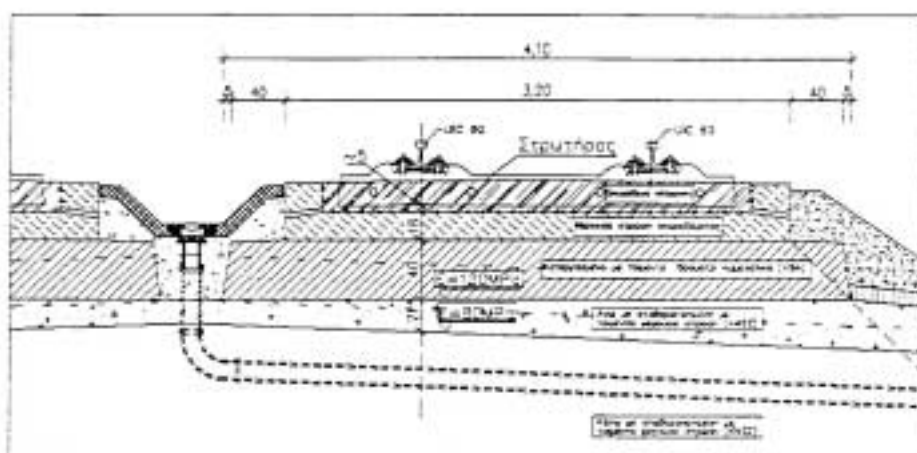
2. ΜΕΛΕΤΗΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

2.1. Σε ανοιχτή γραμμή

α) Μορφολογία σταθερής επιδομής

Ο τύπος Σταθερής Επιδομής που επελέγει από την υπηρεσία ήταν τύπου Rehda-Sengeberg. Σύμφωνα με το σύστημα αυτό οι σιδηροτροχιές εδράζονται επί στρωτήρων (και συγκρατούνται επί αυτών με κατάλληλους συνδέσμους, εδώ τύπου Vossloh), οι οποίοι στρωτήρες με την σειρά τους εγκιβωτίζονται μέσω επιτόπου σκυροδέματος (σκυρόδεμα πληρώσεως) σε φέρουσα οπλισμένη πλάκα σκυροδέματος (σκαφοειδούς διατομής για την διευκόλυνση της εγκιβωτίσεως). Η φέρουσα αυτή πλάκα πάχους 18cm εδώ (B35 κατά DIN), μέτρου ελαστικότητας, $E=34\text{GPa}$, εδράζεται επί σώματος κατεργασμένου με τσιμέντο αμμοχάλικου, (Κ.Θ.Α.), πάχους 40cm εδώ, και μέτρου ελαστικότητας $E \cong 9000\text{MPa}$, το οποίο με τη σειρά του εδράζεται επί μη σταθεροποιημένης με τσιμέντο στρώσεως (αντίστοιχης με το 3Α της οδοποιίας), μέσου πάχους 21cm, και με $E=120\text{MPa}$. Η τελευταία αυτή στρώση εδράζεται επί της άνω καλά συμπυκνωμένης στρώσης διαμόρφωσης του υπεδάφους.

Στο απλοποιημένο Σχήμα 1, φαίνεται η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά του ως άνω περιγραφέντος πολυστρωματικού συστήματος, χωρίς να φαίνονται κατασκευαστικές διαμορφώσεις και άλλες λεπτομέρειες.



Σχήμα 1

β) Παραδοχές φορτίσεων

Τα φορτία των σιδηροδρομικών συρμών που ελήφθησαν υπόψη για τον υπολογισμό της Σ.Ε. περιγράφονται από την φόρτιση πρότυπο UIC 71 και είναι όπως ορίζονται στην σύμβαση και απεικονίζονται στο Σχ. 2.



Σχήμα 2

Κατά το πρότυπο αυτό λαμβάνονται 4 αξονικά στατικά συγκεντρωμένα φορτία των 125 kN το καθένα σε αποστάσεις 1,60 m μεταξύ τους.

Τα φορτία αυτά προσαυξάνονται με κατάλληλους συντελεστές ώστε να ληφθούν υπόψη και οι πρόσθετες επιπλοήσεις : λόγω κλίσης της σιδηροδρομικής γραμμής εξαιτίας της υπερύψωσής της στις καμπύλες, λόγω δυναμικών καταπονήσεων από την κίνηση των συρμών, λόγω προσαυξήσεων σύμφωνα με τις απαιτήσεις του ΟΣΕ κ.α.

Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής συντελεστές προσαυξήσεων :

i) Επαυξήσεις στατικών φορτίων

- Λόγω κίνησης των συρμών στις καμπύλες : 20%
- Λόγω απαιτήσεων ΟΣΕ : 25%

ii) Επαυξήσεις λόγω δυναμικών φαινομένων f

- Για την εκτίμηση του συντελεστή προσαύξησης των στατικών φορτίων ώστε να συνεκτιμηθεί και ο δυναμικός χαρακτήρας των φορτίων, κατά την κίνηση των συρμών χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία J.Eisenmann.

Κατά την μεθοδολογία αυτή, ο συντελεστής προσαύξησης δίνεται από τον τύπο :

$$f = 1 + 3 * n * \varphi,$$

όπου :

Συντελεστής n : συντελεστής αυτός περιγράφει την ποιότητα της σιδηροδρομικής γραμμής, ο οποίος για τους υπολογισμούς ελήφθη με τιμή 0,1 (τιμή που αντιστοιχεί σε πολύ καλή κατάσταση γραμμής)

Συντελεστής φ : Ο συντελεστής φ λαμβάνεται από τον τύπο :

$$\varphi_1 = 1 + \frac{V - 60}{380}, \quad \text{για επιβατικά} \quad \text{και} \quad \varphi_2 = 1 + \frac{V - 60}{160}, \quad \text{για εμπορευματικά}$$

όπου : V = η μέγιστη ταχύτητα μελέτης της σιδηροδρομικής γραμμής

$$V_{\max} = 200 \text{ Km/h για επιβατικά και}$$

$$V_{\max} = 110 \text{ Km/h για εμπορευματικά}$$

με αντικατάσταση προκύπτει : $\varphi_1 = 1,368$ και $\varphi_2 = 1,313 \Rightarrow \varphi = 1,368$
και άρα ο συντελεστής προσαύξησης γίνεται : $f = 1 + 3 * 0,1 * 1,368 \Rightarrow f = 1.411$

γ) Παραδοχές πάχους στρώσεων

- Φέρουσα στρώση από πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος Φ.Π., ποιότητας B35 (σύμφωνα με το DIN 1045)

- Πάχος (Φ.Π.)	$h(\Phi\Pi) = 180 \text{ mm}$
- Ημιπλάτος (Φ.Π.)	$b(\Phi\Pi) = 1600 \text{ mm}$
- Μέτρο Ελαστικότητας (Φ.Π.)	$E(\Phi\Pi) = 34 \text{ GPa}$

- Στρώση από θραυστό αμμοχάλικο κατεργασμένη με τσιμέντο (Κ.Θ.Α.)

- Πάχος (Κ.Θ.Α.)	$h_{(ΚΘΑ)} = 400 \text{ mm}$
- Ημιπλάτος (Κ.Θ.Α.)	$b_{(ΚΘΑ)} = 2050 \text{ mm}$
- Μέτρο Ελαστικότητας (Κ.Θ.Α.)	$E_{(ΚΘΑ)} = \text{από } 5\text{GPa, GPa και } 9,0 \text{ GPa}$
- Άνω μη σταθεροποιημένη με τσιμέντο φέρουσα στρώση	$E_{(ΑΜΣΣ)} = 0,12 \text{ GPa}$

δ) Παραδοχές υλικών

i) Επιτρεπόμενες τάσεις σκυροδεμάτων

- Φέρουσα πλάκα (B35)

- Καμπτική εφελκυστική αντοχή	5 MPa
- Καμπτική εφελκυστική αντοχή μετά από $5 \cdot 10^6$ κύκλους φορτίσεως – αποφορτίσεως	0,85 MPa

- Στρώση από Κ.Θ.Α.

- Καμπτική εφελκυστική αντοχή	1,6 MPa
- Καμπτική εφελκυστική αντοχή μετά από $5 \cdot 10^6$ κύκλους φορτίσεως – αποφορτίσεως	0,80 MPa

ii) Σιδηροτροχιά UIC 60

- Ροπή αδρανείας	$I_x = 30\,550\,000 \text{ mm}^4$
- Ροπή αντίστασης	$W_x = 335\,500 \text{ mm}^3$
- Μέτρο Ελαστικότητας	$E = 210 \text{ GPa}$

iii) Τύποι στρωτήρων

- B301- GR W-60, B302- GR W-60, B303 – GR W-60ü
- μήκος στρωτήρα $l = 2600 \text{ mm}$
- απόσταση μεταξύ στρωτήρων 66 cm (στους υπολογισμούς)

ε) Υπολογισμός των δυνάμεων που δρουν στην φέρουσα στρώση του σκυροδέματος (Φ.Π.)

- Για τον υπολογισμό των δυνάμεων που δρουν επί των στρωτήρων και μέσω αυτών στην φέρουσα στρώση του σκυροδέματος (Φ.Π.) χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Zimmerman. Στην μέθοδο αυτή η σιδηροδρομική τροχιά προσομοιάζεται με δοκό απείρου μήκους η οποία είναι ελεύθερα εδραζόμενη επί συνεχούς ελαστικού μέσου (θεωρία Winkler), θεωρώντας ελατήρια στις θέσεις των στρωτήρων

- Τυπολόγιο της μεθόδου Zimmerman

$$\text{Βύθιση της σιδηροτροχιάς : } y_i = \frac{(\sum Q_i * n_i)}{2 * b * L}$$

$$\text{Δύναμη στην θέση του στρωτήρα : } S = (b * C) * a * y_i$$

$$\text{όπου : } n = \frac{\sin \xi + \cos \xi}{e^\xi}$$

$$\xi = \frac{\chi}{L}, \quad L = \sqrt[4]{\frac{4 * E * I}{b * C}}, \quad b * C = c * a$$

- Υποχωρήσεις μεταξύ διαδοχικών στρωτήρων και αντιδράσεις.

Στα σχήματα 3 και 4 παρουσιάζονται διαγραμματικά οι υποχωρήσεις μεταξύ διαδοχικών στρωτήρων και οι αντιδράσεις σε kN, αντίστοιχα.

στ) Αναπτυσσόμενες τάσεις στο πολυστρωματικό σύστημα.

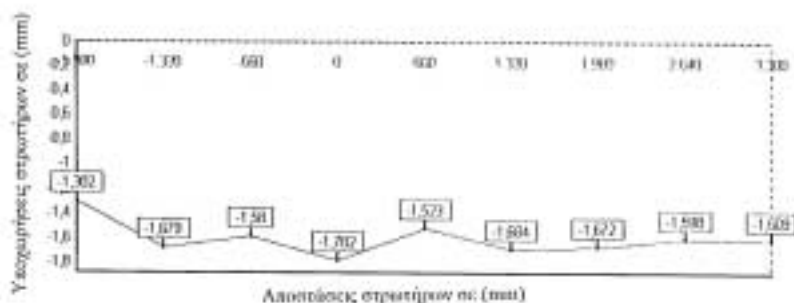
Ο υπολογισμός των τάσεων στις διεπιφάνειες του πολυστρωματικού συστήματος (φέρουσα στρώση 18 cm – στρώση από Κ.Θ.Α., 40 cm – στρώση με υλικό τύπου 3Α) έγινε σύμφωνα με την μεθοδολογία υπολογισμού Eisenmann υπό την παραδοχή αναπτύξεως πλήρους συνάφειας στην διεπιφάνεια φέρουσας στρώσης από σκυρόδεμα και στρώσης Κ.Θ.Α.

Στο σχήμα 5, φαίνεται σχηματικά η εξέλιξη των τάσεων από την πάνω επιφάνεια της φέρουσας πλάκας από σκυρόδεμα (0,0) μέχρι και την κάτω επιφάνεια της στρώσης Κ.Θ.Α. (558 mm).

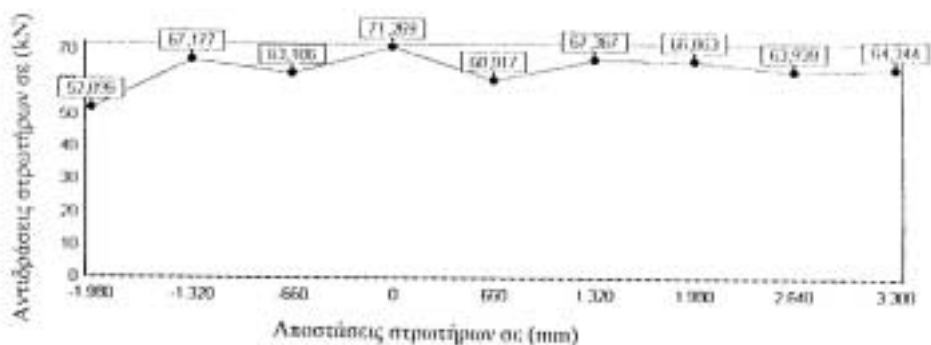
ζ) Περιορισμός ρηγματώσεων στην φέρουσα πλάκα.

Για τον περιορισμό των ρηγματώσεων στην φέρουσα πλάκα, επελέγη η μεθοδολογία της ελεύθερης ρηγματώσεως. Έτσι η πλάκα, μετά από κατάλληλες μελετητικές εκτιμήσεις, στηριγμένες κυρίως στην Αμερικάνικη πρακτική, οπλίστηκε με συνεχώς συγκολλούμενο οπλισμό και συνεχή σκυροδέτηση της πλάκας (χωρίς αρμούς). Ο οπλισμός ετέθη στο μέσο του πάχους της

πλάκας και είχε ποσοστό $\rho_s = A_s/A_c \approx 0,9\%$ (κύριος οπλισμός $\Phi 20/20$ και εγκάρσιος $\Phi 16/40$). Με την τοποθέτηση του οπλισμού όπως παραπάνω αναμένεται ελεύθερη ρηγμάτωση με εύρος ρωγμών μικρότερο από $0,5\text{mm}$ και αποστάσεις μεταξύ των ρωγμών το πολύ 2m (για την δυσμενέστερη τιμή πτώσεως θερμοκρασίας).



Σχήμα 3



Σχήμα 4



Σχήμα 5

2.2. Σταθερή Επιδομή στην σήραγγα

Μέσα στην σήραγγα εφαρμόστηκε το ίδιο σύστημα σταθερής επιδομής. Το δάπεδο της σήραγγας σε μερικές περιοχές ήταν κατασκευασμένο από σκυρόδεμα (κλειστή διατομή) ενώ σε άλλες το δάπεδο ήταν το βραχώδες πέτρωμα της περιοχής (ανοιχτή διατομή). Για κατασκευαστικές ανάγκες της σήραγγας στα δάπεδα ευρέθησαν εγκάρσιοι αναβαθμοί (σαμαράκια) ανά 200m περίπου.

Για την άρση αβεβαιοτήτων (που τεκμηριώθηκαν μελετητικά) διαφορετικής ελαστικότητας του συστήματος, κάτω από την φέρουσα πλάκα από σκυρόδεμα της σταθερής επιδομής, αντί της στρώσης Κ.Θ.Α. (όπως στην ανοιχτή γραμμή) χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα C16/20 μέχρι το δάπεδο της σήραγγας. Από μελετητικής απόψεως, υπολογίστηκαν και ελέγχθηκαν (με την ίδια μέθοδο όπως και στην ανοιχτή γραμμή) οι τάσεις στην διεπιφάνεια φέρουσας στρώσης και στρώσης εκ C16/20.

Και μέσα στην σήραγγα, η φέρουσα πλάκα μελετήθηκε οπλισμένη όπως και στην ανοιχτή γραμμή.

2.3. Σταθερή Επιδομή στις γέφυρες

Στο συγκεκριμένο έργο, έπρεπε η σταθερή επιδομή να εφαρμοσθεί και επί υπαρχουσών γεφυρών ενός ή δύο ανοιγμάτων, οπλισμένων ή προεντεταμένων, με μέγιστο στατικό άνοιγμα γεφυρών περί τα 20m. Οι γέφυρες αυτές δεν είχαν υπολογισθεί για να δεχθούν σταθερή επιδομή, αλλά είχαν υπολογισθεί για την κλασική σκυρογραμμή. Υπό αυτά τα δεδομένα, και εφόσον τα φορτία της σταθερής επιδομής ήσαν μικρότερα, από αυτά για τα οποία ήσαν υπολογισμένες οι υπάρχουσες γέφυρες, εφαρμόστηκε επ' αυτών το ίδιο σύστημα Σταθερής Επιδομής, με χρήση συνθετικού υλικού «Stirodur» πάχους 30mm μεταξύ πλάκας καταστρώματος γεφυρών και κάτω πέλματος φέρουσας πλάκας σταθερής επιδομής (για την αποφυγή συνεργασίας μεταξύ τους) και κατασκευή αρμών (στο σώμα της σταθερής επιδομής) σε απόσταση μεταξύ τους περί τα 5m, για την αποφυγή καμπτικής αλληλεπίδρασης φορέα γέφυρας και σώματος σταθερής επιδομής.

Για την ανάληψη των οριζόντιων δυνάμεων (τροχοπέδηση και παρόμοια) και την μεταφορά τους από την σταθερή επιδομή στον φορέα της γέφυρας, απαιτήθηκαν διατμητικές κλείδες, οι οποίες εκ των πραγμάτων κατασκευάστηκαν εκ των υστέρων επί των φορέων των γεφυρών.

Υπό αυτά τα δεδομένα :

- επανελέγησαν οι φορείς των γεφυρών για την επάρκεια τους
- εκτιμήθηκε η εντατική κατάσταση στην φέρουσα πλάκα της σταθερής επιδομής (με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων) και η πλάκα οπλίσθηκε κατάλληλα.

3. ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ

Για την κατασκευή σταθερής επιδομής προβλέπονται οι ακόλουθες φάσεις κατασκευής (σε ανοιχτή γραμμή που είναι και η συνθετότερη) :

- Χωματοουργικά
- Κατασκευή αντιπαγετικής στρώσης
- Κατασκευή Κ.Θ.Α.
- Κατασκευή φέρουσας στρώσης
- Κατασκευή εσχάρας γραμμής
- Ρύθμιση τελικής γραμμής
- Διάστρωση σκυροδέματος πλήρωσης.

α) Χωματοουργικά

Στο συγκεκριμένο έργο οι χωματοουργικές εργασίες είχαν ολοκληρωθεί στα πλαίσια προγενέστερης σύμβασης. Στα πλαίσια κατασκευής σταθερής επιδομής, διεξήχθησαν έλεγχοι συμπίκνωσης (με ελάχιστη απαίτηση 98% του τροποποιημένου Proctor), πενετρομετρήσεις (με απαίτηση $E_{v2} \geq 80 \text{ MN/m}^2$).

β) Αντιπαγετική στρώση

Είναι το αντίστοιχο της οδοστρώσας 3Α (0-150 & 155) στην οδοποιία. Η αναγκαιότητα της δεν είναι απολύτως απαραίτητη στην Ελλάδα λόγω της περιορισμένης εμφάνισης παγετού στην χώρα μας. Κατασκευάζεται με κοκκομετρία παρόμοια με του 3Α (0-155), αλλά με λιγότερο από 3% ψιλά (διερχόμενα του κόσκινου Νο 200) ώστε να διαθέτει την επιθυμητή υδατοδιαπερατότητα.

Οι απαιτήσεις αντοχής προβλέπουν συμπίκνωση στο 100% του τροποποιημένου proctor. Η διάστρωση είναι αντίστοιχη μιας συνηθισμένης οδοποιίας. Οι απαιτήσεις ακρίβειας στην κατασκευή είναι οι συνήθεις της οδοποιίας.

γ) Κατασκευή στρώσης αμμοχάλικου κατεργασμένης με τσιμέντο (Κ.Θ.Α.)

Το ΚΘΑ (Κατεργασμένο Θραυστό Αμμοχάλικο) μπορεί να θεωρηθεί (ισχνό) σκυρόδεμα, αφού περιέχει ~5% τσιμέντο (έναντι π.χ. 12,5% - 300kg/m³ ενός συνηθισμένου C20/25). Σε γενικές γραμμές η κοκκομετρία των αδρανών του είναι σαν 3Α με λιγότερο από 3% ψιλά, ενώ περιέχει περίπου 5% τσιμέντο και 5-7% νερό. Παρασκευάζεται είτε σε συγκρότημα σκυροδέματος, είτε σε ειδικό συγκρότημα ΚΘΑ διαρκούς ροής, είτε επί τόπου της περιοχής εφαρμογής με ειδική φρέζα. Οι αναπτυσσόμενες αντοχές ελέγχονται με κυλινδρικά δοκίμια (στα οποία το ΚΘΑ συμπυκνώνεται με διαδικασία αντίστοιχη του proctor) ή καρότα. Το ΚΘΑ μεταφέρεται με φορτηγά και η διάστρωσή του είναι αντίστοιχη με της οδοστρώσας (3Α), με ισοπεδωτή γαιών (Graider) ή διαστρωτήρα ασφαλτικών (Finisher) και συμπίκνωση με δονητικό οδοστρωτήρα. Απαιτείται συμπίκνωση στα 100% της τροποποιημένης δοκιμής proctor, σε στρώσεις ελαχίστου πάχους 12 εκ. Κατασκευάζονται επίσης εγκάρσιοι ψευδοαρμοί ανά ~5m για την επίτευξη ελεγχόμενης ρηγμάτωσης, λόγω της συστολής ξήρανσης και αυξομειώσεων της θερμοκρασίας.

Στο συγκεκριμένο έργο, η κατασκευή του ΚΘΑ έγινε με Finisher σε 3 στρώσεις (13+13+14cm) με χρονική απόσταση 3 ημερών μεταξύ τους. Μόνο στα μεταβατικά τμήματα ή σε τμήματα περιορισμένου μήκους (50 ~100cm) έγινε διάστρωση wet to wet. Επειδή το Κ.Θ.Α. διαθέτει ικανοποιητική ρευστότητα είναι δυνατή η διάστρωσή του μέσω κυλιόμενου μεταλλότυπου (Paver) κάτι που προσφέρει ενδεχομένως οικονομία υλικού αφού οι πλαϊνές κλίσεις θα μπορούσαν να κατασκευασθούν με κλίση 5: 1 (αντί 1: 1).

Για τις κεκλιμένες αποτιμήσεις χρησιμοποιήθηκε επιπλέον δόνηση στις άκρες, μετά την κυρίως δόνηση.

Ψευδαρμοί (αρμοί συστολής) κατασκευάστηκαν μόνο στη 3η στρώση του ΚΘΑ προκειμένου να επιτευχθεί η απαίτηση για χάραξη του ψευδοαρμού στο 1/3 του πάχους του συνολικού στρώματος. Η κατασκευή τους έγινε με αδιατάρακτη κοπή, με ασφαλοκόφτη την 3η ημέρα μετά την κατασκευή του 3ου στρώματος.

δ) Κατασκευή φέρουσας πλάκας σκαφοειδούς διατομής

Η κατασκευή της φέρουσας στρώσης αυτής της διατομής ήταν από τα κρισιμότερα και δυσκολότερα στάδια του Έργου. Τοποθετείται επί του ΚΘΑ (ή του C16/20 εντός της σήραγγας), προκειμένου να υποδεχθεί στο εσωτερικό της την σχάρα της γραμμής (στρωτήρες και

σιδηροτροχιές). Κατασκευάστηκε από C30/37 με συνολικό πλάτος 3,20m, εσωτερικό πλάτος 2,80m, πάχος πλάκας 18cm και ύψος πλαϊνών νευρώσεων 21cm. Στο μέσον της διατομής της πλάκας (στα 9 από τα 18cm) τοποθετήθηκε οπλισμός 20Φ20 κατά μήκος και Φ20/20 εγκάρσια, για τον έλεγχο των ρηγματώσεων συστολής ξήρανσης και των αυξομειώσεων της θερμοκρασίας. Η απαιτούμενη ακρίβεια της επιφάνειας του σκυροδέματός της ήταν $\pm 5\text{mm}$. Οι πλαϊνές νευρώσεις δεν συμμετέχουν στην φέρουσα ικανότητα της πλάκας και γι' αυτό δεν οπλίζονται, ώστε να μην αλλοιώνουν την στατική λειτουργία της πλάκας. Η χρησιμότητά τους είναι ως στηρίγματα για την οριζοντιογραφική ρύθμιση των στρωτήρων και ως καλούπι για το σκυρόδεμα πλήρωσης. Η κατασκευή του συνόλου της πλάκας σκαφοειδούς διατομής πραγματοποιήθηκε με μηχανήμα – διαστρωτήρα κυλιόμενου μεταλλότυπου (slipform Paver) και αναλύεται αμέσως παρακάτω:

Για την κατασκευή παρουσιάστηκαν 3 κατηγορίες προβλημάτων:

- Κατασκευή, ρύθμιση και σχεδιασμός κατάλληλης σύνθεσης για το Μηχάνημα Κυλιόμενου Μεταλλότυπου («Paver»).
- Ρύθμιση των σιδηροτροχιών κύλισης του Paver.
- Παρασκευή και σκυροδέτηση του C30/37.

Ο κυλιόμενος μεταλλότυπος σχεδιάστηκε αμέσως μετά την υπογραφή της σύμβασης. Τον Μάιο του 2002 είχε κατασκευαστεί μια «αρχική έκδοση» που περιελάμβανε μόνο το πλαίσιο, της τροχιάς και το καλούπι. Η αρχική αυτή κατασκευή δοκιμάστηκε σε ένα εργοτάξιο κατασκευής της Εγνατίας Οδού της εταιρείας ΘΕΜΕΛΗ κοντά στην Θεσσαλονίκη, με εξωτερική κίνηση (έλξη από χωματουργικό μηχανήμα, εξωτερικούς δονητές - μάζας και επιφάνειας- και σκυρόδεμα από το συγκρότημα παραγωγής του εργοταξίου). Μετά από δοκιμές περίπου 10 ημερών, όπου αποδείχθηκε η δυνατότητα του κυλιόμενου μεταλλότυπου να διαστρώσει την ζητούμενη διατομή, λήφθηκε η σχετική απόφαση και το μηχανήμα προχώρησε στην φάση της οριστικής υλοποίησης. Στην τελική του μορφή διαθέτει κίνηση και στους 4 τροχούς, με έναν υδραυλικό κινητήρα από κάθε πλευρά και αλυσίδες μετάδοσης, χωρίς διαφορικό, 8 υδραυλικούς δονητές, αμερικάνικης κατασκευής της WYCO, με ρυθμιζόμενη δόνηση και σύστημα ψηφιακών ενδείξεων, περιστρεφόμενη ταινία, τροφοδότηση (για τροφοδοσία και από τις δύο πλευρές του κυλιόμενου μεταλλότυπου), με χειροκίνητη περιστροφή και υδραυλική κίνηση, υδραυλικό κοχλία διαμοιρασμού σκυροδέματος (μέσα στην δεξαμενή σκυροδέματος – «καρούτα»), κι εξέδρα χειριστή. Η κίνηση εξασφαλίζεται από έναν ισχυρό πετρελαιοκινητήρα με τις αντίστοιχες υδραυλικές αντλίες, δεξαμενή πετρελαίου, υδραυλικού ελαίου, ηλεκτρικό σύστημα κ.λ.π. Όλες οι προαναφερθείσες υδραυλικές κινήσεις το γκάζι, οι στροφές του κινητήρα, τα φώτα, οι υδραυλικές πιέσεις, θερμοκρασίες κ.λ.π. ελέγχονται και ρυθμίζονται από τον χειριστή. Το καλούπι είναι προσαρμοσμένο πάνω στο πλαίσιο του κυλιόμενου μεταλλότυπου (κάτω από την καρούτα) και ρυθμίζεται κατ' όλες τις ρυθμίσεις και στροφές εκτός από αυτές του οριζόντιου επιπέδου.

Όπως όμως αποδείχθηκε η κατασκευή του μηχανήματος δεν ήταν το δυσκολότερο σημείο. Απαιτήθηκαν περίπου 2,5 μήνες δοκιμών προκειμένου να ρυθμισθούν όλοι οι σχετικοί παράγοντες και να επιτευχθεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

- Ποιο συγκεκριμένα απαιτήθηκε:
- Ρύθμιση της θέσης και των κλίσεων του καλουπιού.
- Ρύθμιση της θέσης και των κλίσεων των δονητών.
- Προσδιορισμός της κατάλληλης σύνθεσης σκυροδέματος.
- Κατασκευαστικές μικροτροποποιήσεις του καλουπιού (καμπυλότητας ένωσης κατακόρυφου με οριζόντιο τμήμα, προσθήκη «μυστριού» στο πίσω μέρος, κεκλιμένοι-φάλτσοι τροφοδότες των πλαϊνών νευρώσεων της πλάκας, οπές εξαερισμού σκυροδέματος, πλευρικές ποδιές ρύθμισης ύψους, κ.λ.π.).
- Εύρεση της κατάλληλης ταχύτητας, κίνησης του κυλιόμενου μεταλλότυπου.
- Ρύθμιση της έντασης δόνησης κάθε δονητή.

Τελικά μετά από πολλές δοκιμές και διερεύνηση της σχετικής τεχνογνωσίας από διάφορες πηγές (strabag, πρώην στέλεχος Ιταλικής Gomaco, U.S. προμηθευτές των δονητών, χειριστές κυλιόμενου μεταλλοτύπου, κατασκευαστές καλουπιών, κ.λ.π.) έγινε δυνατόν να προσδιορισθεί ο συνδυασμός των ανωτέρω. Όπως προαναφέραμε όλες οι οριζοντιογραφικές και υψομετρικές ρυθμίσεις γίνονται μέσω της διάστρωσης των σιδηροτροχιών. Η καθημερινή μεταφορά, διάστρωση, ρύθμιση και σταθεροποίηση 400 έως 900 μέτρων κοιλοδοκών 10cmx10cm, αποδείχθηκε εργασία με ιδιαίτερες απαιτήσεις προγραμματισμό, μεθοδολογία αλλά κυρίως ακρίβειας. Δοκιμάστηκαν δύο μεθοδολογίες διάστρωσης και ρύθμισης μέχρι να προσδιορισθεί η ορθή που επιτύχανε το ικανοποιητικό αποτέλεσμα. Ο κρίσιμος παράγοντας ήταν η παρεμβολή όσο το δυνατόν λιγότερων σταδίων και εργασιών από τα τριγωνομετρικά μέχρι την διέλευση του κυλιόμενου μεταλλοτύπου. Η τελική μεθοδολογία προέβλεπε ταυτόχρονη οριζοντιογραφική και υψομετρική χάραξη από ένα τοπογραφικό συνεργείο μέσω κατάλληλων εξαρτημάτων ρύθμισης, εγκιβωτισμό με τσιμεντοκονία και έλεγχο ορθής τοποθέτησης από δεύτερο τοπογραφικό συνεργείο, με υψηλής ακριβείας ηλεκτρονικό χωροβάτη. Οι χαράξεις γίνονταν σε τυχαίες θέσεις των οποίων τα ακριβή στοιχεία προσδιορίζονταν από κατάλληλο ηλεκτρονικό υπολογιστή και λογισμικό συνδεδεμένο με τα τοπογραφικά όργανα.

Η μεγαλύτερη δυσκολία κατά την περίοδο ρύθμισης του κυλιόμενου μεταλλοτύπου, αλλά και ο πιο ασταθής και εύκολα μεταβαλλόμενος παράγοντας επίτευξης της επιθυμητής διατομής και ακρίβειας, ήταν η σύνθεση του σκυροδέματος. Μια ελάχιστη μεταβολή της κάθισης κατά 1-2cm (μεταβολή η οποία είναι πολύ κοντά στα όρια ακρίβειας του κώνου κάθισης) μπορεί να προκαλέσει μεγάλες μεταβολές στην ποιότητα της διατομής. Μεγάλη κάθιση προκαλεί «φούσκωμα» των πλαϊνών νευρώσεων της πλάκας ενώ με μικρή δεν «γεμίζουν» ορθά. Μια μικρή μεταβολή ή ανομοιομορφία της αναλογίας των αδρανών (η οποία εύκολα συμβαίνει λόγω υπολειμμάτων στον κουβά του φορτωτή τροφοδοσίας του συγκροτήματος παραγωγής σκυροδέματος ή λόγω υπερβολικής φόρτωσης και ξεχειλίσματος κάποιου σιλό αδρανών) μπορεί να προκαλέσει «φούσκωμα» των πλαϊνών νευρώσεων ή ανεπαρκή συμπύκνωση του δαπέδου της πλάκας. Μια μεγαλύτερη μεταβολή (σε συνδυασμό και με χαμηλή κάθιση ή/και οριακή κλίση του καλουπιού στον εγκάρσιο άξονα) μπορεί να σηκώσει όλο το σύστημα του κυλιόμενου μεταλλοτύπου στον αέρα. Μεγάλες αποκλίσεις σύνθεσης μπορεί να προκαλέσουν αδυναμία του μεταλλοτύπου να διαστρώσει το σκυροδέμα και σύσφιξη του μέσα στην καρούτα που για να διορθωθεί απαιτεί αποσυναρμολόγηση του μισού μηχανήματος και καθυστέρηση τουλάχιστον μιάμισης βάρδιας. Άλλο πρόβλημα που μπορεί να παρουσιασθεί είναι η έξοδος του σκυροδέματος από την μπροστινή (κατά την φορά κίνησης του μηχανήματος) πλευρά του καλουπιού (η οποία είναι ανοιχτή λόγω ύπαρξης της σχάρας οπλισμού). Το αποτέλεσμα είναι η αύξηση της αντίστασης στην κίνηση του μεταλλοτύπου και η αποκόλληση των ράβδων του εγκάρσιου οπλισμού.

ε) Στρώση γραμμής - ρύθμιση

i) Στρώση γραμμής

Η στρώση της σχάρας της γραμμής δεν παρουσίασε ιδιαίτερες αποκλίσεις απ' αυτή οποιαδήποτε σιδηροδρομικού έργου. Χρησιμοποιήθηκαν προεντεταμένοι στρωτήρες από σκυρόδεμα, τύπου B301 (με ενσωματωμένες (2) βίδες για την οριζοντιογραφική και (2) για την υψομετρική ρύθμιση) και B302 (χωρίς ρυθμιστές), σύνδεσμοι IOARV της Vossloh και σιδηροτροχιές UIC 60 μήκους 54m.

Σιδηροδρομικό ενδιαφέρον παρουσίασε κυρίως η εισκόμιση των υλικών, η οποία είχε όμως κάποια δυσκολία όχι λόγω των απαιτήσεων της Σ.Ε., αλλά λόγω των περιορισμένων προσβάσεων εντός της σήραγγας.

ii) Ρύθμιση

Διαδικασία ιδιαίτερης δυσκολίας, η οποία οφείλεται στον «χειροκίνητο» τρόπο που εκτελέστηκε, στις υπερβολικές απαιτήσεις ακριβείας και στην αστάθεια της σχάρας λόγω αλλαγής του μήκους των σιδηροτροχιών από τις διακυμάνσεις της θερμοκρασίας (με $\Delta\theta = 10^0$ C προκαλείται διαφοροποίηση περίπου 4mm για 54m σιδηροτροχιάς).

Η ρύθμιση εκτελέστηκε σε κάθε δεύτερο στρωτήρα (τύπου B301). Οι στρωτήρες αυτοί διαθέτουν δύο κατακόρυφες διαμπερείς οπές, περίπου 20 εκ. από τα άκρα τους, από τις οποίες περνάνε κατάλληλες ειδικές βίδες (spindels), με τις οποίες ρυθμίζεται υψομετρικά η θέση και η υπερύψωση του στρωτήρα. Οι στρωτήρες διαθέτουν επίσης, οριζόντιες οπές με σπείρωμα και στις πλαϊνές (κατά την φορά κίνησης) επιφάνειές τους, στις οποίες τοποθετούνται απλές βίδες, που κοντράρουν στις νευρώσεις της πλάκας και με τις οποίες ρυθμίζεται η θέση του στρωτήρα οριζοντιογραφικά. Οι απαιτήσεις ακριβείας είναι $\pm 2\text{mm}$ οριζοντιογραφικά και υψομετρικά, σε σχέση με τις απόλυτες συντεταγμένες, και $\pm 5\text{mm}$ σε σχέση με έναν επόμενο στρωτήρα σε απόσταση 5m και $\pm 10\text{mm}$ σε σχέση με έναν στρωτήρα σε απόσταση 120m. Οι απαιτήσεις αυτές, όπως και σε μικρότερο βαθμό της φέρουσας πλάκας ($\pm 5\text{mm}$) και του ΚΘΑ ($+5\text{mm}/-15\text{mm}$) είναι υψηλότερες από αυτές που μπορούν να επιτύχουν τα τοπογραφικά όργανα κι έτσι για την επίτευξή τους απαιτούνται ιδιαίτερες μεθοδολογίες, διατάξεις και φυσικά πολλαπλές μετρήσεις. Έγινε ευρεία χρήση Η/Υ (οι οποίοι ήταν συνδεδεμένοι με όλα τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν στο Έργο) και ειδικών προγραμμάτων, κατά παραγγελία για τις συγκεκριμένες εφαρμογές. Η ρύθμιση είχε ιδιαίτερο τοπογραφικό, υπολογιστικό, προγραμματιστικό και διοικητικό ενδιαφέρον.

στ) Σκυρόδεμα Πλήρωσης

Μαζί με την κατασκευή της φέρουσας πλάκας και την ρύθμιση, η παρασκευή και διάστρωση του σκυροδέματος πλήρωσης ποιότητας C30/37 απετέλεσε μια από τις τρεις δυσκολότερες και τεχνικότερες εργασίες της σταθερής επιδομής. Το σκυρόδεμα πλήρωσης εγχύεται μέσα στην σκαφοειδούς διατομής πλάκα, προκειμένου να εγκιβωτίσει και υποβαστάξει τους στρωτήρες της σχάρας.

Οι δυσκολίες του αφορούσαν κυρίως στην διάστρωσή του στην σύνθεσή του.

Οι δυσκολίες της σύνθεσης επισημαίνονται κυρίως στην απαίτηση μικρού μέγιστου κόκκου (11mm), υψηλής αντοχής (C30/37), μικρής συρρίκνωσης και συστολής ξήρανσης, μεγάλης ρευστότητας (κάθιση από 12 cm έως και 20cm), και μεγάλου χρόνου διάστρωσης (μέχρι 2 ώρες από την παρασκευή του). Χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο υψηλής αντοχής, λόγος ενεργού νερού προς τσιμέντο κάτω από 0,43 και αφθονία χημικών πρόσθετων (επιβραδυντής και ρευστοποιητής).

Οι δυσκολίες της διάστρωσης επισημαίνονται κυρίως στην απουσία προσβάσεων για την μεταφορά κι έκχυση του σκυροδέματος και στην ύπαρξη ιδιαίτερα μικρών κενών που πρέπει να πληρωθούν ικανοποιητικά (τρύπες των στρωτήρων διαμέτρου 50mm με διερχόμενο οπλισμό 16mm και κενό μεταξύ πέλματος των στρωτήρων και φέρουσας πλάκας μεγέθους 30 έως 70mm), επιτυγχάνοντας ταυτόχρονα ιδιαίτερα καλή δόνηση και ομοιογένεια του σκυροδέματος σε όλα τα σημεία.

ζ) Ιδιαιτερότητες γεφυρών

Οι γέφυρες απετέλεσαν τις πλέον πολύπλοκες κατασκευές του Έργου, λόγω του ότι οι γέφυρες δεν είχαν σχεδιασθεί εξ' αρχής να δεχθούν την σταθερή επιδομή.

Έτσι, για μια γέφυρα που δεν έχει εξ' αρχής μελετηθεί για εφαρμογή Σ.Ε., οι εργασίες κατασκευής Σ.Ε. που εκτελέστησαν ήταν οι ακόλουθες :

- Αφαίρεση της προστασίας της μόνωσης και της μόνωσης, εκσκαφή και αποκάλυψη των πλακών πρόσβασης και εκσκαφή εκατέρωθεν τους προς δημιουργία των σφηνοειδών μεταβάσεων από ΚΘΑ.
- Κατασκευή των σφηνοειδών μεταβάσεων από ΚΘΑ.
- Εκσκαφή εντορμιών στον φορέα της γέφυρας διαστάσεων 1m x 1m και βάθους 10cm. Αποκάλυψη του οπλισμού και διάτρηση οπών στον πυθμένα της εκσκαφής για τοποθέτηση επιπλέον αγκυρίων (βλητρών S500 Φ20).
- Οπλισμός, καλούπωμα και σκυροδέτηση των κλειδών διατμητικής αγκύρωσης (τάκοι-stoppers). Οι τάκοι έχουν διαστάσεις 1x1m² και ύψος 20cm (10cm μέσα στην ανωτέρω εκσκαφή του φορέα και 10cm στην υπερκείμενη σκαφοειδή φέρουσα στρώση της Σ.Ε.)
- Μόνωση του φορέα της γέφυρας και των τάκων. Επιπλέον προστασία των τάκων με φύλλα χαλκού. Κατάλληλες στεγανωτικές και προστατευτικές διατάξεις στους αρμούς της γέφυρας με γωνίες, ελαστικές μεμβράνες, κλπ.
- Οπλισμός και σκυροδέτηση της φέρουσας πλάκας. Η πλάκα σκυροδετείται σε τμήματα των περίπου 5m με αρμούς μεταξύ τους. Στην επιφάνεια της σκυροδέτησης προεξέχει διατμητικός οπλισμός (τσέρκια), για καλύτερη σύνδεση με το σκυρόδεμα πλήρωσης. Τόσο οι αρμοί όσο και τα τσέρκια υπολογίζονται ώστε να έχουν τοποθετηθεί στα κενά ανάμεσα στους στρωτήρες.
- Διάτρηση οπών για την τοποθέτηση διατμητικών αγκυρίων (βλήτρων) στις πλάκες πρόσβασης, για επίτευξη σύνδεσης της γέφυρας με την πλάκα εκτός αυτής.
- Κατασκευή εγκάρσιων διατάξεων αγκύρωσης (stoppers) της φέρουσας πλάκας στο επίχωμα εκατέρωθεν των γεφυρών. Τα stoppers κατασκευάζονται από οπλισμένο σκυρόδεμα, έχουν πλάτος ίσο με της πλάκας, πάχος 60 έως 80cm και βάθος περί τα 2m. Για την κατασκευή τους κόβεται η επιφάνεια του ΚΘΑ με κόφτη και επισκάπτεται το ΚΘΑ, το FSS και το χωματουργικό μέχρι το επιθυμητό βάθος.
- Τελικά κατασκευάζεται και η φέρουσα πλάκα εκτός του φορέα της γέφυρας. Ο οπλισμός της συνδέεται με τα stoppers, και τα βλήτρα της πλάκας πρόσβασης, ενώ αυτή καταλήγει στην σκάφη της γέφυρας με αρμό. Στην περιοχή κοντά στην γέφυρα διαθέτει και αυτή τσέρκια για σύνδεση με το σκυρόδεμα πλήρωσης.

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μελέτη της ΕΡΓΑ ΟΣΕ Α.Ε. που συνόδευε την δημοπράτηση του ΕΡΓΟΥ.
2. ΚΟΛΛΙΑΣ, Σ.Κ. Μελέτη εφαρμογής για την εταιρεία ΘΕΜΕΛΗ Α.Ε.
3. ΚΟΛΛΙΑΣ, Σ.Κ. Υπολογισμός δύσκαμπτων οδοστρωμάτων. ΕΜΠ 1999.
4. ΤΣΟΥΚΑΝΤΑΣ, Σ.Γ. 2000. Ερευνητικό έργο με θέμα : «Διερεύνηση προβλημάτων που αφορούν στην εφαρμογή σταθερής επιδομής στην Ελλάδα», 4^η φάση, ΕΡΓΑ ΟΣΕ Α.Ε.
5. Anforderungskatalog zum Bau der Festen Fahrbahn. 4. Überarbeitete Auflage. stand 01.07.1997 u. 01.05.1999. D.B.