

Κριτική Θεώρηση των Μεθόδων Υπολογισμού των Συντελεστών Ισοδυναμίας Φορτίων των Εμπορικών Οχημάτων

Σ. ΚΟΛΙΑΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΒΛΑΧΟΣ

Πολιτικός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται και σχολιάζεται ο υπολογισμός των Συντελεστών Ισοδυναμίας (ΣΙ) των φορτίων των αξόνων των εμπορικών οχημάτων ανάλογα με το είδος του άξονα (απλός, διπλός, τριπλός) και το είδος του τροχού (απλός, δίδυμος). Ο υπολογισμός γίνεται σύμφωνα με τις αρχές των αναλυτικών μεθόδων υπολογισμού του πάχους των οδοστρωμάτων με βάση την αρχή Miner για τρεις “τυπικές” διατομές ευκάμπτων οδοστρωμάτων και ένα “τυπικό” ημιάκαμπτο οδόστρωμα. Ο τυπικός άξονας (αξονικό φορτίο αναφοράς) μπορεί να είναι απλός άξονας με απλούς ή δίδυμους τροχούς. Επίσης, γίνεται υπολογισμός των ΣΙ με τους αντίστοιχους αλγόριθμους του Οδικού Πειράματος AASHO και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φθορά των οδοστρωμάτων προκαλείται κυρίως εξαιτίας της επαναλαμβανόμενης φόρτισης τους από τα Εμπορικά Οχήματα (ΕΟ). Η επίδραση της φόρτισης των επιβατικών οχημάτων έχει αποδειχθεί θεωρητικά και πρακτικά ασήμαντη.

Κάθε διέλευση ΕΟ προκαλεί στη διατομή του οδοστρώματος εντατική κατάσταση ανάλογη με το μέγεθος του φορτίου, το είδος των τροχών και το σύστημα των αξόνων του.

Για να υπολογιστούν οι τάσεις και οι ανηγμένες παραμορφώσεις στα κρίσιμα σημεία της διατομής του, το οδόστρωμα προσομοιάζεται, συνήθως, με σύστημα επάλληλων ελαστικών στρώσεων που εδράζεται σε ελαστικό ημίχωρο. Το προσομοίωμα ορίζεται πλήρως με το μέτρο ελαστικότητας “Ε”, το λόγο του Poisson “ν” καθώς και το πάχος των υλικών οδοστρώσεως. Ο υπολογισμός γίνεται με τη βοήθεια προγραμμάτων H/Y.

Αστοχία των οδοστρωμάτων θεωρείται:

1. Η ρωγμάτωση της ασφαλικής στρώσης, η οποία προκαλείται:
 - α. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα, από υπέρβαση της αντοχής του ασφαλτομίγματος σε κόπωση από κάμψη. Κρίσιμο σημείο θεωρείται ο πυθμένας της ασφαλικής στρώσης

και κρίσιμο μέγεθος η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση “ ϵ_h ” (ακτινική ή εφαπτομενική).

- β. Στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα, από υπέρβαση της αντοχής σε κόπωση από κάμψη των κατεργασμένων αμμοχαλίκων με υδραυλικές κονίες. Κρίσιμο σημείο θεωρείται ο πυθμένας κάθε στρώσης από κατεργασμένο υλικό και κρίσιμο μέγεθος η οριζόντια εφελκυστική τάση “ σ_h ” (ακτινική ή εφαπτομενική).
2. Η παραμόρφωση της επιφάνειας κύλισης, που οφείλεται στην υπερβολική παραμόρφωση της στρώσης έδρασης, τόσο στα εύκαμπτα όσο και στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Κρίσιμο σημείο θεωρείται η επιφάνεια της στρώσης έδρασης και κρίσιμο μέγεθος η ανηγμένη κατακόρυφη παραμόρφωση “ ϵ_z ”.

Κρίσιμη λωρίδα κυκλοφορίας για τον υπολογισμό των οδοστρωμάτων θεωρείται η δεξιά, αφού από αυτή διέρχεται κατά μέσο όρο το 80% των εμπορικών οχημάτων, ανάλογα με τον αριθμό των λωρίδων κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση.

Η κυκλοφορία των εμπορικών οχημάτων παρουσιάζει ποικιλία στη σύνθεσή της, τόσο ως προς το μέγεθος των φορτίων όσο και ως προς το σύστημα των αξόνων και το είδος των τροχών, με τους οποίους αυτά τα φορτία εφαρμόζονται στο οδόστρωμα. Επομένως, είναι πρακτικά δύσκολο να ληφθεί υπόψη στο υπολογισμό ως έχει.

Το πρόβλημα είναι δυνατό να απλοποιηθεί, αν οι διελεύσεις των διαφορετικών ομάδων αξόνων (ομάδων που προκαλούν την ίδια εντατική κατάσταση στο οδόστρωμα) της πραγματικής κυκλοφορίας εκφραστούν σε διελεύσεις ενός τυπικού άξονα, οι οποίες προκαλούν θεωρητικά ίση φθορά. Έτσι, ο υπολογισμός της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος θα γίνει για τον τυπικό άξονα.

Για το σκοπό αυτό απαιτούνται αφ’ ενός μέτρηση και καταγραφή των παραμέτρων της κυκλοφορίας των εμπορικών οχημάτων (όπως φορτία και είδος των διερχομένων αξόνων) και αφ’ ετέρου κατάλληλες μέθοδοι για τον υπολογισμό

της ισοδυναμίας της κυκλοφορίας αυτής με τις διελεύσεις ενός τυπικού άξονα. Από το 1987 τα Εργαστήρια Οδοποιίας του Ε.Μ.Π. [1, 2] και του Α.Π.Θ. [3, 4, 5] διεξάγουν σχετικές μετρήσεις, χάρη σε ερευνητικά προγράμματα που ανέθετε το ΤΕΟ, αλλά πιστεύεται ότι οι μετρήσεις αυτές θα πρέπει να εντατικοποιηθούν και να συστηματοποιηθούν περισσότερο. Την περίοδο αυτή, ενώ υπάρχει σε πλήρη εξέλιξη το μεγαλύτερο πρόγραμμα κατασκευής οδικών έργων που υπήρξε ποτέ, εντούτοις, δεν έχει γίνει πλήρως κατανοητό πόσο απαραίτητες είναι αφ' ενός οι συστηματικές μετρήσεις για τις συνθήκες φόρτισης των οδοστρωμάτων, αφ' ετέρου ένα σύγχρονο σύστημα διαστασιολόγησης βασισμένο σε μετρήσεις των χαρακτηριστικών των υλικών, όπως αυτά κατασκευάζονται στη χώρα μας.

Η ανάλυση της κυκλοφορίας στις εθνικές οδούς, που έγινε μέχρι σήμερα [1-5], στηρίχθηκε κυρίως σε πειραματικούς συντελεστές ισοδυναμίας που προσδιορίστηκαν στο Οδικό Πείραμα AASHO. Στην εργασία αυτή γίνεται διερεύνηση του προσδιορισμού των συντελεστών ισοδυναμίας με αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού των οδοστρωμάτων, οι οποίες στηρίζονται σε νόμους αστοχίας των υλικών οδοστρώσεως και των υλικών της στρώσης έδρασης.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

- Ε : το μέτρο ελαστικότητας.
 ν : ο λόγος του "Poisson".
 ε_h : η μέγιστη οριζόντια ανηγμένη εφελκυστική παραμόρφωση.
 σ_h : η μέγιστη οριζόντια εφελκυστική τάση.
 ε_z : η μέγιστη κατακόρυφη ανηγμένη θλιπτική παραμόρφωση.
 D : ε_h ή σ_h ή ε_z.
 P : το φορτίο ενός άξονα.
 N : οι επαναλήψεις φόρτισης μέχρι την αστοχία.
 p_t : ο τελικός δείκτης λειτουργικότητας.
 SN : ο δείκτης δομικής αντοχής.

3. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ

3.1. Βασική θεωρητική προσέγγιση

Ο "νόμος Miner" χρησιμοποιείται ευρύτατα στις περιπτώσεις επαναλαμβανόμενων φορτίσεων υλικών για την εκτίμηση της αντοχής τους σε κόπωση. Σύμφωνα με την υπόθεση αυτή, αν "N_i" το πλήθος των φορτίσεων "P_i", που απαιτούνται για να αστοχήσει ένα υλικό, και "n_i" είναι οι πραγματικές φορτίσεις που πραγματοποιούνται, τότε η φθορά, που προκλήθηκε από τις n_i φορτίσεις είναι:

$$\Phi_{n_i} = \frac{n_i}{N_i} \quad (3.1)$$

Για διάφορες ομάδες φορτίσεων P_i, όπου i=1,2,... ν, το άθροισμα των επιμέρους φθορών συνιστά τη συνολική φθορά. Αστοχία δεν επέρχεται, εφόσον η συνολική φθορά δεν υπερβεί τη μονάδα, δηλαδή όταν:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \dots + \frac{n_\nu}{N_\nu} \leq 1 \quad (3.2)$$

Στα οδοστρώματα οι φορτίσεις από τις διελεύσεις των διαφόρων αξόνων των οχημάτων προκαλούν επαναλαμβανόμενες επιπονήσεις στις στρώσεις του οδοστρώματος και στη στρώση έδρασης, και ο νόμος Miner μπορεί να εφαρμοστεί με ικανοποιητική ακρίβεια για τη μετατροπή της πραγματικής μικτής συνθέσεως κυκλοφορίας (P_i, N_i, n_i) σε "ισοδύναμη" κυκλοφορία ενός τυπικού φορτίου (P_o, N_o, n_o), η οποία προκαλεί στο οδόστρωμα την ίδια φθορά με την πραγματική κυκλοφορία.

Έτσι, αν το τυπικό φορτίο είναι P_o και οι απαιτούμενες διελεύσεις/φορτίσεις μέχρι την αστοχία είναι N_o, σύμφωνα με το "νόμο Miner" για να προκαλείται η ίδια φθορά με n_i διελεύσεις του φορτίου P_i θα πρέπει:

$$\frac{n_o}{N_o} = \frac{n_i}{N_i} \text{ και επομένως } n_o = \left(\frac{N_o}{N_i} \right) n_i \quad (3.3)$$

Από τη σχ. (3.3) προκύπτει ότι ο αριθμός των πραγματοποιούμενων διελεύσεων "n_i" του φορτίου "P_i" μετατρέπεται σε ισοδύναμες, από απόψεως φθοράς, διελεύσεις n_o του τυπικού φορτίου, αν πολλαπλασιαστεί με το λόγο N_o/N_i. Ο λόγος αυτός αποτελεί το **Συντελεστή Ισοδυναμίας (ΣΙ)**.

Η τιμή του συντελεστή ισοδυναμίας επηρεάζεται από:

- Είδος του οδοστρώματος.
 - Εύκαμπτο οδόστρωμα.
 - Ημιάκαμπτο οδόστρωμα.
 - Δύσκαμπτο οδόστρωμα.
- Παράγοντες φόρτισης του οδοστρώματος.
 - Μέγεθος αξονικού φορτίου.
 - Πίεση εφαρμογής φορτίου.
 - Διάταξη αξόνων.
 - Διάταξη τροχών.
- Χαρακτηριστικά των στρώσεων του οδοστρώματος.
 - Μηχανικά χαρακτηριστικά των στρώσεων.
 - Πάχη των στρώσεων.
- Χαρακτηριστικά τυπικού άξονα.
 - Μέγεθος του φορτίου.
 - Είδος των τροχών.
- Αστοχία του οδοστρώματος.
 - Μορφή της αστοχίας, ανάλογα με το είδος του οδοστρώματος και την εξεταζόμενη στρώση.
 - Καθορισμός της αστοχίας.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημανθεί η σημαντική διαφορά που μπορεί να υπάρχει μεταξύ των ΣΙ, που εξάγονται από μετρήσεις σε πειραματικούς δρόμους (π.χ. AASHO) με τη βοήθεια “λειτουργικών” κριτηρίων αστοχίας του οδοστρώματος (π.χ. δείκτης λειτουργικότητας), και εκείνων που εξάγονται θεωρητικά με τη βοήθεια κριτηρίων που βασίζονται σε νόμους αστοχίας υλικών (κόπωση, παραμόρφωση), λόγω της διαφοράς στα κριτήρια αστοχίας. Τα πρώτα αναφέρονται στο οδόστρωμα και θεωρούν ότι αυτό αστόχησε, όταν οι φθορές του αθροιστικά (για το σύνολο του οδοστρώματος) φθάσουν σε ένα ορισμένο επίπεδο, ενώ τα δεύτερα αναφέρονται στο υλικό της εξεταζόμενης στρώσης και θεωρούν αστοχία, όταν η ρωγμάτωση ή η παραμόρφωση φθάσει ένα ορισμένο επίπεδο. Όταν ο υπολογισμός του οδοστρώματος γίνεται με αναλυτικές μεθόδους, είναι προτιμότερο για λόγους συνέπειας οι συντελεστές ισοδυναμίας να έχουν υπολογιστεί με ανάλογες μεθόδους. Η εργασία αυτή είναι μια προσπάθεια προς την κατεύθυνση αυτή.

3.2. Αναλυτικός υπολογισμός συντελεστών ισοδυναμίας

Οι νόμοι κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων και των κατεργασμένων με υδραυλικές κόνιες αμμοχαλίκων καθώς και οι αλγόριθμοι αστοχίας της στρώσης έδρασης είναι δυνατόν να εκφραστούν [6] από τη γενική σχέση:

$$D = K \times N^{-a} \quad (\text{νόμος αστοχίας}) \quad (3.4)$$

όπου:

D είναι είτε η μέγιστη επιβαλλόμενη εφελκυστική ανηγμένη παραμόρφωση ή τάση στα πειράματα κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων ή των κατεργασμένων με υδραυλικές κόνιες υλικών αντίστοιχα, είτε η μέγιστη κατακόρυφη ανηγμένη θλιπτική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης.

N είναι οι επαναλήψεις των φορτίσεων που απαιτούνται για να προκληθεί αστοχία στο αντίστοιχο υλικό.

K, a είναι συντελεστές που εξαρτώνται από το μηχανισμό αστοχίας, τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών και τα χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης.

Η απόκριση του οδοστρώματος στις φορτίσεις από τα φορτία των οχημάτων είναι δυνατό να εκφραστεί [6] από τη γενική σχέση:

$$D_{e,\sigma} = \lambda \times (P)^b \quad (\text{νόμος απόκρισης}) \quad (3.5)$$

όπου:

$D_{e,\sigma}$ είναι είτε η μέγιστη οριζόντια ανηγμένη παραμόρφωση ή τάση που αναπτύσσεται στον πυθμένα των ασφαλτομιγμάτων ή των κατεργασμένων στρώσεων αντίστοιχα, είτε η μέγιστη κατακόρυφη ανηγμένη παραμόρφωση που αναπτύσσεται στην επιφάνεια της στρώσης έδρασης.

P είναι το φορτίο του άξονα του οχήματος.

b είναι εκθέτης που εξαρτάται από την πίεση εφαρμογής του φορτίου και τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών του οδοστρώματος.

λ είναι συντελεστής, που εξαρτάται από τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών του οδοστρώματος και από το “σύστημα” των αξόνων φόρτισης και τον αριθμό των τροχών ανά άξονα.

Για να θεωρηθεί ότι 2 ή 3 άξονες αποτελούν πολλαπλό “σύστημα”, πρέπει η απόσταση μεταξύ τους να είναι μικρότερη από 2m [7]. Τότε η εντατική ή η παραμορφωσιακή κατάσταση, που προκαλεί ο κάθε ένας άξονας χωριστά στα κρίσιμα σημεία του οδοστρώματος, επιδρά στα αντίστοιχα μεγέθη του προηγούμενου ή του επόμενου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι άξονες του συστήματος να προκαλούν στο οδόστρωμα διαφορετική φθορά από αυτή που θα προκαλούσαν, αν είχαν θεωρηθεί ανεξάρτητοι.

Η επιφάνεια επαφής του τροχού θεωρείται με ικανοποιητική προσέγγιση ως κυκλική με ακτίνα r και ομοιόμορφη πίεση p, η οποία ισούται με την εσωτερική πίεση των αεροθαλάμων. Μεταξύ του φορτίου του τροχού “Q” και των “p” και “r” θεωρείται ότι ισχύει η σχέση:

$$p\pi r^2 = Q \quad (3.6)$$

Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι στα κοινά ελαστικά μεταξύ των “p”, “Q” και “r” ισχύει [6] η εμπειρική σχέση:

$$\pi r^2 = 0.08 \times Q + 82 \quad (3.7)$$

όπου: r σε cm και Q σε kg.

Με την προϋπόθεση αυτή, εξετάζοντας τον ίδιο τύπο οδοστρώματος, ο εκθέτης “b” της σχ. (3.5) είναι ίσος για απλούς και δίδυμους τροχούς με διαφορετικά φορτία.

Ο συντελεστής ισοδυναμίας (ΣΙ) (βλ. σχ. (3.3)) είναι δυνατό να προσδιοριστεί από τις σχ. (3.4) και (3.5) ως ακολούθως:

Χρησιμοποιώντας τους δείκτες “i” και “o” για το τυχαίο φορτίο άξονα i και για το φορτίο του τυπικού άξονα “o” (φορτίο αναφοράς) από τη σχ. (3.4) προκύπτει:

$$\frac{N_o}{N_i} = \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^{1/a} \quad (3.8)$$

Δεδομένου ότι ο συντελεστής “K” απαλείφεται και ο εκθέτης “a” είναι κοινός και για τις δύο φορτίσεις.

Από τη σχ. (3.5) προκύπτει:

$$\frac{D_i}{D_o} = \frac{\lambda_i}{\lambda_o} \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^b \quad (3.9)$$

και επομένως:

$$\Sigma I = \frac{N_o}{N_i} = \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^{1/a} = \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_o} \right)^{1/a} \times \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^{b/a} \quad (3.10)$$

Εάν το σύστημα φόρτισης “i” (αριθμός αξόνων, αριθμός τροχών) είναι το ίδιο με το σύστημα “o” που θεωρείται ως τυπικό (σύστημα αναφοράς), ο παράγων $\lambda_i/\lambda_o = 1$ και η σχ. (3.7) απλοποιείται στη σχέση:

$$\Sigma I = (P_i/P_o)^{b/a} \quad (3.11)$$

Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα οι συνήθεις τιμές των a και b είναι $a \approx 0.2$ (κόπωση ασφαλτομιγμάτων) και $b \approx 0.8$, οπότε ο λόγος $b/a = 4$ και η σχ. (3.9) παίρνει τη γνωστή μορφή (νόμος τετάρτης δύναμης):

$$\Sigma I = \left(\frac{P_i}{P_o} \right)^4 \quad (3.12)$$

Όταν όμως τα συστήματα “i” και “o” δεν είναι όμοια, τότε για τον προσδιορισμό του ΣI πρέπει να υπολογιστεί ο

$$\text{λόγος} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_o} \right)^{1/a}, \text{ μέσω της σχ. (2.9) θέτοντας } P_i = P_o, \text{ οπότε}$$

προκύπτει:

$$\left(\frac{\lambda_i}{\lambda_o} \right)^{1/a} = \left(\frac{D_i}{D_o} \right)^{1/a} \quad (3.13)$$

Έτσι, για δεδομένο οδόστρωμα και συγκεκριμένες διατάξεις αξόνων/τροχών και φορτίων (i, o) είναι δυνατό να υπολογιστούν τα μεγέθη D_i και D_o και με βάση τη σχ. (3.10) να υπολογιστούν οι ΣI .

Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τυπικές κατανομές των εντατικών ή παραμορφωσιακών μεγεθών που αναπτύσσονται στις κρίσιμες θέσεις σε ένα εύκαμπτο ή ημιάκαμπτο οδόστρωμα ως συνάρτηση της οριζόντιας απόστασης από την κρίσιμη θέση X ή του χρόνου t διέλευσης του φορτίου τόσο για τον τυπικό άξονα όσο και για ένα τριπλό σύστημα αξόνων. Στην περίπτωση που ο άξονας i συμμετέχει σε πολυαπλό σύστημα αξόνων, ως D_i , μπορεί να θεωρηθεί είτε η απόλυτη τιμή του μεγέθους D_i είτε η μέγιστη διαφορά της κορυφής από την κοιλία της καμπύλης κατανομής του μεγέθους D_i^* (εύρος). Θεωρητικά θα μπορούσε να ληφθεί υπόψη ακόμη ακριβέστερα η φθορά που προκαλείται στο οδόστρωμα από τη διέλευση του συστήματος αξόνων/τροχών i , αρκεί να είναι επαρκώς γνωστός ο νόμος αστοχίας/κόπωσης του υλικού της στρώσεως που εξετάζεται. Θα μπορούσε π.χ. να ληφθεί υπόψη ολόκληρη η κατανομή του κρίσιμου μεγέθους συναρτήσει του συνολικού χρόνου φόρτισης, δηλαδή η συνολική επιβαλλόμενη ενέργεια ($\int D_i dt$). Επειδή, όμως, οι νόμοι αστοχίας/κόπωσης των υλικών δεν είναι ακόμη επαρκώς γνωστοί, στην εργασία αυτή λήφθηκε υπόψη μόνο η μέγιστη τιμή του D_i .

Επισημαίνεται, επίσης, ότι η σχ. (3.10) δεν ισχύει για τροχούς με ευρύ πέλμα (wide base), επειδή στην περίπτωση αυτή ο εκθέτης b , που εξαρτάται από τη σχέση μεταξύ φορτίου και πίεσης επαφής p , είναι διαφορετικός.

4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΧΕΣΕΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ ΓΙΑ ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΚΑΙ ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

Στο σχήμα 2 φαίνονται οι διατομές τριών εύκαμπτων και ενός ημιακάμπτου οδοστρώματος για τα οποία υπολογίστηκαν οι συντελεστές ισοδυναμίας. Τα οδοστρώματα αυτά θα μπορούσαν να θεωρηθούν ότι είναι τυπικά οδοστρώματα αυτοκινητοδρόμου με ελαφριά, μέση και βαρεία κυκλοφορία. Στο ίδιο σχήμα δίνονται, επίσης, και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των στρώσεων καθώς και τα χαρακτηριστικά του τυπικού άξονα 13t. Για λόγους σύγκρισης με τους ΣI , που προέκυψαν από το Οδικό Πείραμα AASHO, ο υπολογισμός του ΣI έγινε και με φορτίο τυπικού άξονα 8.2 t που χρησιμοποιείται κυρίως στις Η.Π.Α. Στο σχήμα 3 παρουσιάζονται, επίσης, οι συντελεστές a και SN που χρειάζονται στον υπολογισμό των ΣI κατά AASHO.

Ο αναλυτικός υπολογισμός των σχέσεων ισοδυναμίας βασίστηκε στη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στην παράγραφο 3.2 και ειδικότερα στη σχ. (3.10).

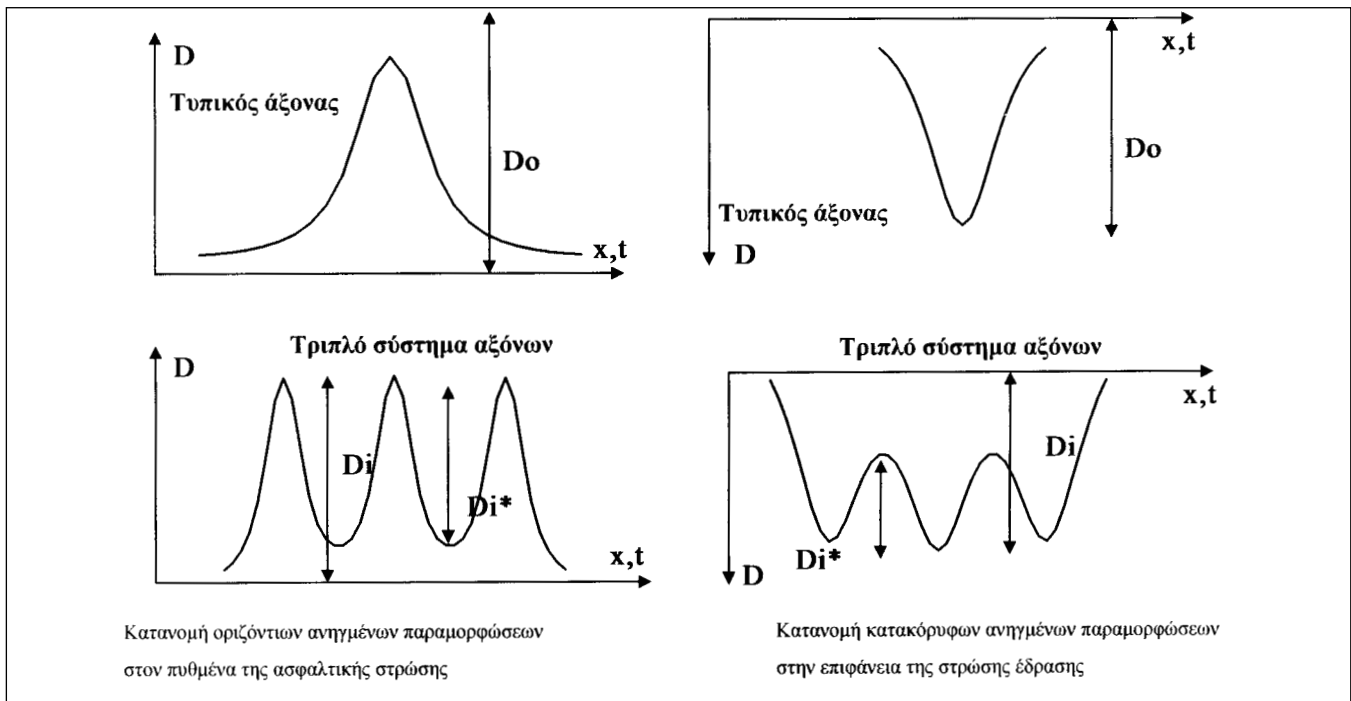
Υπολογίστηκαν σχέσεις ισοδυναμίας για τους ακόλουθους άξονες, με συνήθη μεγέθη πέλματος:

- Απλός άξονας με απλούς τροχούς.
- Άξονας με απλούς τροχούς που συνθέτει διπλό σύστημα.
- Απλός άξονας με δίδυμους τροχούς.
- Άξονας με δίδυμους τροχούς που συνθέτει διπλό σύστημα.
- Ακραίος άξονας με δίδυμους τροχούς που συνθέτει τριπλό σύστημα.
- Κεντρικός άξονας με δίδυμους τροχούς που συνθέτει τριπλό σύστημα.

Στην περίπτωση των αξόνων που συνθέτουν τριπλό σύστημα, οι σχέσεις ισοδυναμίας του κεντρικού άξονα με τον ακραίο είναι διαφορετικές, αφού τα εντατικά μεγέθη, που αναπτύσσονται εξαιτίας του κεντρικού άξονα, επαλληλίζονται με αυτά και των δύο ακραίων. Δεν εξετάστηκε η ισοδυναμία τριπλού συστήματος αξόνων με απλούς τροχούς, αφού είναι διαπιστωμένο ότι διαθέτουν είτε δίδυμους είτε τροχούς με ευρύ πέλμα.

Οι ισοδυναμίες υπολογίστηκαν για τυπικό άξονα με απλούς ή δίδυμους τροχούς, για δύο τυπικές διατομές, μία εύκαμπτου και μία ημιακάμπτου οδοστρώματος. Τα πλήρη χαρακτηριστικά των διατομών παρουσιάζονται στο σχήμα 2.

Οι συντελεστές $(\lambda_i/\lambda_o)^{1/a}$ υπολογίστηκαν από τη σχ. (3.13), αφού προηγουμένως υπολογίστηκαν οι αντίστοιχες για κάθε περίπτωση απόλυτες μέγιστες τιμές των εντατικών μεγεθών D_i και D_o . Ο υπολογισμός των εντατικών μεγεθών έγινε με το πρόγραμμα H/Y BISAR, του οποίου η μαθηματική ανάλυση βασίζεται στη μέθοδο των επάλληλων ελαστικών στρώσεων.



Σχήμα 1: Κατανομή παραμορφωσιακών μεγεθών D που αναπτύσσονται κατά τη διέλευση απλού ή τριπλού συστήματος αξόνων, συνάρτησε της οριζόντιας απόστασης x ή του χρόνου t .

Figure 1: Strain distribution (D) due to the passage of single or tridem axle, in relation to the horizontal distance " x " or the time " t ".

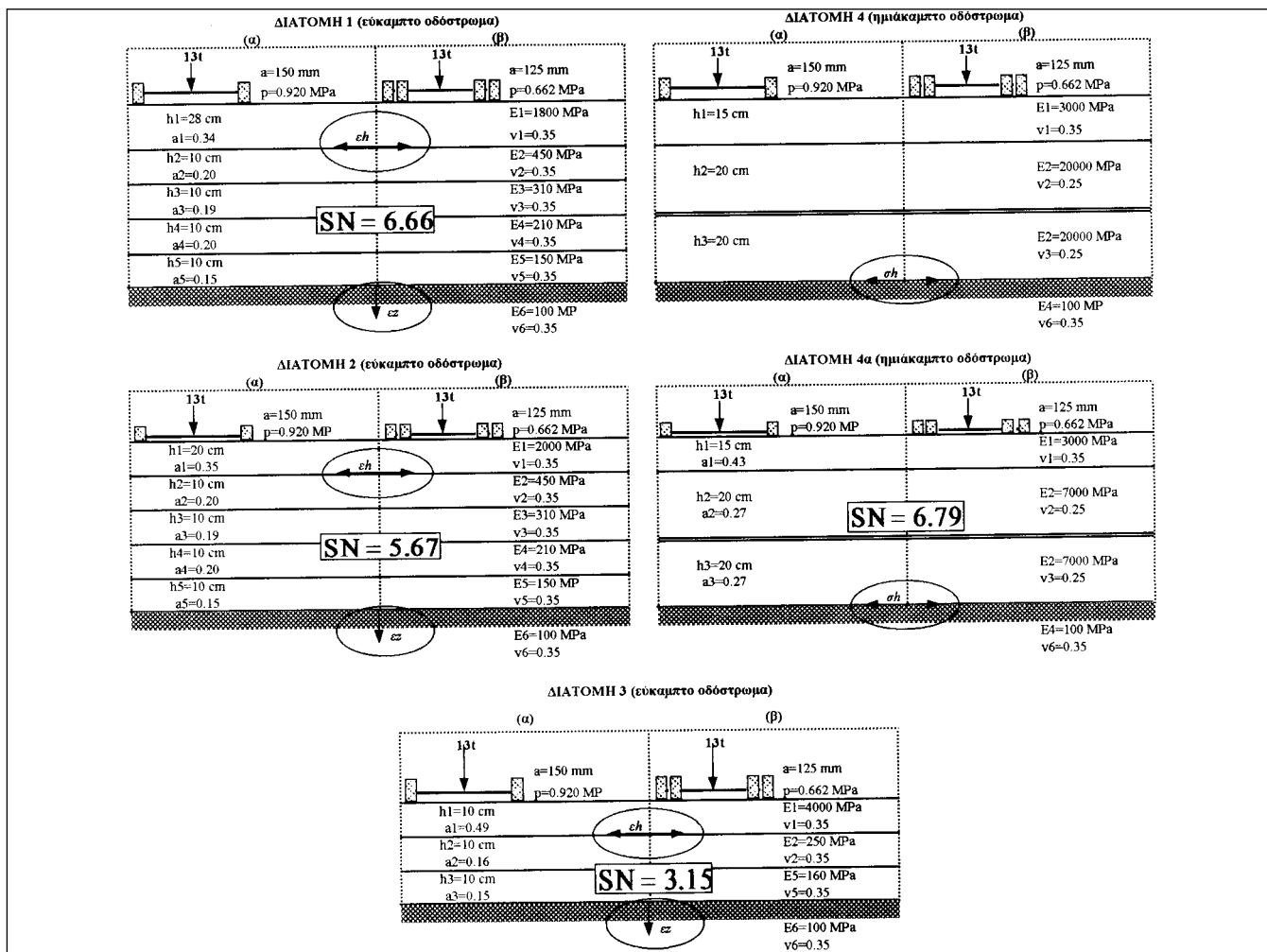
Στο πρόγραμμα BISAR εισήχθησαν:

- Τα χαρακτηριστικά των διατομών, όπως παρουσιάζονται στο σχήμα 2. Για τις διατομές 1, 2 και 3 έγινε η παραδοχή της πλήρους συνάφειας μεταξύ των στρώσεων. Για τις διατομές 4 και 4a υπολογίστηκαν οι οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις, τόσο με την παραδοχή της πλήρους συνάφειας μεταξύ των δύο στρώσεων του Κ.Θ.Α. όσο και με την παραδοχή της πλήρους ολίσθησης, και τελικά υιοθετήθηκαν οι μέσες τιμές των δύο.
- Αξονικό φορτίο $13t$.
- Η πίεση εφαρμογής του φορτίου για την περίπτωση του άξονα με απλούς τροχούς θεωρήθηκε ίση με 0.920MPa και η ακτίνα επαφής 150mm , ενώ για άξονα με δίδυμους τροχούς θεωρήθηκε ίση με 0.662MPa με ακτίνα του κύκλου επαφής 125mm .
- Για τα πολλαπλά συστήματα αξόνων, η απόσταση μεταξύ των αξόνων θεωρήθηκε ίση με 130cm , τιμή που βασίζεται σε στατιστική διαπίστωση ερευνητικού προγράμματος του Ε.Μ.Π. [9].

Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα εντατικά ή παραμορφωσιακά μεγέθη D_i και D_o , τα οποία υπολογίστηκαν ανάλογα με τον τύπο του οδοστρώματος, την κρίσιμη θέση και τον άξονα που προκαλεί την εντατική κατάσταση. Αντίστοιχα, στον πίνακα 2 παρουσιάζονται οι τελικές σχέσεις ισοδυναμίας για κάθε περίπτωση για τυπικό άξονα με απλούς τρο-

χούς και στον πίνακα 3 για τυπικό άξονα με δίδυμους τροχούς, οι οποίες υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της σχ. (3.10) για τις ακόλουθες τιμές των a και b :

- $b=0.833$, από το "νόμο απόκρισης" για συνήθεις απλούς και δίδυμους τροχούς, για τα εύκαμπτα οδοστρώματα (διατομή 1, 2, 3) [9].
- $b=1$, από το "νόμο απόκρισης" για συνήθεις απλούς και δίδυμους τροχούς, για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα (διατομές 4 και 4a) [9].
- $a=0.207$, για την κόπωση της αφαλτικής στρώσης (από εργαστηριακές μετρήσεις του "LCPC" για ελληνικά ασφαλτομίγματα) [9].
- $a=0.253$, για την αστοχία της στρώσης έδρασης (TRRL) [9].
- $a=0.083$, για την κόπωση του Κ.Θ.Α. [9].
- Στους πίνακες 1-3 η ένδειξη του βέλους υποδεικνύει τον άξονα για τον οποίο υπολογίστηκε το μέγεθος D ή η σχέση ισοδυναμίας. Οι αναγραφόμενες σχέσεις ισοδυναμίας αναφέρονται στη συμβολή κάθε άξονα χωριστά. Έτσι π.χ. για την περίπτωση απλών τροχών και κόπωσης της ασφαλτικής στρώσης (πίνακας 2), διέλευση ενός συστήματος διπλών αξόνων (φορτίο κάθε άξονα P_i) με απλούς τροχούς ισοδυναμεί με $(2 \times 1.18) (P_i/P_o)^4$ διελεύσεις τυπικού άξονα P_o . Ομοίως, διέλευση ενός συστήματος τριπλών αξόνων (φορτίο κάθε άξονα P_i) ισοδυναμεί με $(2 \times 0.19 + 0.13) (P_i/P_o)^4 = 0.51 (P_i/P_o)^4$ διελεύσεις τυπικού απλού άξονα P_o .



Σχήμα 2: Διατομές και μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών των οδοστρώματων, για τα οποία υπολογίστηκαν οι σχέσεις ισοδυναμίας.
Figure 2: Pavement structure and material properties.

5. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΩΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ ΟΔΙΚΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ AASHO

Ο υπολογισμός έγινε με τη βοήθεια των εμπειρικών σχέσεων ισοδυναμίας που εξήχθησαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων του Οδικού Πειράματος AASHO:

$$\log\left(\frac{W_{t18}}{W_{t18}}\right) = 4.79 \log(18+1) - 4.79 \log(L_x + L_2) + 4.33 \log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (5.1)$$

$$G_t = \log \frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5} \quad (5.2)$$

$$\beta = 0.40 + \frac{0.08(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN + 1)^{5.19}} \quad (5.3)$$

όπου:

W_{tx} είναι ο αριθμός των διελεύσεων του αξονικού φορτίου x

στον χρόνο t .

W_{t18} είναι ο αριθμός των διελεύσεων του τυπικού απλού άξονα φορτίου 18-kip με δίδυμους τροχούς.

L_x είναι το φορτίο σε kips.

L_2 είναι ο κωδικός των αξόνων = 1 για απλό, = 2 για διπλό, = 3 για τριπλό άξονα.

$SN = a_1 h_1 + a_2 h_2 + a_3 h_3$ (δείκτης δομικής αντοχής).

p_t είναι ο δείκτης λειτουργικότητας στο χρόνο t κατά τον οποίο θεωρείται ότι το οδόστρωμα πρέπει να ανακαινισθεί.

Οι συντελεστές a_1 , a_2 και a_3 υπολογίστηκαν με βάση τις σχετικές οδηγίες [10] και δίνονται στο σχήμα 2. Ειδικότερα για την περίπτωση του ημιακάμπτου οδοστρώματος, με τις οδηγίες δεν είναι δυνατό να υπολογιστούν τιμές a_2 , οι οποίες να αντιστοιχούν στις υψηλές τιμές του μέτρου ελαστικότητας "E" των κατεργασμένων στρώσεων Κ.Θ.Α. της διατομής 4. Για το λόγο αυτό οι ΣΙ υπολογίστηκαν για τη διατομή 4a, η οποία περιλαμβάνει στρώση με μειωμένη τιμή του μέτρου ελαστικότητας $E=7000$ MPa.

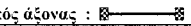
Πίνακας 1: Μέγιστα παραμορφωσιακά και εντατικά μεγέθη.
Table 1: Maximum strains and stresses.

Μέγιστα παραμορφωσιακά και εντατικά μεγέθη "D" (Φορτίο / άξονα 13t)								
Είδος άξονα Κρίσιμη θέση	Πυθμένας ασφαλτικής στρώσης Οριζόντια αν. παραμόρφωση "eh" (X10E-4)			Κορυφή στρώσης έδρασης Κατακόρυφη αν. παραμόρφωση "ez" (X10E-3)			Πυθμένας Κ.Θ.Α. Οριζόντια τάση "sh" (MPa)	
	Διατομή 1	Διατομή 2	Διατομή 3	Διατομή 1	Διατομή 2	Διατομή 3	Διατομή 4	Διατομή 4α
	1.68	2.45	4.26	-0.281	-0.391	-1.16	0.535	0.356
	1.75	2.48	4.26	-0.303	-0.407	-1.16	0.637	0.403
	1.33	1.77	3.15	-0.256	-0.334	-0.847	0.464	0.303
	1.21	1.67	3.11	-0.275	-0.348	-0.835	0.509	0.307
	1.09	1.58	3.02	-0.295	-0.362	-0.824	0.604	0.351
	1.19	1.66	3.07	-0.275	-0.346	-0.835	0.530	0.313

Πίνακας 2: Σχέσεις ισοδυναμίας ως προς τυπικό άξονα με απλούς τροχούς.

Table 2: Relationships for determining ESAL factors in case of standard axle with single wheels.

$$A = \frac{P_1}{P_s}$$

ΣΧΕΣΕΙΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ Τυπικός άξονας : 								
Εξεταζόμενη Είδος άξονα φοβρά	Κόπωση της Ασφαλτικής Στρώσης			Αστοχία της Στρώσης Έδρασης			Κόπωση Κ.Θ.Α.	
	Διατομή 1	Διατομή 2	Διατομή 3	Διατομή 1	Διατομή 2	Διατομή 3	Διατομή 4	Διατομή 4α
	A^4	A^4	A^4	$A^{3.3}$	$A^{3.3}$	$A^{3.3}$	A^{12}	A^{12}
	$1.18 \times A^4$	$1.06 \times A^4$	A^4	$1.36 \times A^{3.3}$	$1.17 \times A^{3.3}$	$A^{3.3}$	$8.12 \times A^{12}$	$4.43 \times A^{12}$
	$0.32 \times A^4$	$0.21 \times A^4$	$0.14 \times A^4$	$0.68 \times A^{3.3}$	$0.54 \times A^{3.3}$	$0.29 \times A^{3.3}$	$0.18 \times A^{12}$	$0.14 \times A^{12}$
	$0.20 \times A^4$	$0.16 \times A^4$	$0.21 \times A^4$	$0.93 \times A^{3.3}$	$0.63 \times A^{3.3}$	$0.28 \times A^{3.3}$	$0.54 \times A^{12}$	$0.17 \times A^{12}$
	$0.13 \times A^4$	$0.12 \times A^4$	$0.19 \times A^4$	$1.21 \times A^{3.3}$	$0.74 \times A^{3.3}$	$0.26 \times A^{3.3}$	$4.29 \times A^{12}$	$0.83 \times A^{12}$
	$0.19 \times A^4$	$0.15 \times A^4$	$0.21 \times A^4$	$0.91 \times A^{3.3}$	$0.62 \times A^{3.3}$	$0.28 \times A^{3.3}$	$0.89 \times A^{12}$	$0.21 \times A^{12}$

Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι λόγω της εμπειρικής προέλευσης των σχέσεων αυτών, η απόκρισή τους σε όλο το εύρος των τιμών SN και p δεν είναι όπως θα αναμενόταν, αν η προέλευση των σχέσεων στηριζόταν σε θεωρητικό φυσικό μοντέλο. Ιδιαίτερα αυτό φαίνεται για μεγάλες σχετικές τιμές του p_1 . Στο σχ. 3 φαίνεται η μεταβολή του δείκτη ισοδυναμίας ΣΙ κατά AASHO (W_{18}/W_8) ως συνάρτηση του SN για διάφορες τιμές του p_1 για διπλό άξονα με δίδυμους τροχούς φορτίου 12t και 20t. Είναι φανερό ότι οι συντελεστές ισοδυναμίας είναι ανεξάρτητοι της τιμής του SN για $p_1=1.5$ και πρακτικά για μικρές τιμές του p_1 μέχρι περίπου 2.5. Παρατηρείται, επίσης, για τα φορτία που εξετάζονται ότι: α) για φορ-

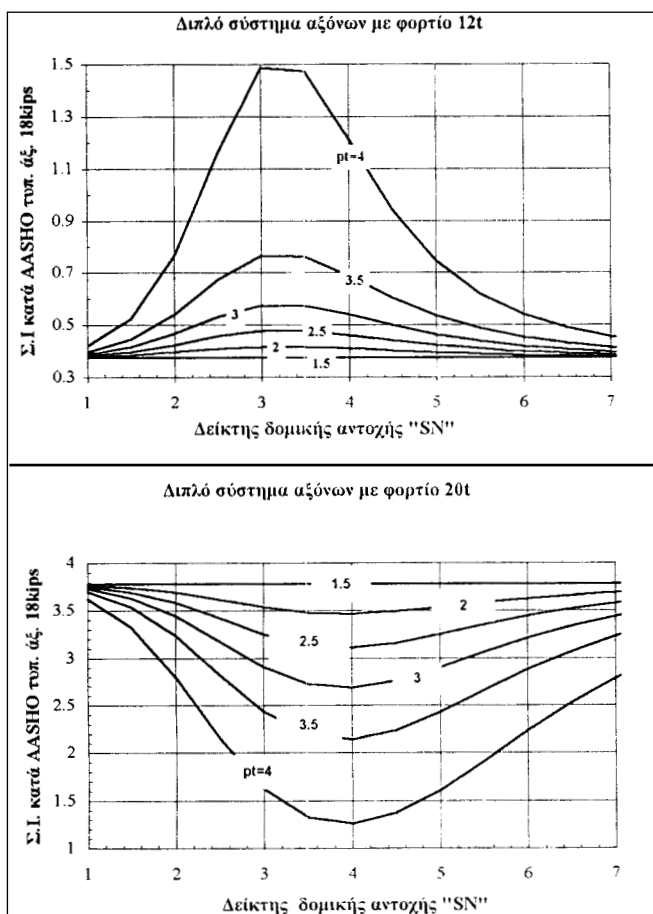
τίο μικρότερο του τυπικού φορτίου ο ΣΙ παρουσιάζει μέγιστη τιμή για SN=3, μετά την οποία ελαττώνεται, β) για φορτίο μεγαλύτερο του τυπικού ο ΣΙ παρουσιάζει ελάχιστο για τιμή του SN=4, μετά την οποία αυξάνει. Στις μεταβολές αυτές του ΣΙ δεν μπορεί να δοθεί άμεση φυσική εξήγηση και ορισμένες από αυτές είναι αντίθετες από τις μεταβολές που αναμένονται με βάση τη δομική συμπεριφορά των οδοστρωμάτων. Είναι φανερό ότι η σχέση (5.1) του AASHO δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε τιμή SN και για τιμές p_1 μεγαλύτερες του 3. Επομένως, για περιπτώσεις οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμων ή άλλων οδοστρωμάτων, για τα οποία κρίνεται σκόπιμο να επιλεγεί τελική κατάσταση λει-

Πίνακας 3: Σχέσεις ισοδυναμίας ως προς τυπικό άξονα με δίδυμους τροχούς.

Table 3: Relationships for determining ESAL factors in case of standard axle with twin wheels.

$$A = \frac{P_i}{P_o}$$

ΣΧΕΣΕΙΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΙΑΣ								
Τυπικός άξονας : 								
Εξεταζόμενη φθορά Είδος άξονα	Κόπωση της Ασφαλτικής Στρώσης			Αστοχία της Στρώσης Έδρασης			Κόπωση Κ.Θ.Α.	
	Διατομή 1	Διατομή 2	Διατομή 3	Διατομή 1	Διατομή 2	Διατομή 3	Διατομή 4	Διατομή 4α
	$3.09 \times A^4$	$4.81 \times A^4$	$4.30 \times A^4$	$1.45 \times A^{3.3}$	$1.86 \times A^{3.3}$	$3.47 \times A^{3.3}$	$5.52 \times A^{12}$	$6.92 \times A^{12}$
	$3.74 \times A^4$	$5.10 \times A^4$	$4.30 \times A^4$	$1.96 \times A^{3.3}$	$2.18 \times A^{3.3}$	$3.47 \times A^{3.3}$	$44.83 \times A^{12}$	$30.65 \times A^{12}$
	A^4	A^4	A^4	$A^{3.3}$	$A^{3.3}$	$A^{3.3}$	A^{12}	A^{12}
	$0.63 \times A^4$	$0.76 \times A^4$	$0.94 \times A^4$	$1.33 \times A^{3.3}$	$1.18 \times A^{3.3}$	$0.95 \times A^{3.3}$	$3.00 \times A^{12}$	$1.17 \times A^{12}$
	$0.39 \times A^4$	$0.58 \times A^4$	$0.82 \times A^4$	$1.75 \times A^{3.3}$	$1.37 \times A^{3.3}$	$0.90 \times A^{3.3}$	$23.67 \times A^{12}$	$5.74 \times A^{12}$
	$0.59 \times A^4$	$0.73 \times A^4$	$0.88 \times A^4$	$1.33 \times A^{3.3}$	$1.15 \times A^{3.3}$	$0.95 \times A^{3.3}$	$4.93 \times A^{12}$	$1.48 \times A^{12}$



Σχήμα 3: Μεταβολή του ΣΙ σε σχέση με τις τιμές SN και pt, για διπλό σύστημα αξόνων με φορτίο α) 12t και β) 20t.

Figure 3: Variation of the ESAL factors vs SN and pt, for tandem axle of a) 12t and b) 20t.

τουργικότητας $p_i \geq 3.0$, η χρήση των ΣΙ των σχέσεων AASHO πρέπει να γίνεται με προσοχή και στο σημείο αυτό κρίνεται αναγκαία μια σχετική διερεύνηση. Άλλοι περιορισμοί για τη χρήση των σχέσεων AASHO είναι ότι με αυτές δεν παρέχεται η δυνατότητα διάκρισης μεταξύ δίδυμων τροχών και απλών τροχών, όπως επίσης δεν είναι δυνατόν να ληφθεί υπόψη η μεγάλη ακαμψία των στρώσεων από κατεργασμένα με υδραυλικές κόνιες υλικά, όπως προβλέπεται από τις προδιαγραφές πολλών ευρωπαϊκών χωρών [7, 9].

6. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1. Αναλυτικές σχέσεις ισοδυναμίας

1. Οι δίδυμοι τροχοί είναι ευμενέστεροι από τους απλούς τροχούς (πίνακας 2 ή 3) για όλες τις περιπτώσεις τύπου οδοστρώματος ή αστοχίας στρώσης (ασφαλτικής, Κ.Θ.Α. ή στρώσης έδρασης). Το γεγονός ότι ο αριθμός των τροχών “με ευρύ πέλμα” συνεχώς αυξάνει εις βάρος των δίδυμων τροχών δημιουργεί την επείγουσα ανάγκη έρευνας σχετικά με τους ΣΙ των αξόνων που διαθέτουν τροχούς με το πέλμα αυτό.

2. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα

- Τα συστήματα αξόνων (διπλοί ή τριπλοί άξονες) με δίδυμους τροχούς είναι ευμενέστερα σε σύγκριση με δύο ή τρεις ανεξάρτητες διελεύσεις των αντίστοιχων απλών αξόνων, για την περίπτωση της αστοχίας της ασφαλτικής στρώσης. Έτσι π.χ. για τη διατομή 2 και για τυπικό άξονα επί δίδυμων τροχών μία διέλευση τριπλού άξονα με φορτίο κάθε άξονα P_i ισοδυναμεί με $(2 \times 0.73 + 0.58)(P_i/P_o)^4 = 2.04(P_i/P_o)^4$ διελεύσεις τυπικού

άξονα με δίδυμους τροχούς, έναντι $3(P_i/P_o)^4$, που ισοδυναμούν τρεις ανεξάρτητες διελεύσεις του απλού άξονα με δίδυμους τροχούς. Αντίθετα, τα συστήματα αξόνων με απλούς τροχούς προκαλούν την ίδια ή λίγο μεγαλύτερη φθορά στην ασφαλτική στρώση, σε σύγκριση με δύο ή τρεις ανεξάρτητες διελεύσεις των αντίστοιχων απλών αξόνων (βλ. πίνακα 2).

- Για την περίπτωση αστοχίας της στρώσης έδρασης η σύγκριση γίνεται περισσότερο πολύπλοκη, διότι εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της φόρτισης και τη δυσκαμψία του οδοστρώματος. Γενικά συγκρίνοντας πολλαπλά συστήματα αξόνων, με απλούς άξονες επί ομοίου είδους τροχών, ο ΣΙ αυξάνει, όσο η ακαμψία του οδοστρώματος είναι μεγαλύτερη (διατομές 3, 2, 1).

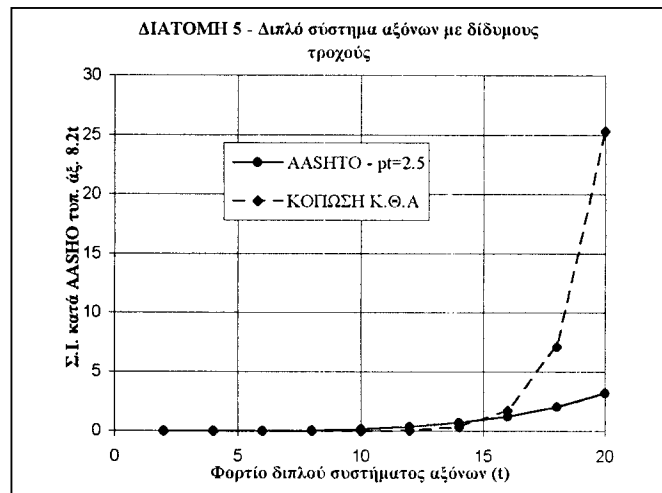
3. Για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα

Οι τιμές των ΣΙ και ιδιαίτερα η τιμή 12 του εκθέτη δείχνουν πόσο ευαίσθητα είναι τα οδοστρώματα αυτά σε φορτία μεγαλύτερα από P_o και πόσο μικρή είναι η επιρροή των φορτίων, όσο αυτά είναι μικρότερα από P_o . Τα συστήματα αξόνων είναι γενικά δυσμενέστερα από τους απλούς άξονες. Οι διαφορές αυτές πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην ανάλυση των μετρήσεων της κυκλοφορίας (υπολογισμός δεικτών φθοράς).

6.2. Σύγκριση ΣΙ που προκύπτουν με αναλυτική μέθοδο με εκείνους του AASHO

Στα σχήματα 5 και 6 συγκρίνονται οι ΣΙ, που προκύπτουν με αναλυτικές μεθόδους υπολογισμού, με εκείνους που προκύπτουν από τις σχέσεις AASHO. Η σύγκριση γίνεται με αναγωγή σε ισοδύναμες διελεύσεις τυπικού άξονα 8.2t με δίδυμους τροχούς για συστήματα διπλών αξόνων με δίδυμους τροχούς (σχ. 5) ή με απλούς τροχούς (σχ. 6) για τελική τιμή $p_f=2.5$. Είναι φανερό ότι για δίδυμους τροχούς οι διαφορές δεν είναι σημαντικές (<30%) και οι ΣΙ του AASHO βρίσκονται συνήθως μεταξύ των τιμών που προκύπτουν για κόπωση των ασφαλτικών στρώσεων και εκείνων για αστοχία της στρώσης έδρασης, όπως θα έπρεπε να αναμένεται, αφού ο δείκτης εξυπηρετικότητας αντανακλά τη συνολική απόκριση του οδοστρώματος. Αυτό θεωρείται ιδιαίτερα ενδιαφέρον σε ό,τι αφορά στην αξιοπιστία των αναλυτικών μεθόδων και των σχετικών αλγορίθμων αστοχίας που λήφθηκαν υπόψη στον υπολογισμό.

Αντιθέτως, η σύγκριση για την περίπτωση των απλών τροχών δείχνει σημαντικές διαφορές. Οι διαφορές αυτές θα πρέπει να αποδοθούν, στο μεγαλύτερο ποσοστό τους, σε αδυναμία του εμπειρικού αλγορίθμου AASHO να συμπεριλάβει όλες τις περιπτώσεις φόρτισης. Στην αδυναμία των αλγορίθμων AASHO να λάβουν υπόψη τους την επιρροή των μεγάλης ακαμψίας στρώσεων από Κ.Θ.Α. θα μπορούσε



Σχήμα 4: Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών και των εμπειρικών (AASHO) σχέσεων υπολογισμού των ΣΙ διπλών αξόνων με δίδυμους τροχούς, για μια διατομή ημικάμπτου οδοστρώματος.

Figure 4: Comparison between analytical and empirical determination of ESAL factors for tandem axles with twin wheels, for semi-rigid pavement structure.

επίσης να αποδοθεί και η σημαντική διαφορά που παρατηρείται και για την περίπτωση των οδοστρωμάτων που περιλαμβάνουν στρώσεις από Κ.Θ.Α. για φόρτιση με δίδυμους τροχούς (βλ. σχήμα 4).

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

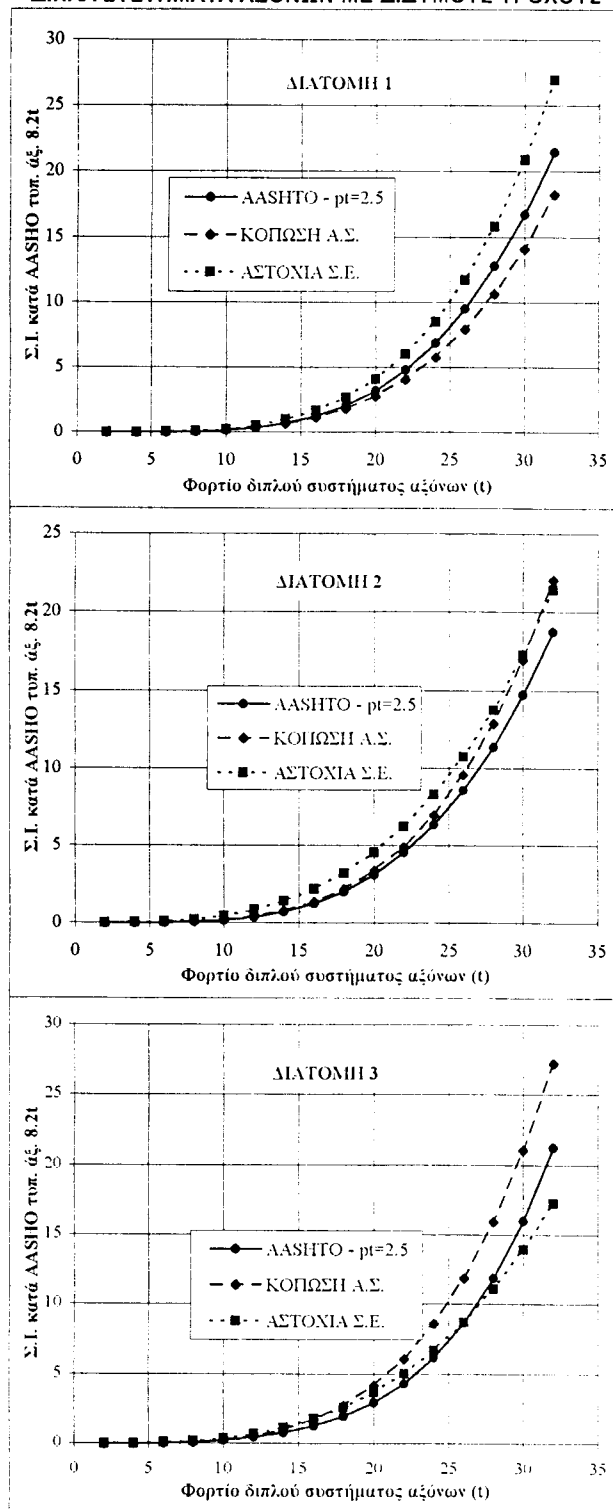
Τα ακόλουθα γενικά συμπεράσματα προκύπτουν από τα παραπάνω εκτεθέντα:

1. Οι αλγόριθμοι υπολογισμού των ΣΙ AASHO έχουν περιορισμένη ισχύ τόσο ως προς την τελική τιμή του δείκτη εξυπηρετικότητας, που θα ληφθεί υπόψη ($p_f=1.5$ έως 3.0), όσο και ως προς τη μορφή της φόρτισης (δίδυμοι τροχοί, διπλοί άξονες) και το είδος του οδοστρώματος (εύκαμπτα οδοστρώματα με όχι μεγάλο πάχος ασφαλτικών στρώσεων). Δεν λαμβάνεται επίσης επαρκώς υπόψη η μεγάλη δυσκαμψία των στρώσεων από Κ.Θ.Α.

2. Οι αναλυτικές μέθοδοι υπολογισμού παρέχουν τη δυνατότητα καθορισμού ΣΙ για οποιαδήποτε μορφή φόρτισης και διάφορα είδη οδοστρωμάτων, με την προϋπόθεση ότι οι νόμοι αστοχίας των υλικών είναι επαρκώς τεκμηριωμένοι. Οι πίνακες 2 και 3 παρέχουν τη δυνατότητα υπολογισμού των ΣΙ για 3 τυπικά πάχη οδοστρωμάτων.

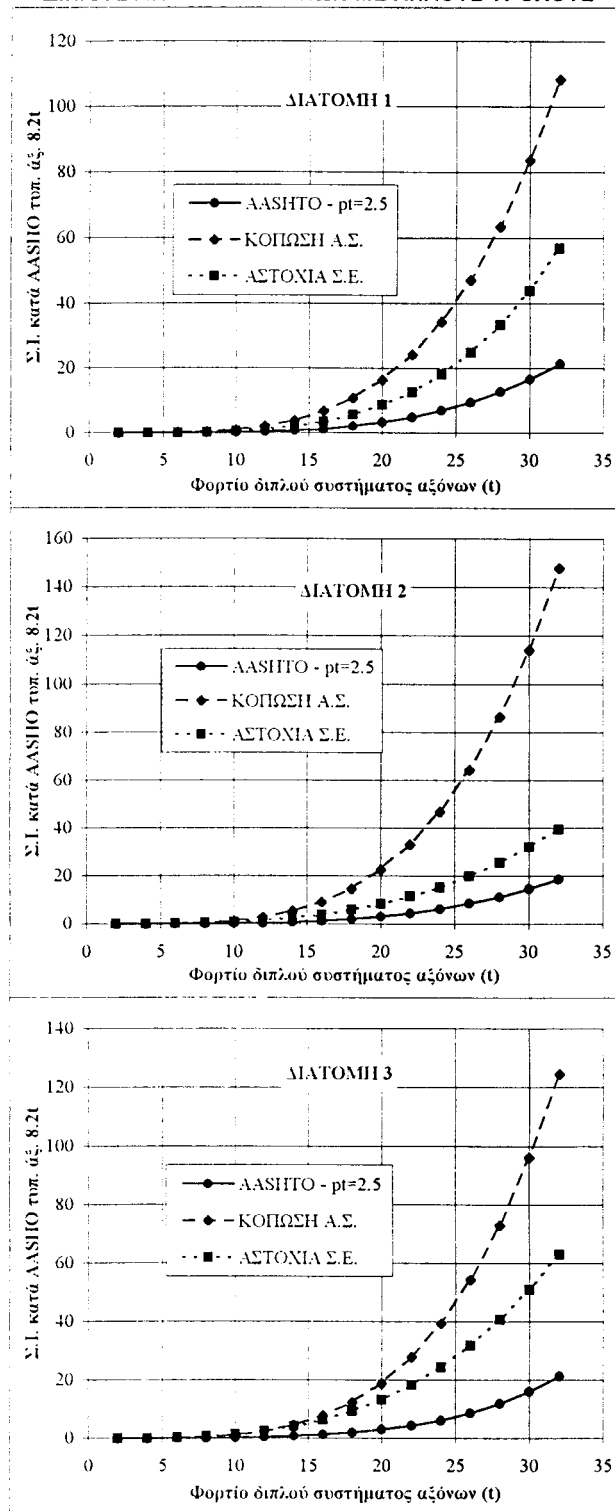
3. Τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα έχουν ΣΙ σημαντικά διαφορετικούς από εκείνους των ευκάμπτων οδοστρωμάτων και αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διαστασιολόγηση [9] των οδοστρωμάτων αυτών. Τα φορτία των αξόνων, που είναι μεγαλύτερα από το τυπικό φορτίο και επομένως και από το επιτρεπόμενο όριο, προκαλούν σημαντικά μεγαλύτερη φθορά στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα από τη φθορά που

ΔΙΠΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΟΝΩΝ ΜΕ ΔΙΔΥΜΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ



Σχήμα 5: Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών και των εμπειρικών (AASHTO) σχέσεων υπολογισμού των ΣΙ διπλών αξόνων με δίδυμους τροχούς, για τρεις διατομές ενκάμπτων οδοστρωμάτων.
Figure 5: Comparison between analytical and empirical determination of ESAL factors for tandem axles with twin wheels, for 3 flexible pavement structures.

ΔΙΠΛΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΞΟΝΩΝ ΜΕ ΑΠΛΟΥΣ ΤΡΟΧΟΥΣ



Σχήμα 6: Σύγκριση μεταξύ των αναλυτικών και των εμπειρικών (AASHTO) σχέσεων υπολογισμού των ΣΙ διπλών αξόνων με απλούς τροχούς, για τρεις διατομές ενκάμπτων οδοστρωμάτων.
Figure 6: Comparison between analytical and empirical determination of ESAL factors for tandem axles with single wheels, for 3 flexible pavement structures.

προκαλούν στα εύκαμπτα οδοστρώματα, ενώ τα φορτία, που είναι μικρότερα από το τυπικό φορτίο, προκαλούν σχεδόν ασήμαντη φθορά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Τριανταφυλλίδου Μ., Δέλλης Δ., Κόλιας Στ., “Μέτρηση φορτίων εμπορικών οχημάτων και υπολογισμός δεικτών φθοράς στο εθνικό δίκτυο”, **διπλωματική εργασία, Εργαστήριο Οδοποιίας ΤΜΣΥ/ΕΜΠ**, Αθήνα, 1987.
2. Κόλιας Στ., Τριανταφυλλίδου Μ., Δέλλης Δ., “Καταγραφή και ανάλυση της βαρείας κυκλοφορίας στις ΝΕΟ Αθήνας-Πάτρας και Αθήνας - Λάρισας”, **Ερευνητικό Πρόγραμμα ΤΕΟ- ΕΜΠ**, 1989.
3. Μίντσης Γ., Τσώχος Γ., Νικολαΐδης Α., “Καταγραφή και ανάλυση της βαρείας κυκλοφορίας στις ΝΕΟ Κατερίνης - Ευζώνων και Θεσσαλονίκης - Καβάλας”, **Ερευνητικό Πρόγραμμα ΤΕΟ, ΤΑΤΜ - ΑΠΘ**, 1989.
4. Μίντσης Γ. Τσώχος Γ., Νικολαΐδης Α., Ταξιλάκης Χ., “Καταγραφή και ανάλυση της βαρείας κυκλοφορίας στις ΝΕΟ Κατερίνης - Ευζώνων, Κήπων-Κρυσταλλοπηγής και Θεσσαλονίκης - Καβάλας”. **Ερευνητικό Πρόγραμμα ΤΕΟ, ΤΑΤΜ - ΑΠΘ**, 1992.
5. Μίντσης Γ., Ταξιλάκης Χ., “Καταγραφή και ανάλυση της βαρείας κυκλοφορίας στις ΝΕΟ Λάρισας - Κατερίνης, Καβάλας - Ξάνθης, Θεσσαλονίκης - Γιαννιτσών και Θεσσαλονίκης - Σερρών”, **Ερευνητικό Πρόγραμμα ΤΕΟ, ΤΑΤΜ - ΑΠΘ**, 1995.
6. OECD, “Heavy trucks, climate and pavement damage”, **Road Transport Research**, Paris, 1988.
7. LCPC, SETRA, “Conception et Dimensionnement des Structures de Chaussée”, **Guide Technique**, 1994.
8. Κόλιας Στ., “Καταγραφή και ανάλυση της βαρείας κυκλοφορίας στο εθνικό δίκτυο. Εγκατάσταση μόνιμων σταθμών μέτρησης βάρους αξονικών φορτίων”, **Ερευνητικό Πρόγραμμα ΥΠΕΧΩΔΕ-ΕΜΠ**, Τελική Έκθεση, 1994.
9. Κόλιας Στ., Λοΐζος Α., Κυρκιλή Ε., “Υπολογισμός ευκάμπτων και ημιακάμπτων οδοστρωμάτων”, **Ερευνητικό Πρόγραμμα ΥΠΕΧΩΔΕ-ΕΜΠ**, Τελική Έκθεση, 1992.
10. **AASHTO**, “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures” August 1986.

Σ. Κόλιας,

Αναπληρωτής καθηγητής Ε.Μ.Π., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Μεταφορών & Συγκοινωνιακής Υποδομής, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 157 73 Ζωγράφου, Αθήνα.

Κ. Βλάχος,

Πολιτικός μηχανικός Ε.Μ.Π., Δαγκλή 12, 151 21 Πεύκη, Αθήνα.

Extended summary

Critical Appreciation of the Axle Load Equivalencies in Road Pavement Damage

S. KOLIAS

Associate Professor N.T.U.A.

C. VLACHOS

Civil Engineer N.T.U.A.

Abstract

In this work the derivation of the commercial vehicle axle load equivalency factors is presented and discussed. The derivation was based on Miner's law and was carried out according to the analytical/mechanistic design methods for three flexible pavements and one semirigid pavement typical for highway construction. The analytically derived equivalency factors are compared with those derived by the AASHO Road Test algorithms and the limitations as well as the differences are discussed.

In order to take into consideration traffic loading in pavement design it is necessary to introduce the concept of load equivalency. Although this is not absolutely necessary for the analytical/mechanistic design methods, since in these methods the different loads can be considered separately, the concept of equivalency greatly simplifies the work. In addition, the estimation of the traffic for the design period, the monitoring of the changes that are taking place and the derivation of traffic guide values for different road classes are greatly facilitated by the introduction of this concept.

The load equivalency concept is based on Miner's law (3.1 to 3.3) and the associated load equivalency factors are derived from the relationship 3.4, which defines the failure criterion of the pavement materials (fatigue for the bound materials or accumulation of permanent deformation for the subgrade materials), and from the relationship 3.5, which defines pavement response to loading. In addition, the relationships 3.6 and 3.7 are considered to hold.

In the above relationships N is the number of load repetitions to failure, D (see fig. 1) defines the stresses or strains induced by the loading at the critical points of the pavement layer (depending on the failure criterion). The subscripts "i" and "o" are used for the axle load P_i and for the reference axle load P_o as well as for all the associated stresses, strains, load repetitions etc. By using eqs 3.4 and 3.5 the load equivalency factor N_o/N_i defined by the eq. 3.3 is given by eq. 3.10. In this relationship the factors λ depend on the type of loading (single or dual wheels, single, tandem or tridem axles) as well as on the mechanical characteristics of the pavement layers

and the materials from which they are constructed. The factor "a" depends on the failure criterion and the material characteristics (slope of the fatigue line or of the deformation line in respect to load repetitions for bound materials and soils respectively) and the factor "b" on the material response to the type of loading. For flexible pavements ($a \approx 0.2$ and $b \approx 0.8$) and for same type of axle loading eq. 3.10 is reduced to the well known "4th power" relationship 3.12.

In this work the axle load equivalency factors were derived for three flexible and one semi-rigid pavement structures typical for highway pavements, fig. 2. As reference axle load (standard axle load) a 13t axle load with single or dual tires was considered. For this purpose eqs 3.10 and 3.13 were used and the strains and stresses at the critical points of the pavements, which are necessary for the determination of the equivalency factors, were computed using the BISAR programme and are given in table 1.

Tables 2 and 3 present the derived relationships for the determination of the equivalency factors for 13t standard axle load on single (table 2) and dual tires (table 3) for various types of axles with single, tandem or tridem axles on single or dual tires. It can be seen that in all cases dual tires have a less damaging effect than the single tires. The increasing number of "wide base" single tires substituting for the normal dual tires is therefore causing an urgent need for a special study.

For flexible pavements, the axle systems (tandem or tridem) have a less damaging effect than single axles in the case of fatigue failure of the asphalt layers, while in the case of subgrade failure (deformation failure), the comparison becomes more complex because of the interactions of layer thickness (rigidity) and loading geometry. In the latter case it is better to examine each case separately.

For the semi-rigid pavements the exponent 12 shows the importance of the axle load value on the damage incurred by this type of pavements. This has a double effect; low loads cause negligible damage, while loads higher than the stan-

dard load cause very great damage. The latter has great significance as far as the loads greater than the legal limit are concerned, implying that there is a need for effective vehicle axle load control in order to avoid premature failure of this type of pavements. Axle systems (tandem or tridem axles) are in general more damaging than single axles, especially the more rigid the bound layers are.

From the above analysis it can generally be concluded that in order to derive average damage factors (ESALS/Commercial vehicle) the analysis of traffic data should be very detailed and should also take into account representative pavement structures and all the major loading geometries of modern commercial vehicles.

Figure 3 shows the dependence of the AASHO Road Test Equivalency factors on the value of the terminal serviceability, p_t , and on the structural number SN. It can be seen that there are cases in which this dependence is not consistent with the expected behaviour of the pavement model and can therefore be considered as erratic. This could be attributed to the statistical nature of the derivation of the AASHO algorithms.

In figs 5 and 6 the equivalency factors determined by the mechanistic method are compared to those determined using the AASHO algorithms. It can be seen that when the comparison is based on 8.2t standard axle load with dual tires the differences are insignificant (fig. 5) while this is not true when the same axle load on single tires is taken as standard (fig. 6). This is attributed to the fact that the AASHO algorithms cannot distinguish dual tires and single tires. It is estimated that this may quickly become a rather serious shortcoming, since the use of wide base single tires is rapidly expanding. Another shortcoming of the AASHO algorithms is that the high modulus of elasticity values of the cement bound granular materials ($E > 7000$ MPa), used in various European countries, cannot be taken into consideration (fig. 4).

S. Kolias,

Associate professor N.T.U.A., Faculty of Civil Engineering, Dept. of Transportation Planning and Engineering, 5 Iroon Polytechniou str., 157 73 Zografou, Athens.

C. Vlachos,

Civil engineer N.T.U.A., 12 Dagli str., 151 21 Pefki, Athens.