

Κατασκευή οδών

Διάλεξη 08 : Στοιχεία θεωρίας και επανάληψη

Ζωή Χριστοφόρου

Δομή μαθήματος

Θεωρία (1/2)

1. Εισαγωγή στα οδοστρώματα
2. Έλεγχοι φέρουσας ικανότητας εδάφους
3. Φορτία οχημάτων
4. Στατική ελαστική ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων
5. Σχεδιασμός εύκαμπτων οδοστρωμάτων
6. Στατική ελαστική ανάλυση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Δομή μαθήματος

Θεωρία (2/2)

7. Σχεδιασμός δύσκαμπτων οδοστρωμάτων
8. Ασφαλτικά υλικά
9. Αδρανή υλικά
10. Σύνθεση ασφαλτικού σκυροδέματος
11. Κατασκευή στρώσεων
12. Φθορές οδοστρωμάτων

Δομή μαθήματος

1. Ασφαλτικά υλικά
2. Αδρανή
3. Επανάληψη

Ασφαλτικά υλικά

Τύποι

- Καθαρή άσφαλτος
- Ασφαλτικά διαλύματα
(άσφαλτος και διαλύτες)
- Ασφαλτικά γαλακτώματα
(άσφαλτος και νερό)

Υπόλειμμα διύλησης αργού πετρελαίου

Ψυχρό κλίμα: μαλακή άσφαλτος

Θερμό κλίμα: σκληρή άσφαλτος

Χαρακτηριστικά ασφάλτου

Βάθος στο οποίο διεισδύει μέσα στη μάζα αυτής πρότυπη βελόνα υπό την πίεση βάρους **100 gr** που ενεργεί κάθετα επί χρόνο **5sec** και σε θερμοκρασία **25°C**.

- 40/50 δηλαδή διείσδυση 4 με 5 mm
- **80/100 Ελλάδα**
- 180/200

Δοκιμές ασφάλτου

1. Διεισδυτικότητα
2. Υγρασίας (έως 0,5%)
3. Μάλθωσης (σε περίπτωση αύξησης θερμοκρασίας)
4. Ολκιμότητας (αντοχή σε εφελκυσμό)
5. Δοκιμή τέφρας (βαθμός καθρότητας)
6. Απώλειας βάρους σε υψηλές θερμοκρασίες

Δοκιμές ασφάλτου

7. Διαλυτότητας σε οργανικούς διαλύτες
8. Ανάφλεξης
9. Γαλάκτωσης (καταλληλότητα για παρασκευή γαλακτωμάτων)
10. Εκχύλισης (ποσοτικός προσδιορισμός της ασφάλτου στα 'εν θερμώ' παραγόμενα ασφατικά μείγματα οδοστρωσίας)
11. Ποιοτικές προδιαγραφές κάθε Κράτους

Ποιοτικές προδιαγραφές Ελλάδας για άσφαλτο

οπου (+) είναι το μέγιστο όριο και (-) το ελάχιστο όριο.

- Σημείο ανάφλεξης (°C): 230+
- Διεισδυτικότητα σε 25°C: 80-100
- Σημείο μάλθωσης: (°C): 44-53
- Δείκτης διείσδυσης (PI): -1, +0, 7
- Ολκιμότητα 25°C (cm): 100+
- Διαλυτότητα σε διθειάνθρακα (%): 99.5+
- Διαλυτότητα σε τετραχλωράνθρακα (%): 99+
- Τέφρα % κατά βάρος: 0.5-
- Απώλεια βάρους μετά από θέρμανση 5ωρη, σε 163°C (%): 1-
- Διεισδυτικότητα μετά από θέρμανση, % της αρχικής: 80+
- Θερμοκρασία εφαρμογής (°C): 150-185 (διάχυση), 150-165 (ανάμειξη)

Ασφαλτικές επαλείψεις - τύποι

1. Προεπάλειψη
2. Συγκολλητική επάλειψη
3. Απλή, διπλή ή πολλαπλή επάλειψη



Ασφαλτικές επαλείψεις - σκοποί

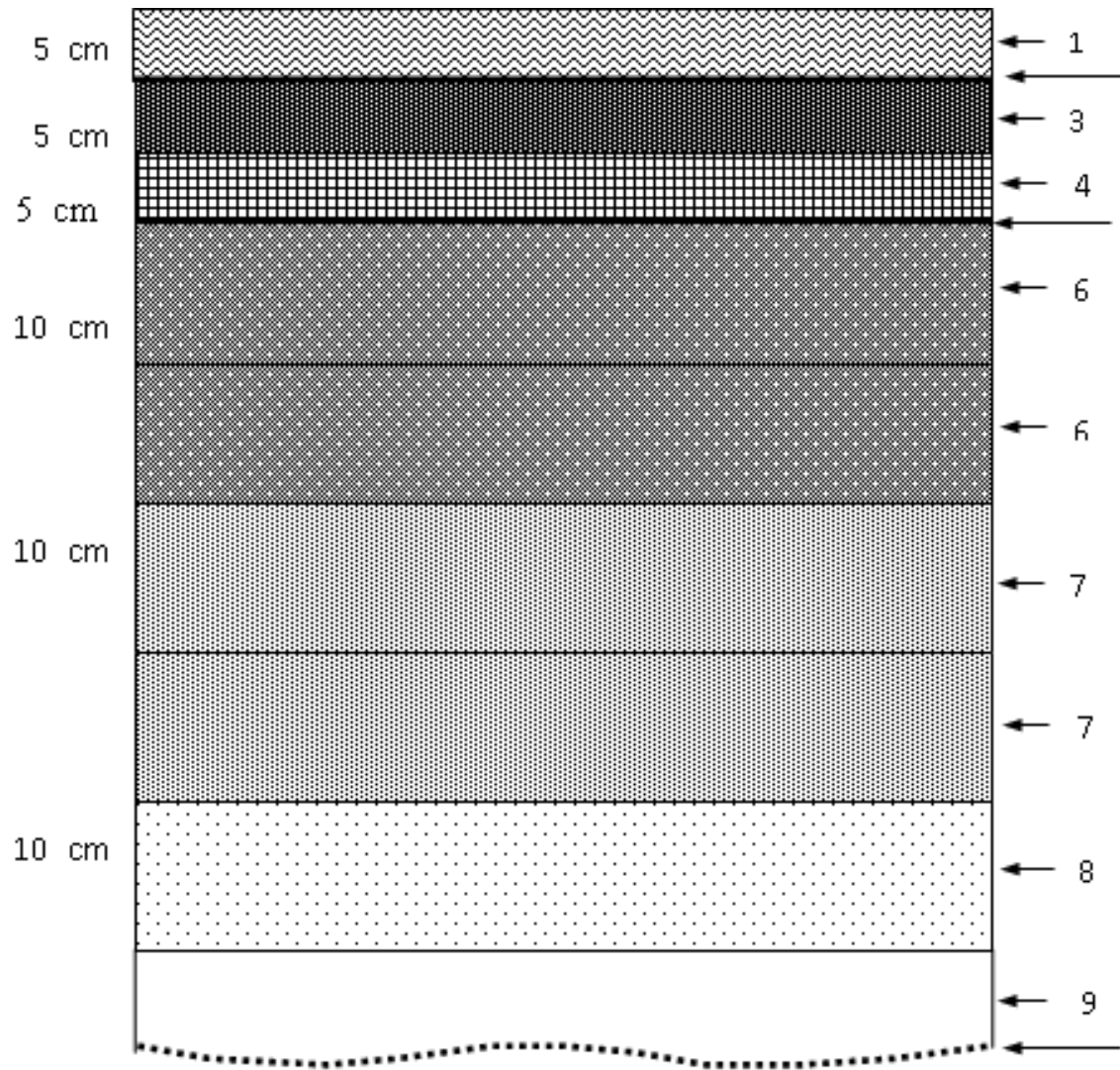
1. Αδιαβροχοποίηση των αδρανών υλικών βάσης του οδοστρώματος.
2. Συγκόλληση και συνεργασία παλαιάς με νέα ασφαλτική κατασκευή.
3. Βελτίωση παλαιάς ασφαλτικής κατασκευής που έχει υποστεί φθορές ή ρηγματώσεις.
4. Δημιουργία βατής επιφάνειας οδού σε όλες τις εποχές του έτους με μικρή δαπάνη, σε περιπτώσεις ελαφριάς και μέσης κυκλοφορίας.
5. Συντήρηση προσωρινά κατά τη διάρκεια του χειμώνα των βάσεων με αδρανή υλικά, όταν δεν είναι δυνατή η ολοκλήρωση της κατασκευής.
6. Σφράγιση των επιφανειακών κενών στα ημιεμποτισμένα σκυρωτά και στους ασφαλτικούς τάπητες ανοικτής σύνδεσης.
7. Κατασκευή αντιολισθηρών επιφανειών κύλισης.

Ασφαλτικό σκυρόδεμα

Ασφαλτικά υλικά + Αδρανή

Ανώτερες στρώσεις

1. Στρώσεις βάσης στις κατώτερες στρώσεις της ασφαλτικής ζώνης.
2. Στρώσεις κυκλοφορίας στις ανώτερες στρώσεις της ασφαλτικής ζώνης.
3. Συνδετική στρώση που παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο προηγούμενων.



Τυπική διατομή εύκαμπτου (ΥΠΕΧΩΔΕ)

1. Αντιολισθηρή στρώση κυκλοφορίας πάχους 5 cm της Π.Τ.Π. Α-265.
2. Ασφαλτική συγκολλητική επάλειψη.
3. Ασφαλτική συνδετική στρώση (ισοπεδωτική) πάχους 5 cm της Π.Τ.Π. Α-265
4. Ασφαλτική στρώση βάσης πάχους 5 cm της Π.Τ.Π. Α-260.
5. Ασφαλτική προεπάλειψη ανασφάλτωσης βάσης.
6. Βάση από θραυστό υλικό λατομείου συμπιεσμένου πάχους 10 cm της Π.Τ.Π. Ο-155.
7. Βάση από θραυστό υλικό λατομείου συμπιεσμένου πάχους 10 cm της Π.Τ.Π. Ο-150.
8. Στραγγιστική στρώση συμπιεσμένου πάχους 10 cm
9. Ισοπεδωτική στρώση υπόβασης από φυσικό ή θραυστό αμμοχάλικο.
10. Στάθμη χωματουργικών εργασιών.

Τυπικά πάχη δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

Κατηγορία	Πάχος πλάκας(cm)	Τσιμέντο (kg/m ³)	Θλίψη (kg/cm ²)	Κάμψη (kg/cm ²)
Αυτοκινητόδρομοι	22-24	350	450	55
Οδοί με βαριά κυκλοφορία	24	350	450	55
Οδοί με μέση κυκλοφορία	20	300	300	40
Οδοί οικισμών	15	300	300	40
Κοινοτικές οδοί	15	300	300	40
Αγροτικές οδοί	12-15	300	300	40
Οδοστρώματα Ελαφρά	25	350	450	55
αεροδρομίων Μεσαία	35	350	450	55
Βαριά	45	350	450	55

Αδρανη υλικά

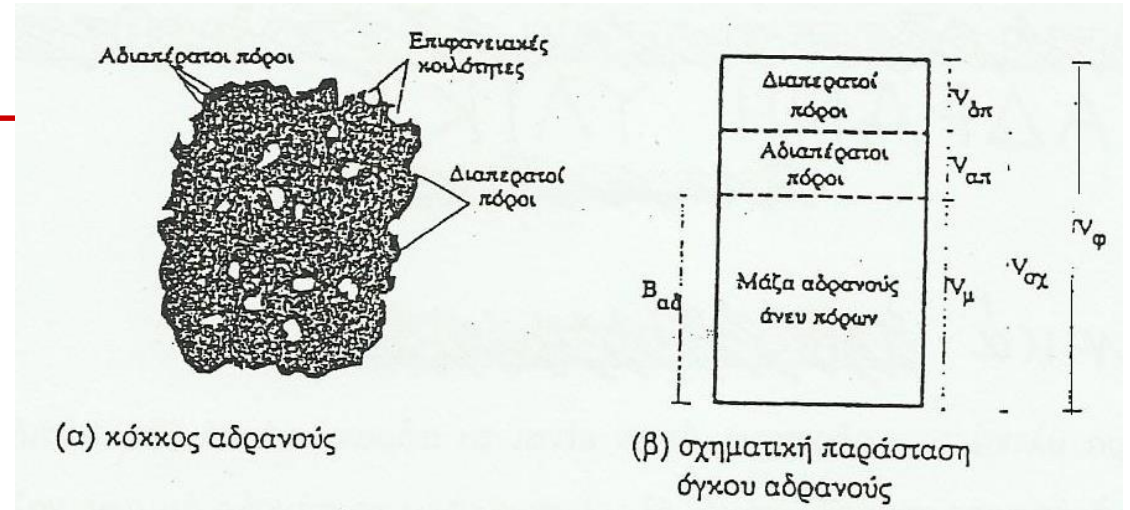
= δεν αντιδρούν χημικά με τις διάφορες συγκολλητικές ύλες

Το σύνολο **άμμων, χαλίκων και λίθων** ανόργανης σύστασης, φυσικής ή τεχνητής προέλευσης, τα οποία χρησιμοποιούνται είτε αυτούσια (υποβάσεις, βάσεις, στραγγιστικές στρώσεις), είτε με κάποιο συγκολλητικό μέσο για τον σχηματισμό καταλλήλων μιγμάτων για τις διάφορες κατασκευές.

Συγκολλητικό μέσο = τσιμέντο ή άσφαλτος

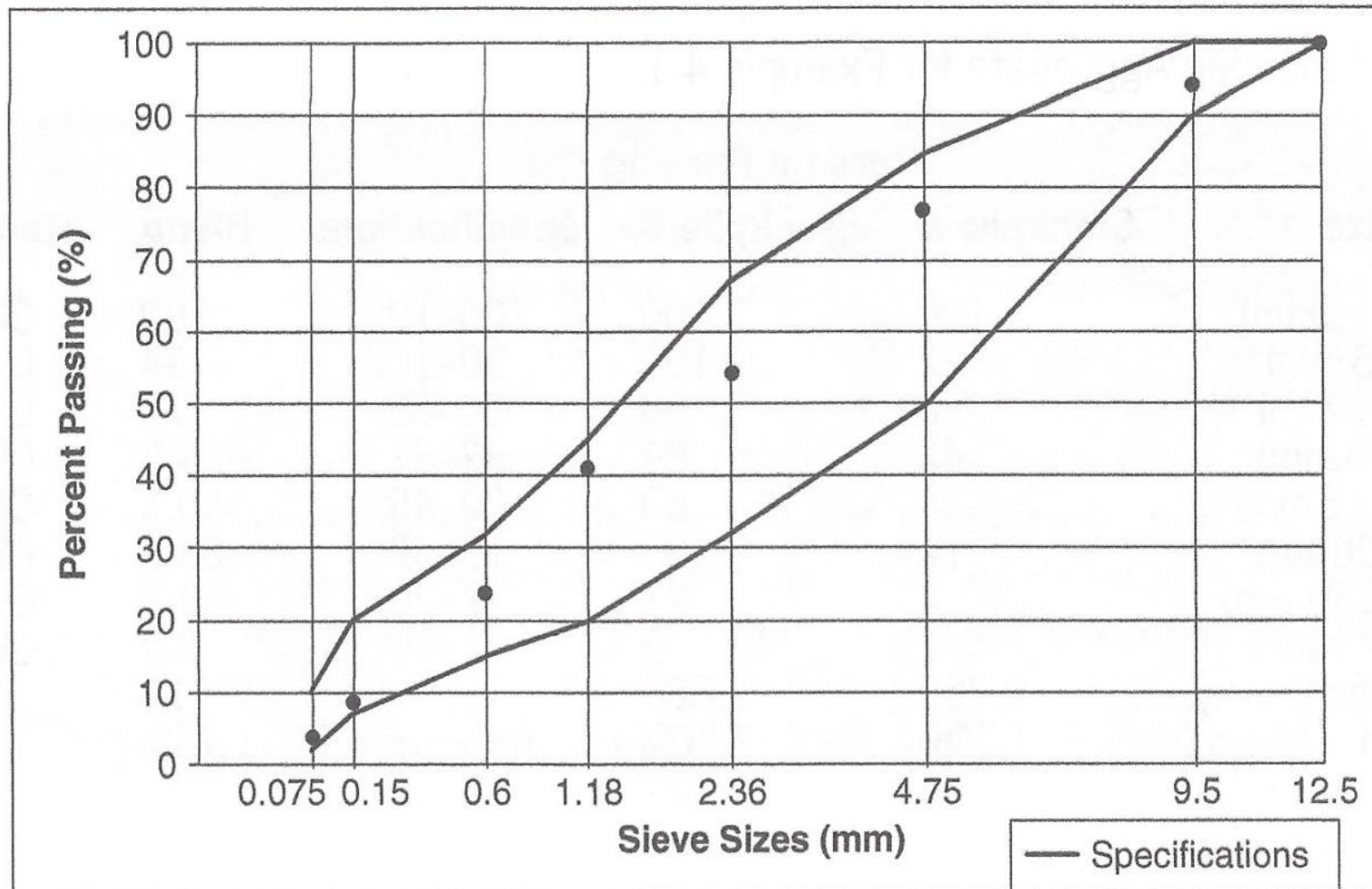
Έλεγχοι αδρανών υλικών

1. Έλεγχοι βάρους και πυκνότητας
2. Έλεγχοι καθαρότητας
3. Έλεγχοι σκληρότητας και ανθεκτικότητας
4. Ποιοτικοί έλεγχοι (μη καταστροφικοί)



Παράδειγμα ελέγχου αδρανών

Κοκκομετρική διαβάθμιση



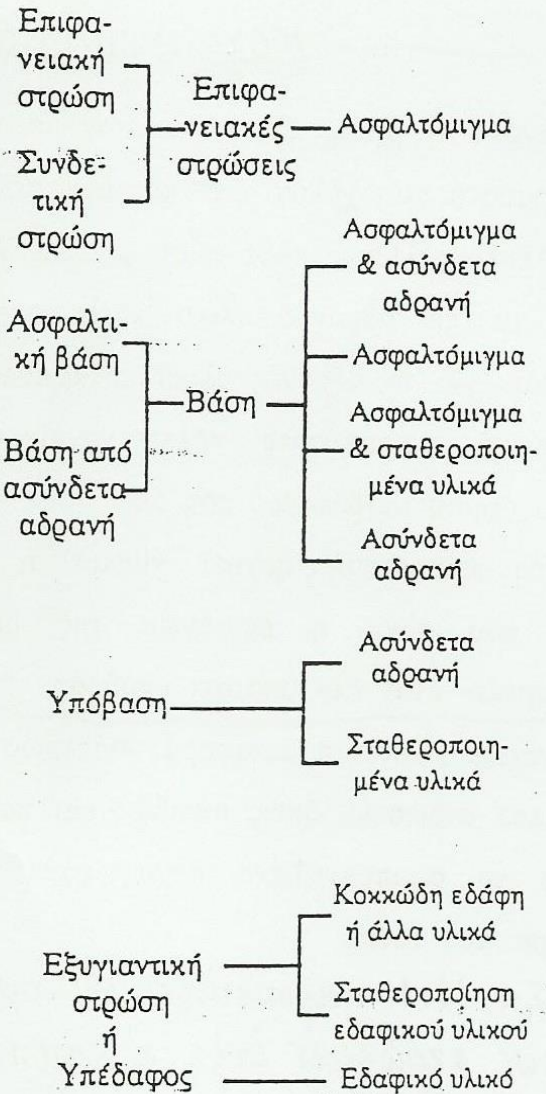
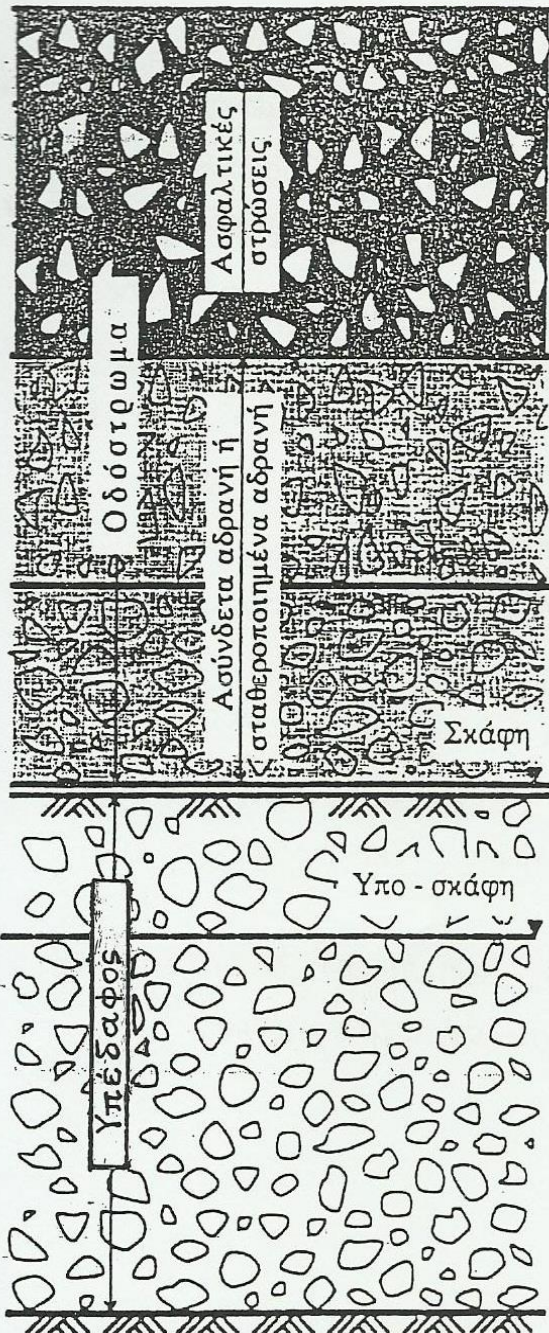
Διάμετρος κοσκίνων

Αποκόλληση αδρανών



Λείανση επιφανειακών αδρανών



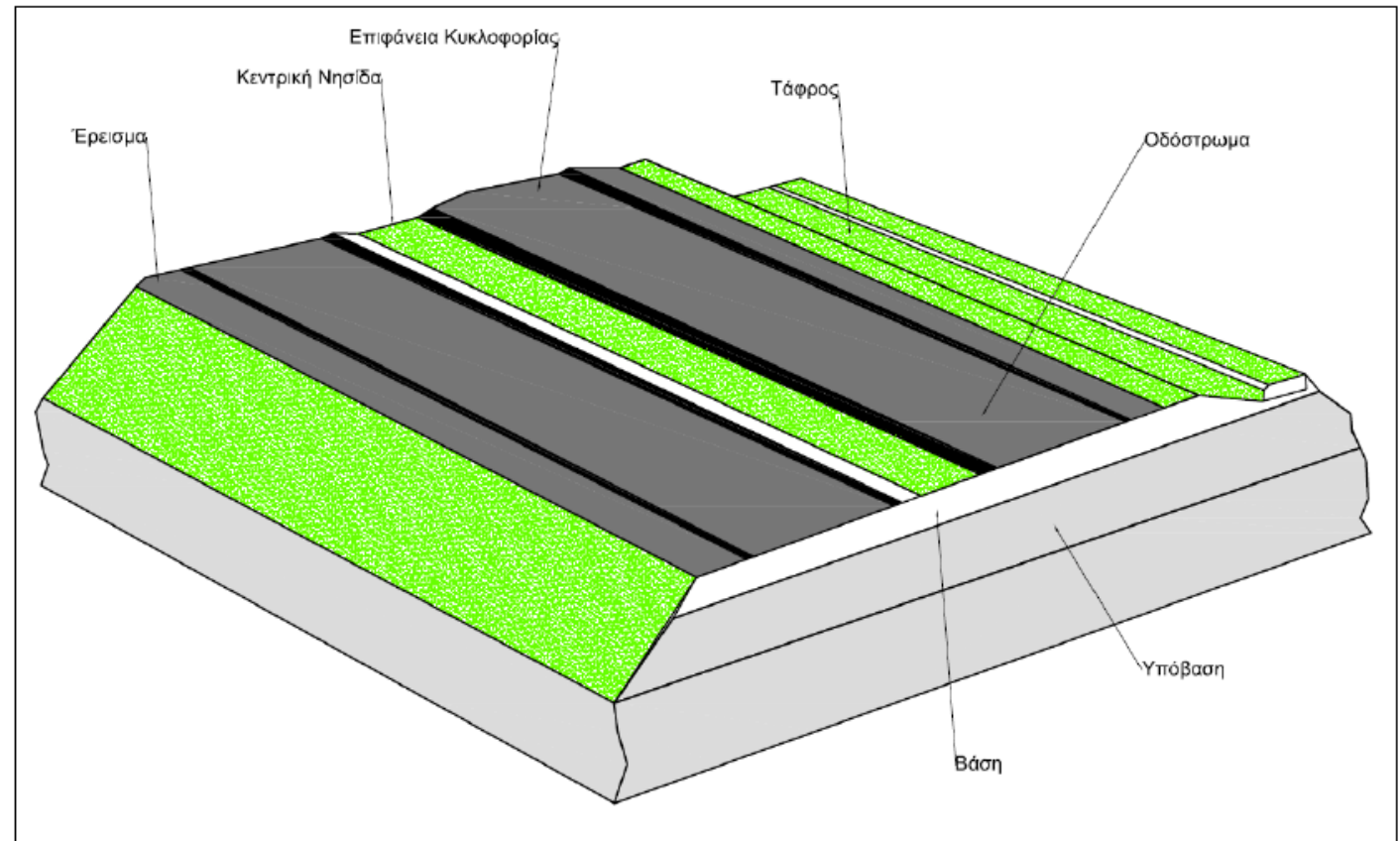
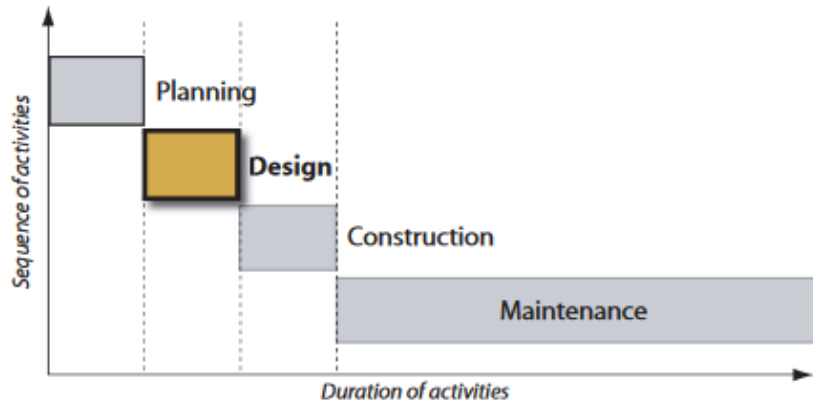


Υλικά σταθεροποιημένου τύπου

Θραυστό αμμοχάλικο από ποτάμια, χείμαρρους κλπ. ή θραυστό υλικό από κατάλληλους λίθους κάθε φύσης που έχει σταθεροποιηθεί με άργιλο ή τσιμέντο.

Επανάληψη

Σύνδεση με μάθημα χάραξης



Παράγοντες και κριτήρια επιλογής τύπου οδοστρώματος 1/2

1. Μέγεθος φορτίων (απλά οχήματα, φορτηγά, ειδικές διελεύσεις). Σύνθεση κυκλοφορίας
2. Επαναληψιμότητα φορτίων (αστικό, περιαστικό). Πυκνότητα κυκλοφορίας
3. Κλιματολογικές συνθήκες (βροχοπτώσεις, παγετός, παγετός-τήξη, υγρασία-ξηρασία, θερμοκρασιακές μεταβολές)
4. Ποιότητα και κόστος των υλικών (διαθεσιμότητα, μεταφορά)

Παράγοντες και κριτήρια επιλογής τύπου οδοστρώματος 2/2

5. Χρόνος ζωής – ανθεκτικότητα
6. Λειτουργικότητα: θόρυβος, συνάφεια τροχού οδοστρώματος
7. Κόστος συντήρησης
8. Αισθητικά: Ένταξη στο δομημένο περιβάλλον, χρώμα και φωτεινότητα
9. Περιβαλλοντικά: Ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση των υλικών

Κατανομή φορτίων σε οδοστρώματα

1. Καταφόρυφα φορτία
2. Οριζόντια φορτία (φρενάρισμα)

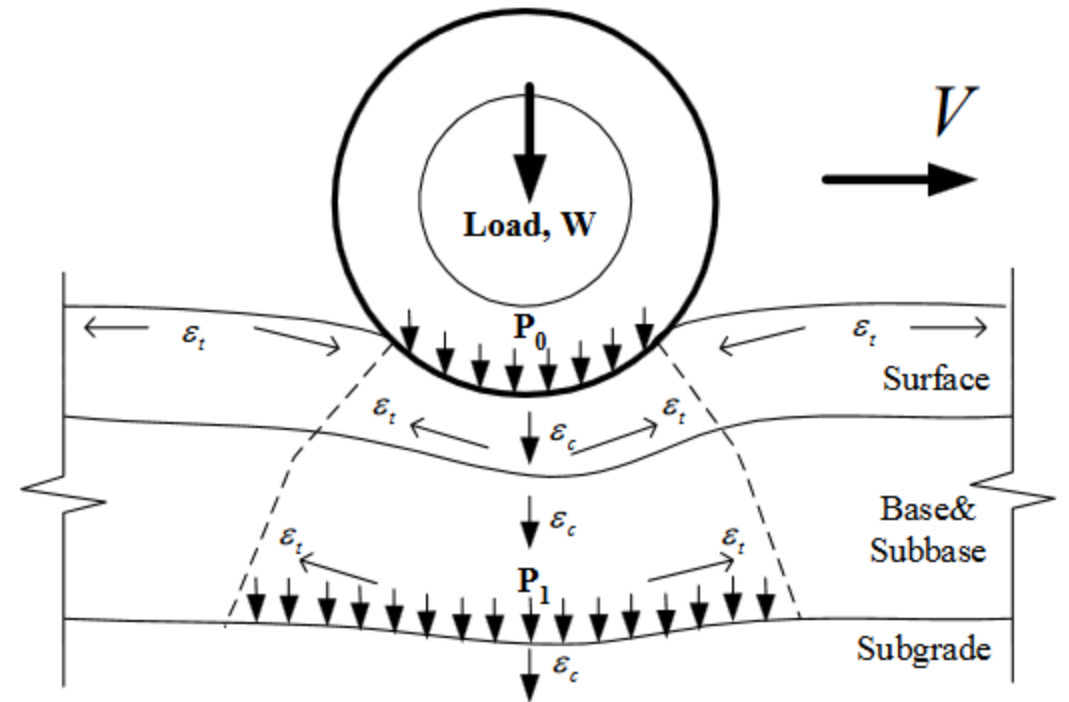
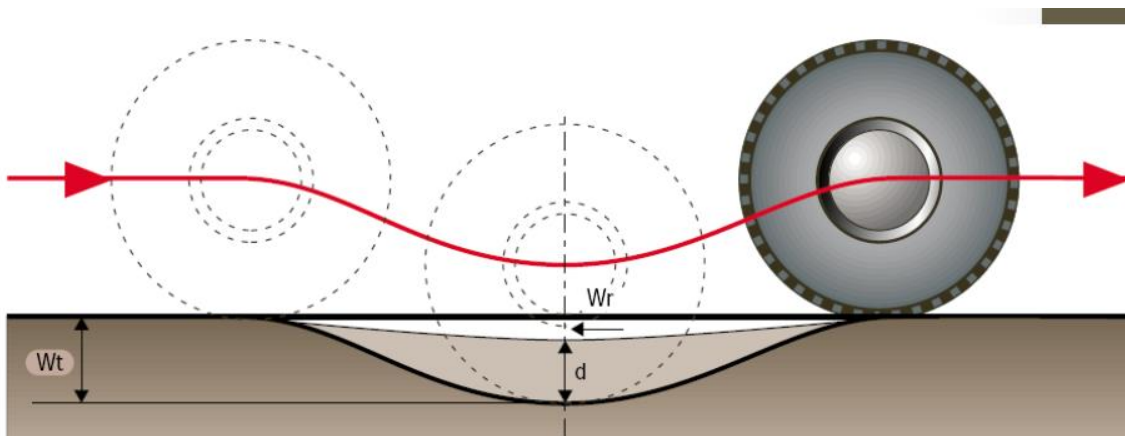
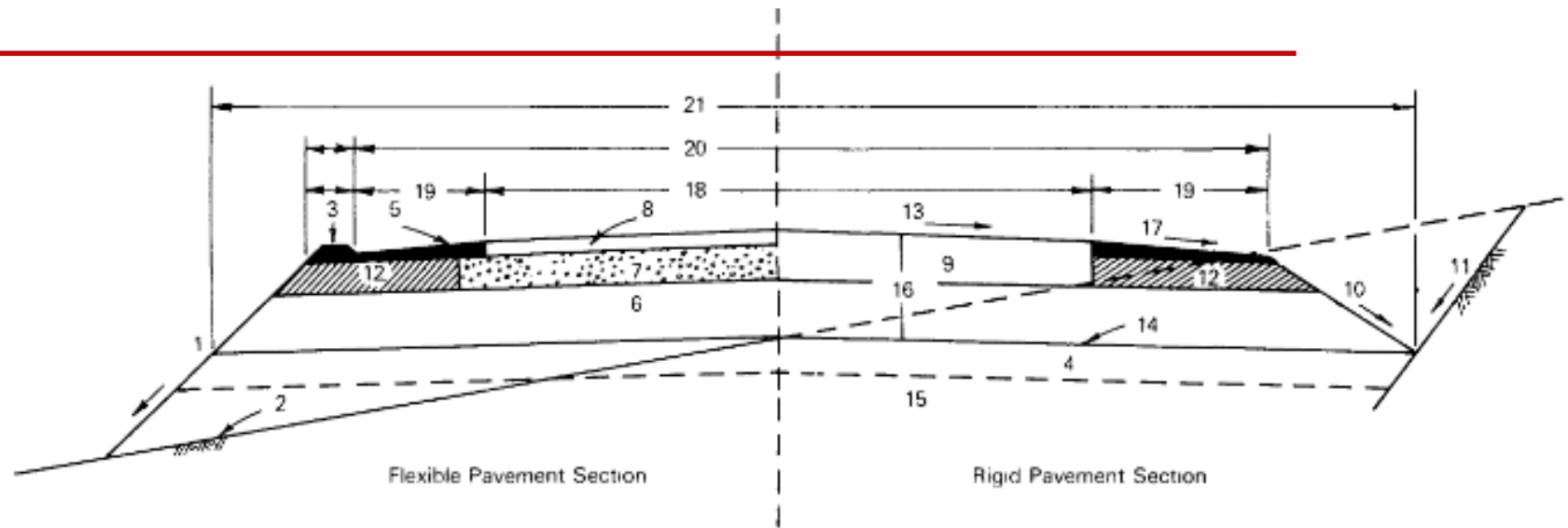


Figure 1 Responses at critical locations in a pavement

Chen et al (2010) *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.8, 2010

Εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα



- | | |
|-------------------------------------------|-------------------------|
| 1 - FILL SLOPE | 12 - SHOULDER BASE |
| 2 - ORIGINAL GROUND | 13 - CROWN SLOPE |
| 3 - DIKE | 14 - SUBGRADE |
| 4 - SELECTED MATERIAL OR PREPARED ROADBED | 15 - ROADBED SOIL |
| 5 - SHOULDER SURFACING | 16 - PAVEMENT STRUCTURE |
| 6 - SUBBASE | 17 - SHOULDER SLOPE |
| 7 - BASE COURSE | 18 - TRAVEL LANES |
| 8 - SURFACE COURSE | 19 - SHOULDER |
| 9 - PAVEMENT SLAB | 20 - ROADWAY |
| 10 - DITCH SLOPE | 21 - ROADBED |
| 11 - CUT SLOPE | |

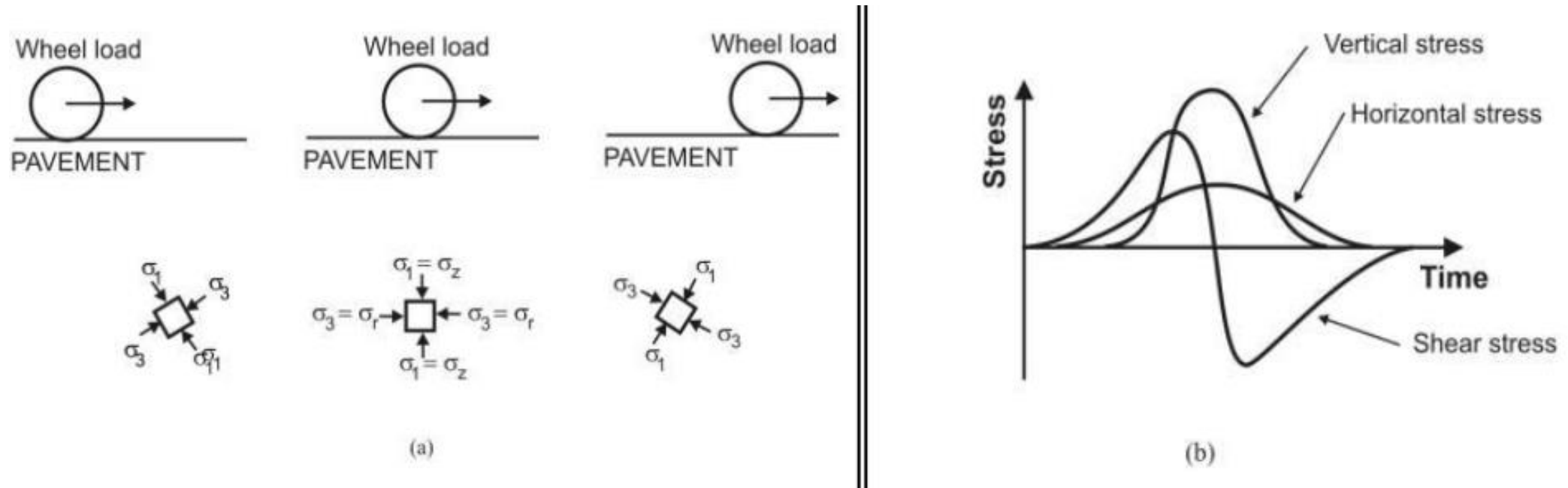
Note: See Figure 1.3 for examples of section with provision for subsurface drainage.

Structural Design Terms

Figure 1.1. Typical Section for Rigid or Flexible Pavement Structure

Τάσεις - Παραμορφώσεις - Θεωρία

Τάσεις επί του οδοστρώματος ανάλογα με τη θέση του τροχού



Έλεγχοι φέρουσας ικανότητας εδάφους

Στόχος: Χαρακτηρισμός των μη συνεκτικών υλικών (έδαφος, βάση, υπόβαση) κυρίως με εμπειρικές δοκιμές

1. Εργαστηριακός έλεγχος – Δοκιμή C.B.R. (California Bearing Ratio)
2. Μέτρο αντίδρασης του εδάφους

Όταν αυξάνεται το k αυξάνεται και η τιμή του CBR

Έλεγχοι φέρουσας ικανότητας εδάφους - Δοκιμή C.B.R.

Ο λόγος CBR είναι ένα μέγεθος που περιγράφει την αντοχή εδαφών.

Η δοκιμή CBR, εκτιμά την διατμητική αντοχή ενός εδάφους υπό ελεγχόμενες συνθήκες υγρασίας - πυκνότητας.

Από την εκτέλεση της δοκιμής προκύπτει ο λόγος φέρουσας ικανότητας.

$$\text{CBR} = (\text{πίεση δοκιμής}) / (\text{πίεση αναφοράς}) * 100 (\%)$$

Έλεγχοι φέρουσας ικανότητας εδάφους - Δοκιμή C.B.R.

ΕΔΑΦΟΣ

Συνηθισμένες τιμές CBR: 3 – 10

Πολύ καλό έδαφος CBR > 10

Καλό έδαφος CBR = 6-10

Πτωχό έδαφος CBR = 3-6

Πολύ πτωχό έδαφος CBR < 3

ΥΠΟΒΑΣΗ

Συνηθισμένες τιμές CBR: 8 – 50

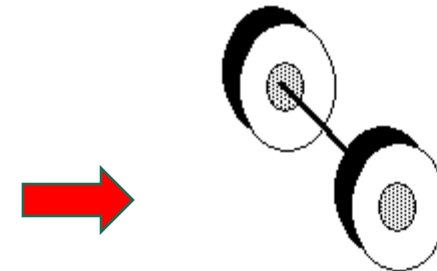
ΒΑΣΗ

Συνηθισμένες τιμές CBR: 8 – 80

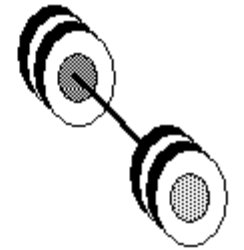
Διάταξη τροχών

Ένα εμπορικό όχημα μπορεί να έχει:

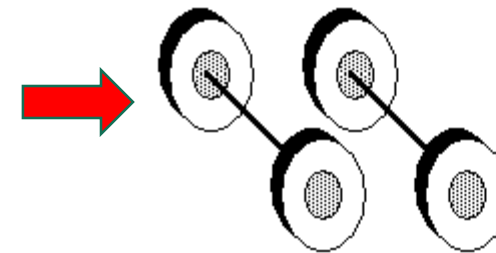
1. Μονούς άξονες με μονούς ή διπλούς τροχούς
2. Δίδυμους άξονες με μονούς ή διπλούς τροχούς



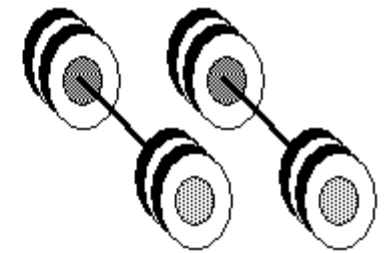
Single Axle with Single Tires



Single Axle with Dual Tires



Tandem Axles with Single Tires



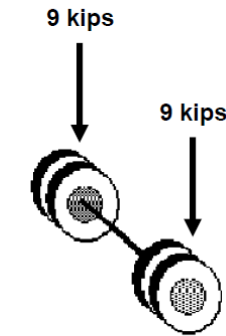
Tandem Axles with Dual Tires

Επιφάνεια επαφής ελαστικού - οδοστρώματος

Το αξονικό σημειακό φορτίο μετατρέπεται σε επιφανειακό – ομοιόμορφα κατανεμημένο.



Standard Axle Load



Single Axle, Dual Wheels

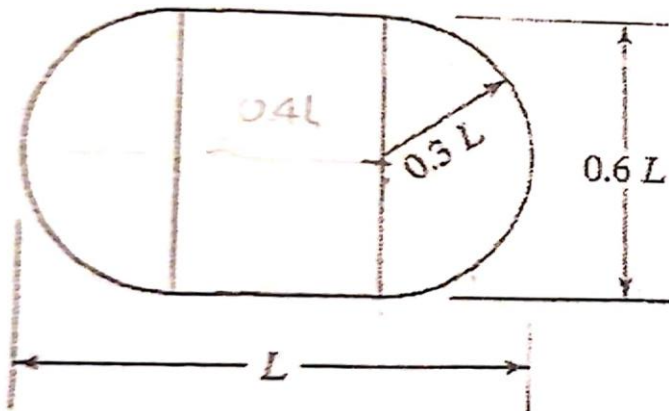
Η πίεση επαφής θεωρείται **ίση με την εσωτερική πίεση του ελαστικού τροχού.**

Επιφάνεια επαφής ελαστικού - οδοστρώματος

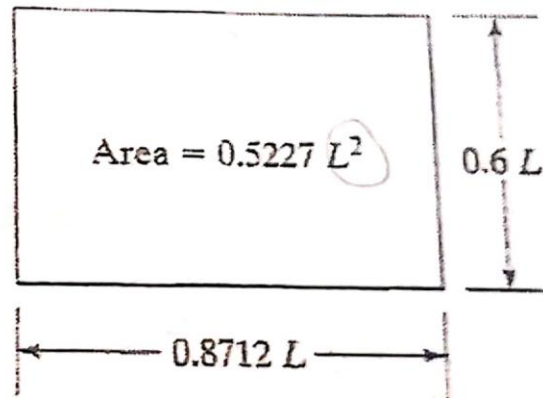


A_c επιφάνεια επαφής \rightarrow γνωστή \rightarrow
φορτίο / εσωτερική πίεση ελαστικού

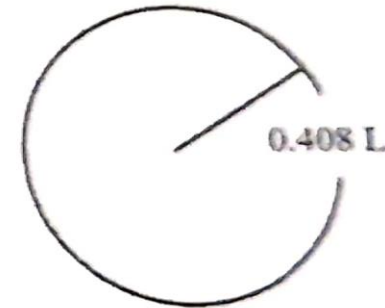
$$L = (A_c / 0.2557)^{0.5}$$



(a) Αρχική επιφάνεια



(b) Ισοδύναμη ορθογωνική επιφάνεια



(c) Ισοδύναμη κυκλική επιφάνεια

Ισοδύναμο φορτίο άξονα EALF

Βασικό φορτίο υπολογισμών : **18 kip** ($18 \cdot 10^3$ lb ή 80 kN ή 8 tn) σε **μονό άξονα**.

Στο φορτίο αυτό αντιστοιχεί συγκεκριμένη βλάβη στο οδόστρωμα λόγω **κόπωσης**.

Διαφορετικά φορτία και αριθμό αξόνων τα ανάγουμε στο βασικό φορτίο με χρήση συντελεστών ισοδυναμίας της βλάβης.

EALF : equivalent axle load factor

1 EALF = βλάβη από **μία** διέλευση μονο-αξονικού φορτίου 18 kip.

$$\mathbf{EALF} = \frac{\mathbf{n_{t18}}}{\mathbf{n_{tx}}} \quad \text{η οι διελεύσεις κάθε κατηγορίας φορτίου σε χρόνο t}$$

Οι τιμές EALF είναι διαφορετικές για **εύκαμπτα και δύσκαμπτα** οδοστρώματα.

Ισοδύναμο φορτίο άξονα EALF

FHWA Truck Classes

Class	Type	EALF
1	Motorcycles	negligible
2	Passenger Cars	negligible
3	Other Two-Axle, Four-Tire Single Unit Vehicles	negligible
4	Buses	0.57
5	Two-Axle, Six-Tire, Single Unit Trucks	0.26
6	Three-Axle Single Unit Trucks	0.42
7	Four or More Axle Single Unit Trucks	0.42
8	Four or Less Axle Single Trailer Trucks	0.30
9	Five-Axle Single Trailer Trucks	1.20
10	Six or More Axle Single Trailer Trucks	0.93
11	Five or Less Axle Multi-Trailer Trucks	0.82
12	Six-Axle Multi-Trailer Trucks	1.06
13	Seven or More Axle Multi-Trailer Trucks	1.39

Σύνδεση με κυκλοφοριακά δεδομένα

$$ESAL = \sum_{i=1}^m EALF_i * \mathbf{n}_i$$

$i=1,2,\dots,m$ οι διαφορετικές κατηγορίες αξονικών φορτίων
 n_i : ο αριθμός των διελεύσεων της κατηγορίας i

$$\mathbf{n}_i = (\mathbf{n}_0)_i * (365) * (\mathbf{D}) * (\mathbf{L}) * (\mathbf{G}) * (\mathbf{Y})$$

$(n_0)_i$ = αρχικός αριθμός επαναλήψεων ανά ημέρα για την ομάδα φορτίων i

D : 0.5 αν δεν έχουμε άλλα στοιχεία/ενδείξεις

L : 1 εάν 1 λωρ/κατ, 0.66-0.94 εάν 2 λωρ/κατ, 0.49-0.82 για άνω των 3 λωρ/κατ (λωρίδα σχεδιασμού η εξωτερική)

$G*Y$: $\frac{(1+r)^Y - 1}{r}$, r : ετήσιος αριθμός αύξησης και Y : αριθμός ετών περιόδου σχεδιασμού

Σύνδεση με κυκλοφοριακά δεδομένα

$$ESAL = \sum_{i=1}^m EALF_i * n_i \quad n_i = (\mathbf{n}_0)_i * (D) * (L) * (365) * (G) * (Y)$$

$i=1,2,\dots,m$ οι διαφορετικές κατηγορίες αξονικών φορτίων

n_i : ο αριθμός των διελεύσεων της κατηγορίας i

$$(\mathbf{n}_0)_i = (\mathbf{p}_i * \mathbf{EALF}_i) * (\mathbf{ADT})_0 * (\mathbf{T}) * (\mathbf{A})$$

p_i = ποσοστό (%) ολικών επαναλήψεων για την ομάδα φορτίων i

ADT : average daily traffic

T : ποσοστό φορτηγών στην ADT (%)

A : μέσος αριθμός αξόνων ανά φορτηγό

Σύνδεση με κυκλοφοριακά δεδομένα

Συνδυάζοντας τις προηγούμενες σχέσεις παίρνουμε:

$$\begin{aligned} \mathbf{ESAL} &= \sum_{i=1}^m \mathbf{EALF}_i * \mathbf{n}_i \\ &= \sum_{i=1}^m (\mathbf{p}_i * \mathbf{EALF}_i) * (\mathbf{ADT})_0 * (\mathbf{T}) * (\mathbf{A}) * (\mathbf{G}) * (\mathbf{D}) * (\mathbf{L}) * (\mathbf{365}) * (\mathbf{Y}) \end{aligned}$$

Σύνδεση με κυκλοφοριακά δεδομένα

T_f : συντελεστής φορτηγών = αριθμός διελεύσεων μονο-αξονικού φορτίου 18 kip / φορτηγό

$$T_f = \sum_{i=1}^m (p_i * EALF_i) * (A)$$

Επομένως

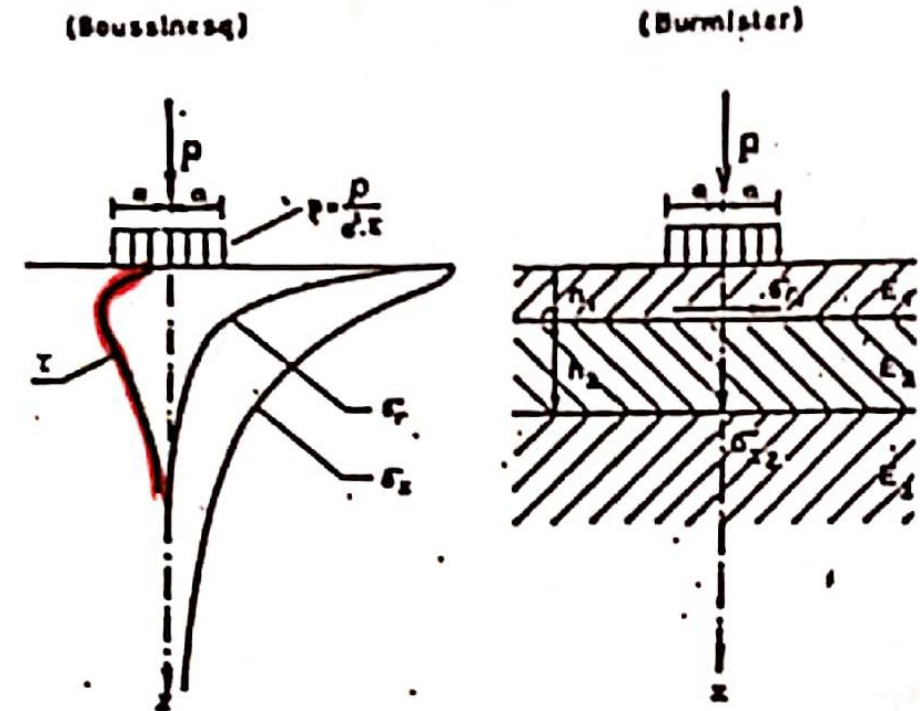
$$ESAL = (T_f) * (ADT)_0 * (T) * (D) * (L) * (365) * [(Y) * (G)]$$

Στατική ανάλυση εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Στόχος : προσδιορισμός ελαστικής απόκρισης εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε φορτία οχημάτων.

Βασικές θεωρίες υπολογισμού:

- Boussinesq: ελαστικός, ομογενής και ισότροπος ημίχωρος
- Burmister: πολλαπλές επάλληλες ελαστικές στρώσεις εδραζόμενες επί ελαστικού ημίχωρου



Παραδοχές Boussinesq

Ημίχωρος

Γραμμικά ελαστικός

Ομογενής

Ισότροπος

Οριζόντια επιφάνεια

Άπειρο βάθος

Φορτίο

Δρα στην επιφάνεια

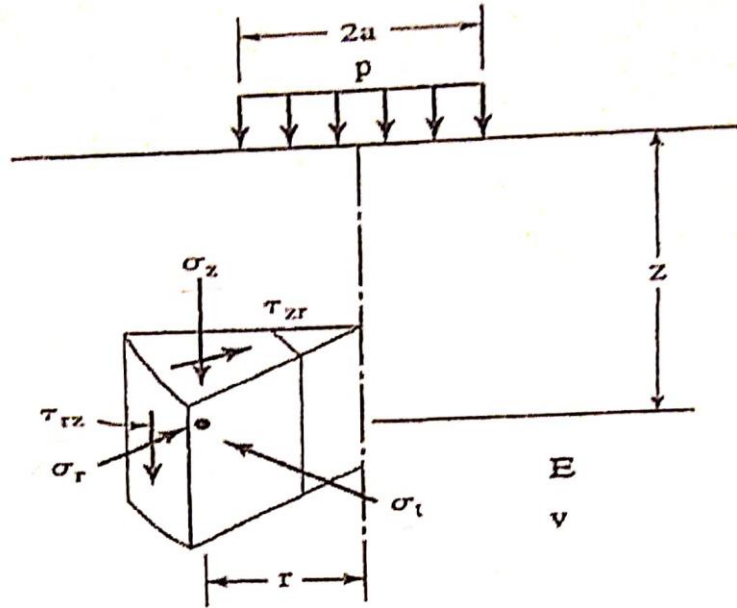
Συγκεντρωμένο P

ή ομοιόμορφα κατανεμημένο σε

κυκλική επιφάνεια $p=P/(\pi \cdot \alpha^2)$

α : ακτίνα κύκλου επαφής

Υπολογισμός εντατικής κατάστασης σε κάθε σημείο



$$\epsilon_z = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} (3\cos^3\theta - 2\nu \cos\theta)$$

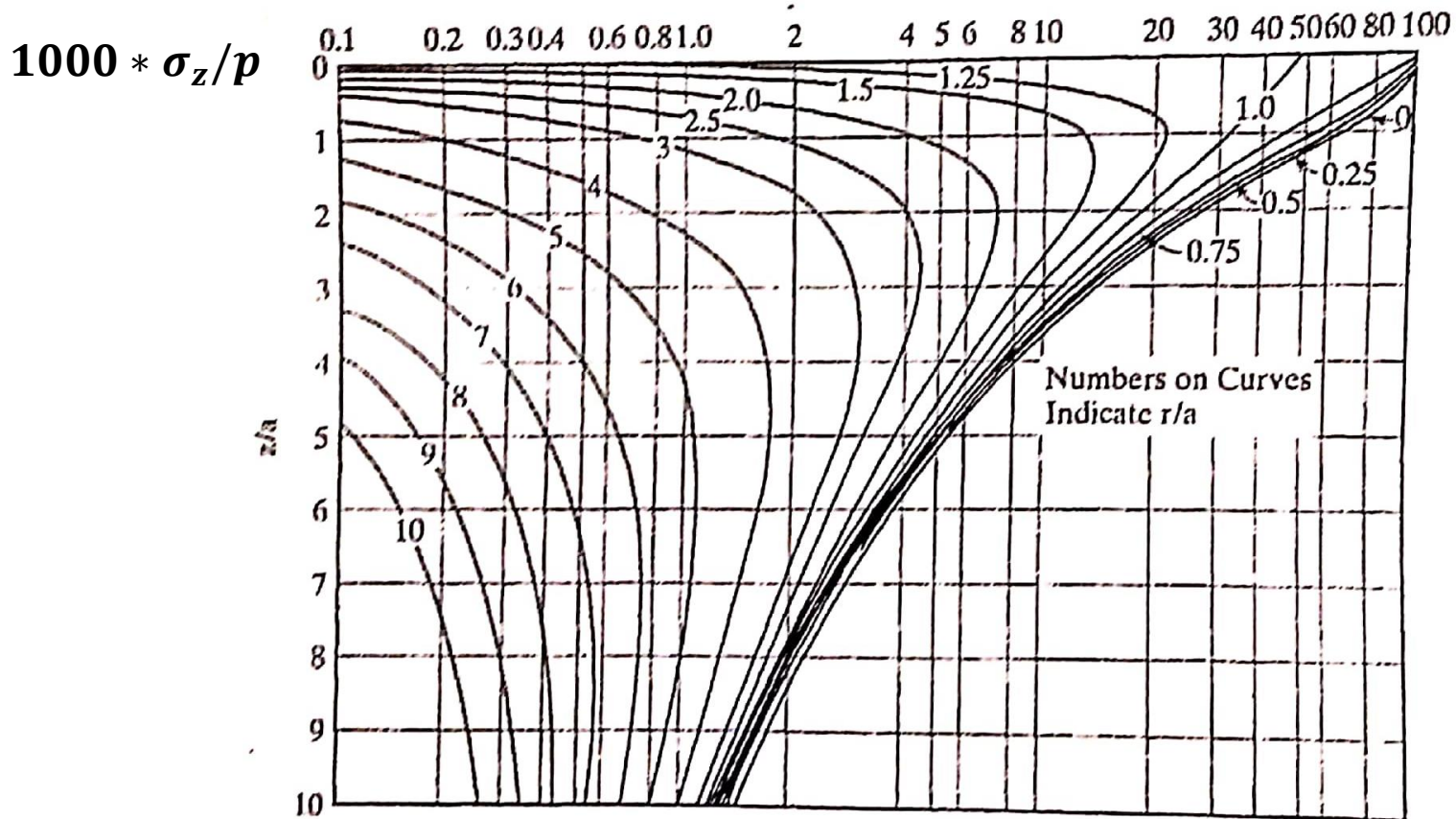
$$\epsilon_r = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} \left[-3\cos^3\theta + (3-2\nu) \cos\theta - \frac{1-2\nu}{1+\cos\theta} \right]$$

$$\epsilon_t = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R^2 E} \left(-\cos\theta + \frac{1-2\nu}{1+\cos\theta} \right)$$

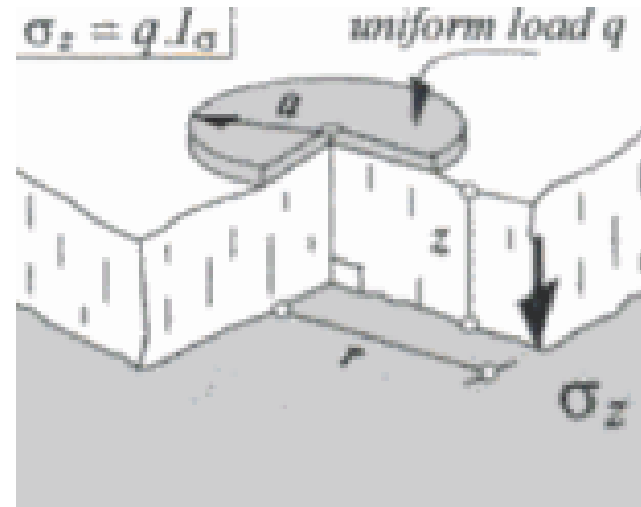
$$u_z = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R E} [2(1-\nu) + \cos^2\theta]$$

$$u_r = \frac{(1+\nu)P}{2\pi R E} \left[\cos\theta \sin\theta - \frac{(1-2\nu)\sin\theta}{1+\cos\theta} \right]$$

Ομοιόμορφο φορτίο p – τάσεις στον κατακόρυφο άξονα

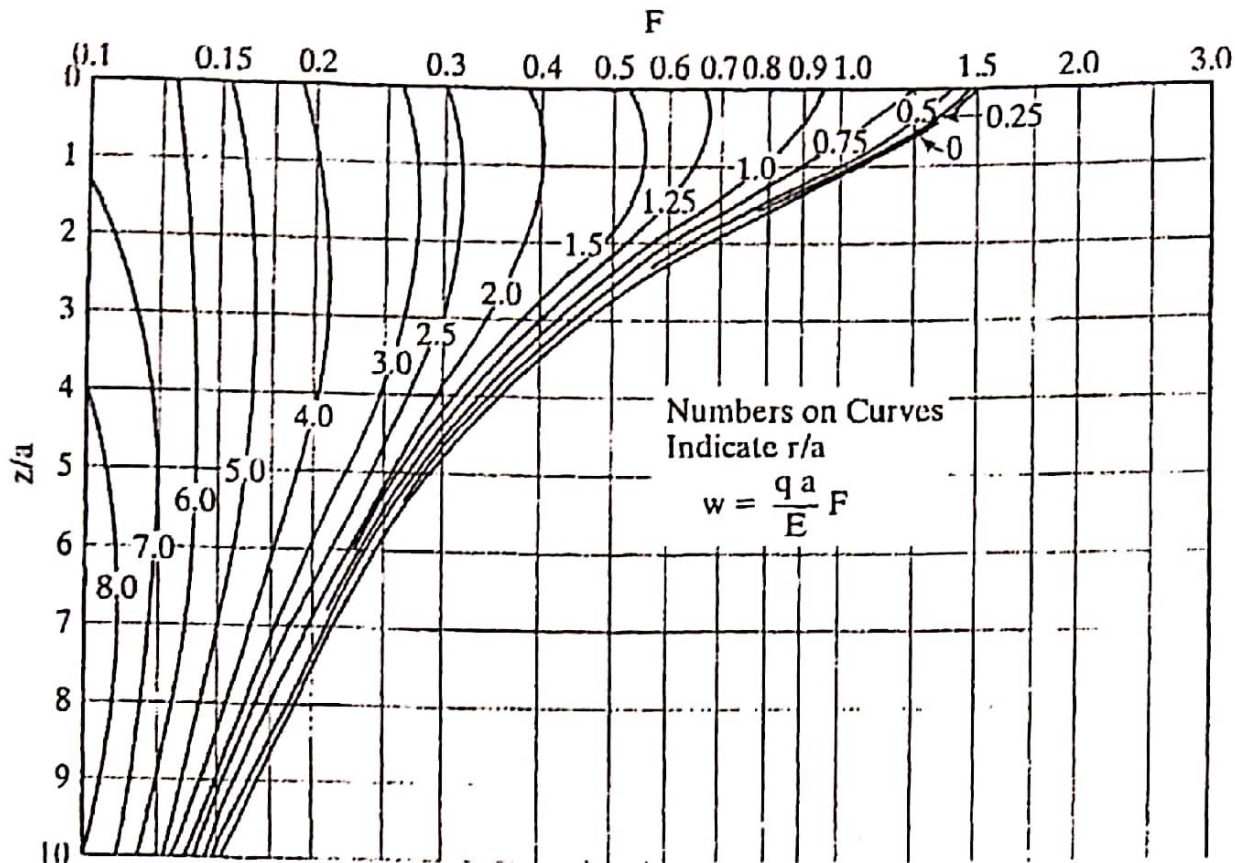


Νομογραφήματα για $\nu=0,5$



χήμα 4.2. Κατακόρυφη τάση συναρτήσεϊ του βάθους σε ελαστικό ημίχωρο ύπο διανεμημένο επί κυκλικής επιφάνειας φορτίο (από Foster και Ahlvin, 1954).

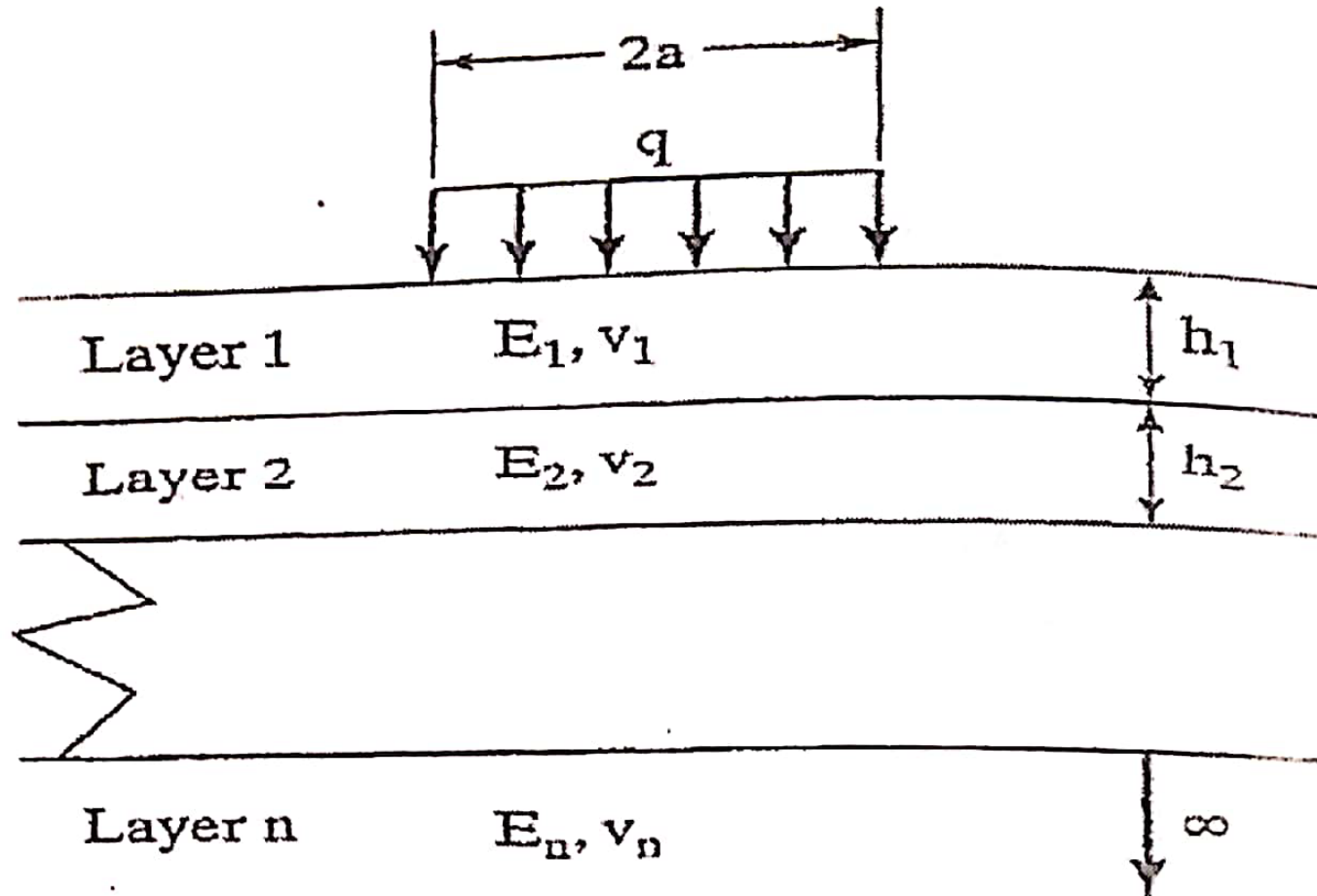
Ομοιόμορφο φορτίο $ρ$ – τάσεις στον κατακόρυφο άξονα



Νομογραφήματα για $\nu=0,5$

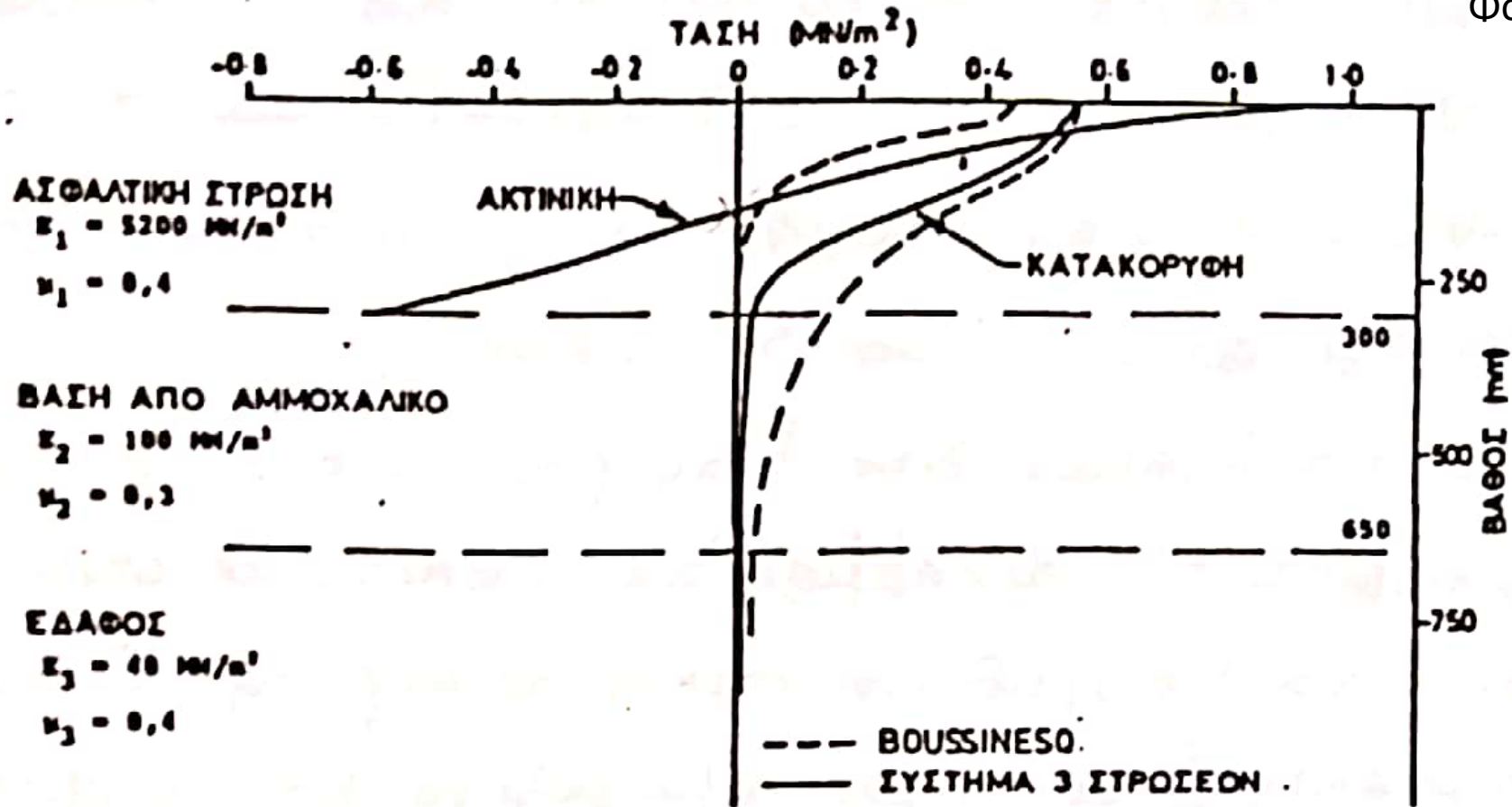
Σχήμα 4.3. Κατακόρυφη μετατόπιση συναρτήσει του βάθους σε ελαστικό ημίχωρο υπό διανεμημένο επί κυκλικής επιφάνειας φορτίο (από Foster και Ahlvin, 1954).

Θεωρία Burmister (1943, 1945)

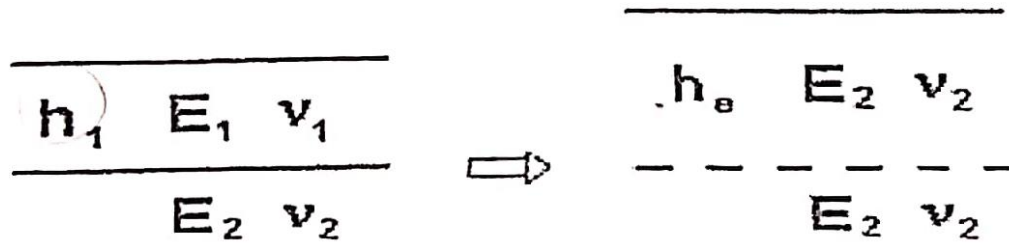


Boussinesq vs. Burmister

Φορτίο 40 kN με ακτίνα 16 cm



Μέθοδος Ισοδύναμων Στρώσεων (Odemark, 1949)



Σύστημα 2 στρώσεων

Ακαμψία (1) = Ακαμψία (2)

$$\frac{I_1 * E_1}{1 - \nu_1^2} = \frac{I_{\text{ισ}} * E_2}{1 - \nu_2^2}$$

$$h_{\text{eq}} = h_1 * \sqrt[3]{\frac{E_1 (1 - \nu_2^2)}{E_2 (1 - \nu_1^2)}}$$



$$\frac{b * h_1^3 * E_1}{12(1 - \nu_1^2)} = \frac{b * h_{\text{ισ}}^3 * E_2}{12(1 - \nu_2^2)}$$

για $\nu_1 = \nu_2$:
$$h_{\text{eq}} = h_1 * \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}$$

Μέθοδος Ισοδύναμων Στρώσεων (Odemark, 1949)

$$\frac{h_1 \quad E_1 \quad \nu_1}{E_2 \quad \nu_2} \Rightarrow \frac{h_{eq} \quad E_2 \quad \nu_2}{E_2 \quad \nu_2}$$

Σύστημα 2 στρώσεων

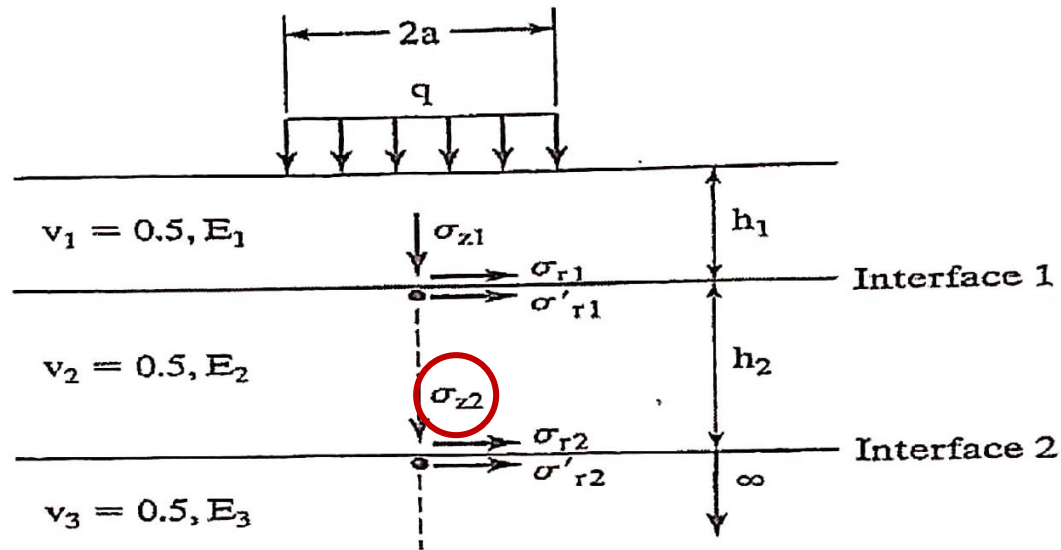
$$h_{eq} = h_1 * \sqrt[3]{\frac{E_1(1 - \nu_2^2)}{E_2(1 - \nu_1^2)}}$$

Για επιπονήσεις

- Από διεπιφάνεια και κάτω: 1 στρώση με $E_2, \nu_2, h=h_{eq}-h_1$ (ελαστικός ημίχωρος)
- Πάνω από διεπιφάνεια: 1 στρώση με E_1, ν_1 και για μεγαλύτερη ακρίβεια

$$h_{eq} = f * h_1 * \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}, f: \text{διορθωτικός συντελεστής}$$

Μέθοδος Ισοδύναμων Στρώσεων (Odemark, 1949)



Σύστημα >2 στρώσεων

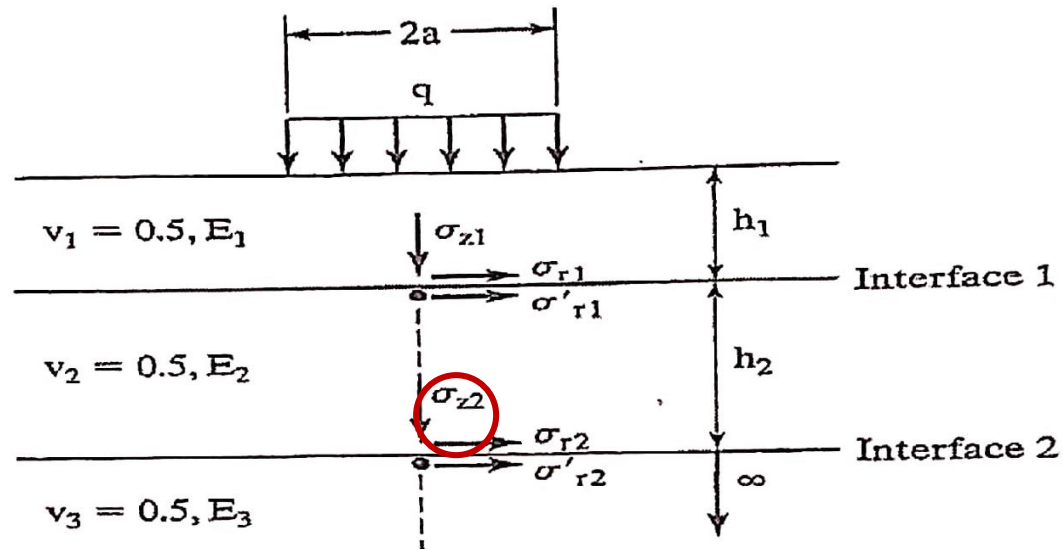
$$h_{eq} = f * \sum_{i=1}^{n-1} \left[h_i * \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \right]$$

Οι στρώσεις κάτω την n θεωρείται ότι έχουν μέτρο ελαστικότητας E_n .

Συνήθεις τιμές f

- Για $n=2$: 0,9
- Για $n=3$: 0,8 (εκτός από πρώτη διεπιφάνεια όπου $f=1$)

Μέθοδος Ισοδύναμων Στρώσεων (Odemark, 1949)



Σύστημα >2 στρώσεων

$$h_{eq} = f * \sum_{i=1}^{n-1} \left[h_i * \sqrt[3]{\frac{E_i}{E_n}} \right]$$

Για τον υπολογισμό των τάσεων στη στρώση Νο 2

$$f = 0,99 - 0,07 \frac{h_1}{a}$$

στη στρώση Νο 3 (σύστημα 3 στρώσεων)

$$f = 0,76 + 0,24 \frac{E_3}{E_2}$$

στη στρώση Νο 3 (σύστημα 4 στρώσεων)

$$f = 1,04 - 0,176 \cdot \log \frac{E_2}{E_3}$$

στη στρώση Νο 4 (σύστημα 4 στρώσεων)

$$f = 0,96 - 0,176 \cdot \log \frac{E_3}{E_4}$$

Παρατηρήσεις επί μεθόδου Odemark

- Οι τάσεις και οι παραμορφώσεις υπολογίζονται αντί στο πραγματικό βάθος $(h_1+h_2-\gamma)$ στο **ισοδύναμο βάθος** $(h_{eq}-\gamma)$.
- **Μετατοπίσεις** = άθροισμα συνθλίψεων + μετατόπιση τελευταίας στρώσης
- **Σύνθλιψη στρώσης** = διαφορά μετατόπισης άνω και κάτω επιφάνειας στο μετασχηματισμένο σύστημα.
- Συνήθως 1 στρώση οδόστρωμα, 1 στρώση βάση-υπόβαση, 1 στρώση έδαφος (ελαστικός ημίχωρος)

Παρατηρήσεις επί μεθόδου Odemark

- Η μέθοδος έχει ακρίβεια όταν τα **E μικραίνουν με το βάθος** (υποδιπλασιάζονται σε κάθε στρώση) και το ισοδύναμο πάχος κάθε στρώσης είναι **μεγαλύτερο από την ακτίνα** του κατανεμημένου φορτίου a .
- Η μέθοδος δίνει καλά αποτελέσματα (κοντά στη θεωρία ελαστικότητας) για τις κατακόρυφες τάσεις αλλά λιγότερα καλά για τις μετατοπίσεις.

Μέθοδος σχεδιασμού εύκαμπτων AASHTO

- American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993
- Εμπειρική μέθοδος, πειραματικά αποτελέσματα πεδίου
- Στόχος είναι ο υπολογισμός:
 - Ελάχιστου πάχους στρώσης **D**
 - Δομικού αριθμού **SN** ανά στρώση

Παράμετροι

1. Σχεδιαστικές μεταβλητές
2. Στάθμες λειτουργικότητας p και $\Delta PSI = p_0 - p_t$
3. Ιδιότητες υλικών
4. Αποστραγγιστική ικανότητα οδοστρώματος

$$SN = \sum_{i=1}^n SN_i = \sum_{i=1}^n (a_i * D_i)$$

Μεθοδολογία

Δεδομένα: ESAL, R, So, Mr, ΔPSI

Ζητούμενα: $D_1, SN_1, D_2, SN_2, D_3, SN_3$

Βήματα

1. Νομογράφημα 5.4 \rightarrow SN
2. Νομογραφήματα 5.1-5.3 $\rightarrow \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$
3. $D_i(\text{in}) \geq \frac{SN_i}{(a_i * m_i)}$, D^* στρογγυλοποίηση
4. Έλεγχος για ελάχιστα πάχη

Traffic (ESAL)	Asphalt concrete	Aggregate base
Less than 50,000	1.0	4
50,001-150,000	2.0	4
150,001-500,000	2.5	4
500,001-2,000,000	3.0	6
2,000,001-7,000,000	3.5	6
Greater than 7,000,000	4.0	6

Note. Minimum thickness is in in.: 1 in. = 25.4 mm.

Αστοχία εύκαμπτων οδοστρωμάτων

1. Ρηγμάτωση λόγω κόπωσης (fatigue cracking) ασφαλτικής άνω στρώσης



Οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση στην κάτω επιφάνεια της ασφαλτικής στρώσης ϵ_t .

Αστοχία εύκαμπτων οδοστρωμάτων

2. Αυλάκωση επιφάνειας οδοστρώματος (rutting)



Κατακόρυφη θλιπτική παραμόρφωση της άνω επιφάνειας της στρώσης έδρασης ϵ_z .

Κριτήρια αστοχίας εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Ορίζουμε τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό διελεύσεων N σε συνάρτηση

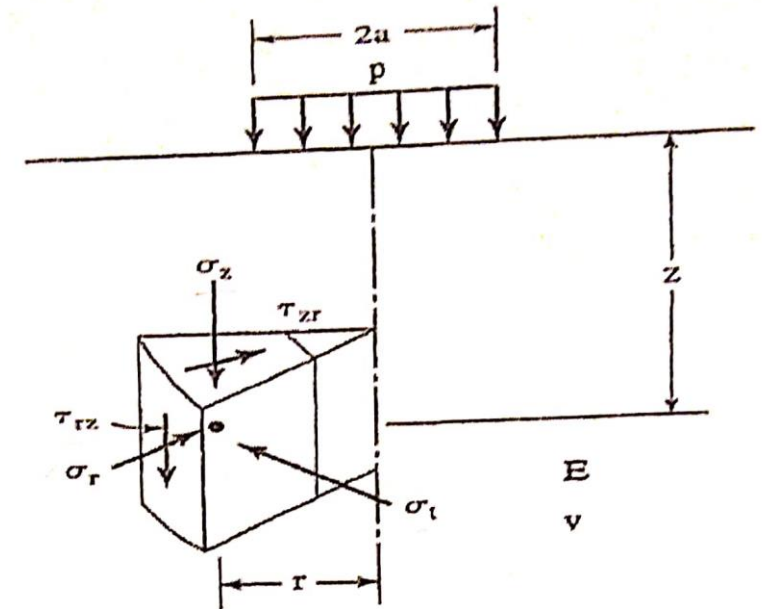
των ϵ_t και ϵ_z .

$$N_f = f_1 * \epsilon_t^{-f_2} \quad \text{ρηγματώση}$$

$$N_r = f_3 * \epsilon_z^{-f_4} \quad \text{αυλάκωση}$$

f_1, f_2, f_3, f_4 : εμπειρικοί συντελεστές

$$N = \min\{N_f, N_r\}$$



Παραδείγματα

- Illinois department of transportation (1987): $N_f = 5 * 10^{-6} * \epsilon_t^{-3}$
- Shell (1985): $N_r = 1.05 * 10^{-7} * \epsilon_z^{-4}$

Υπολογισμός δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

1. Μηχανικό προσομοίωμα οδοστρώματος
2. Καθορισμός είδους, έντασης, διάρκειας επιπονήσεων (κυκλοφορία και περιβαλλοντικοί παράγοντες)
3. Εκτίμηση πάχους και μηχανικών χαρακτηριστικών στρώσεων (E , ν)
4. Ανάλυση εντατικής κατάστασης (τάσεις, παραμορφώσεις)
5. Έλεγχος επάρκειας κατά τη διάρκεια ζωής
 - Αστοχία σκυροδέματος έναντι κόπωσης (επαναλαμβανόμενη φόρτιση)
 - Αστοχία υπόβασης λόγω διάβρωσης

Μηχανικό προσομοίωμα

Λεπτή οριζόντια καμπτική πλάκα (**σκυρόδεμα**)

- που εδράζεται πάνω στον ελαστικό ημίχωρο ή σε μία σειρά άπειρων ελατηρίων Winkler (**έδαφος**)

- και καταπονείται από κατακόρυφα διανεμημένα επί κυκλικών πεπερασμένων επιφανειών φορτία (**τροχοί οχήματος**).

Διακριτή ανάλυση για:

- Μέσον πλάκας (i - interior)
- Ακμή πλάκας (e – edge)
- Γωνία πλάκας (c – corner)

Μηχανικό προσομοίωμα

1919 Golberg

- Υπολογισμός τάσεων στη γωνία
- Παραδοχή: η πλάκα δεν βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος

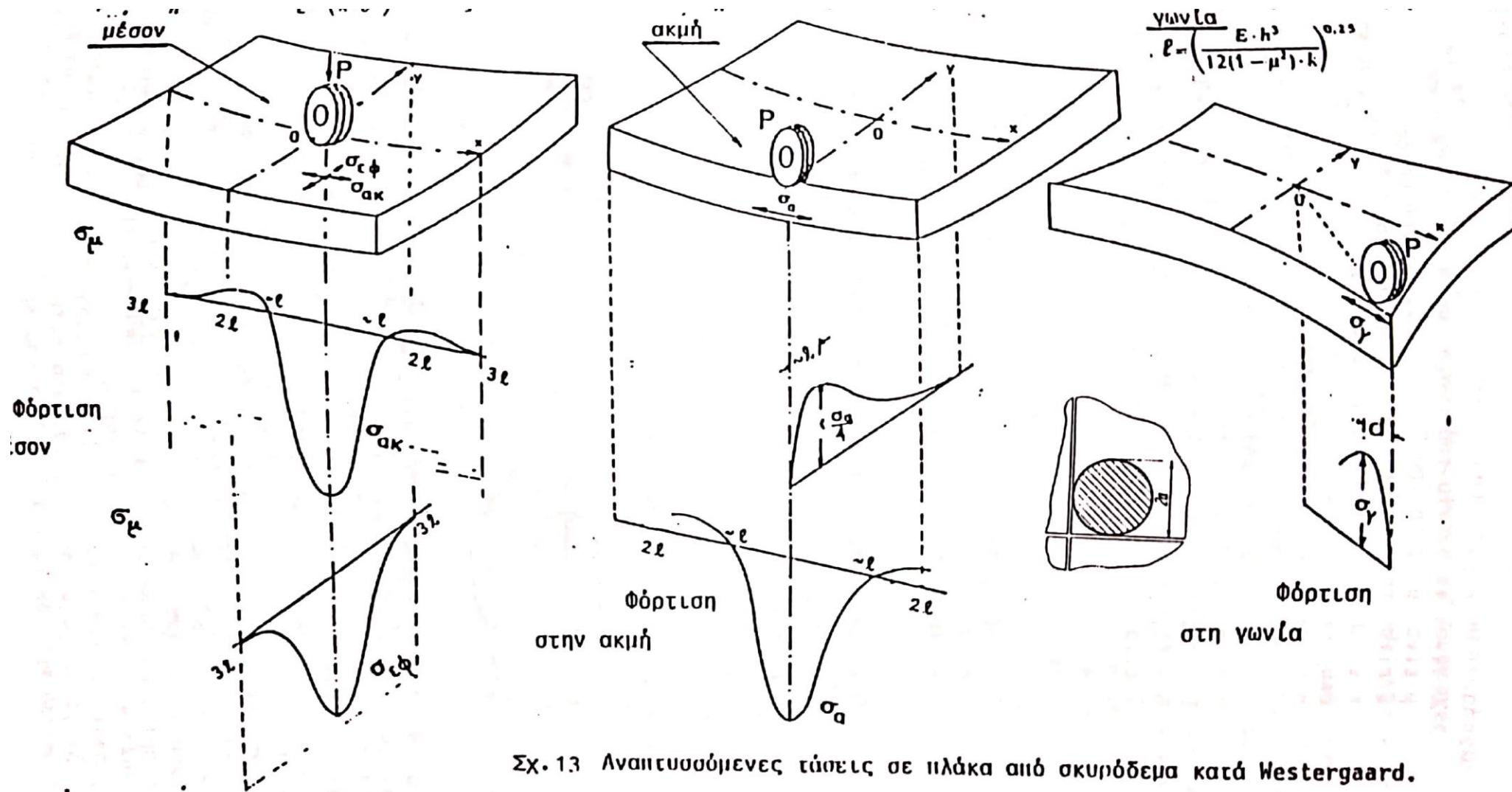
1926 Westergraad

- Υπολογισμός τάσεων σε γωνία, μέσον και ακμή
- Συνεχής επαφή πλάκας - εδάφους

1936-1943 Teller-Sutherland

- Βελτίωση Westergraad μερική επαφή με το έδαφος

Προσομοίωμα Westergaard



ΣΧ. 13 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε πλάκα από σκυρόδεμα κατά Westergaard.

Σχέσεις βιβλίου ($\nu=0,15$)

$$\sigma_c = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (6.4)$$

$$\Delta_c = \frac{P}{kl^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{\alpha\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad (6.5)$$

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{b} \right) + 1.069 \right] \quad (6.6)$$

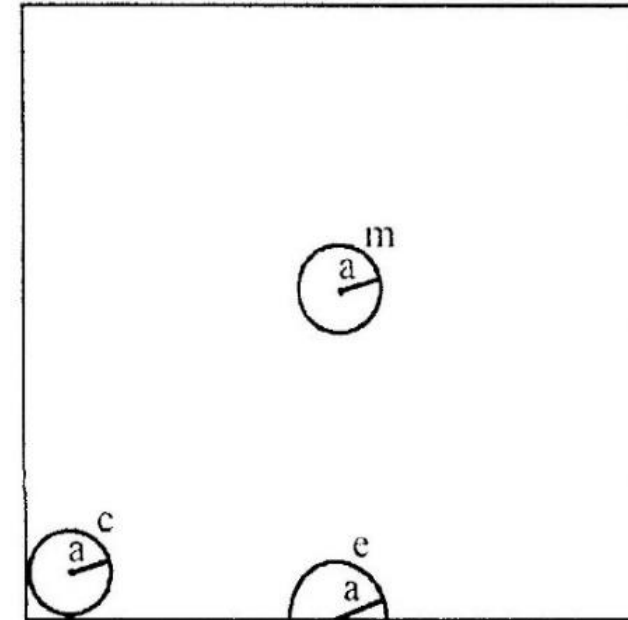
$$\Delta_i = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{\alpha}{2l} \right) - 0.673 \right] \left(\frac{\alpha}{l} \right)^2 \right\} \quad (6.7)$$

$$\sigma_{ec} = \frac{0.803P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{\alpha} \right) + 0.666 \left(\frac{\alpha}{l} \right) - 0.034 \right] \quad (6.8)$$

$$\Delta_{ec} = \frac{0.431P}{kl^2} \left[1 - 0.82 \left(\frac{\alpha}{l} \right) \right] \quad (6.9)$$

$$\sigma_{esc} = \frac{0.803P}{h^2} \left[4 \log \left(\frac{l}{\alpha} \right) + 0.282 \left(\frac{\alpha}{l} \right) + 0.650 \right] \quad (6.10)$$

$$\Delta_{esc} = \frac{0.431P}{kl^2} \left[1 - 0.349 \left(\frac{\alpha}{l} \right) \right] \quad (6.11)$$



m = Μέσο πλάκας
 e = Ακμή πλάκας
 c = Γωνία πλάκας
 $\mu = 0.15$

c : corner

i : interior

ec : edge circle

esc : edge semi-circle

$D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ καμπτική δυσκαμψία πλάκας

$l = (D/k)^{0.25}$ ακτίνα σχετικής δυσκαμψίας

Παράμετροι σχεδιασμού δύσκαμπτων

1. Κυκλοφοριακός φόρτος (**ESAL**)
2. Διάρκεια σχεδιασμού: 20 έως 50 έτη
3. Αξιοπιστία **R** και τυπική απόκλιση **S_o**
4. Παρών δείκτης λειτουργικότητας **ΔPSI**
5. Μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος $E_c = 57000(f_c')^{0.5}$, σε psi, όπου **f_c'** είναι η θλιπτική αντοχή του σε psi.

Παράμετροι σχεδιασμού δύσκαμπτων

6. Μέτρο καμπτικής αντοχής σκυροδέματος (modulus of rupture) S_c σε psi.
7. Εποχιακό μέτρο επανάκτησης MR του υπεδάφους (συνήθως ανά μήνα).
8. Εποχιακό μέτρο ελαστικότητας E_{SB} υπόβασης (συνήθως ανά μήνα).
9. Συντελεστής μεταφοράς J.
10. Συντελεστής αποστράγγισης C_d
- 11. Μέτρο αντίδρασης k (pci=lb/in³) του υπεδάφους.**

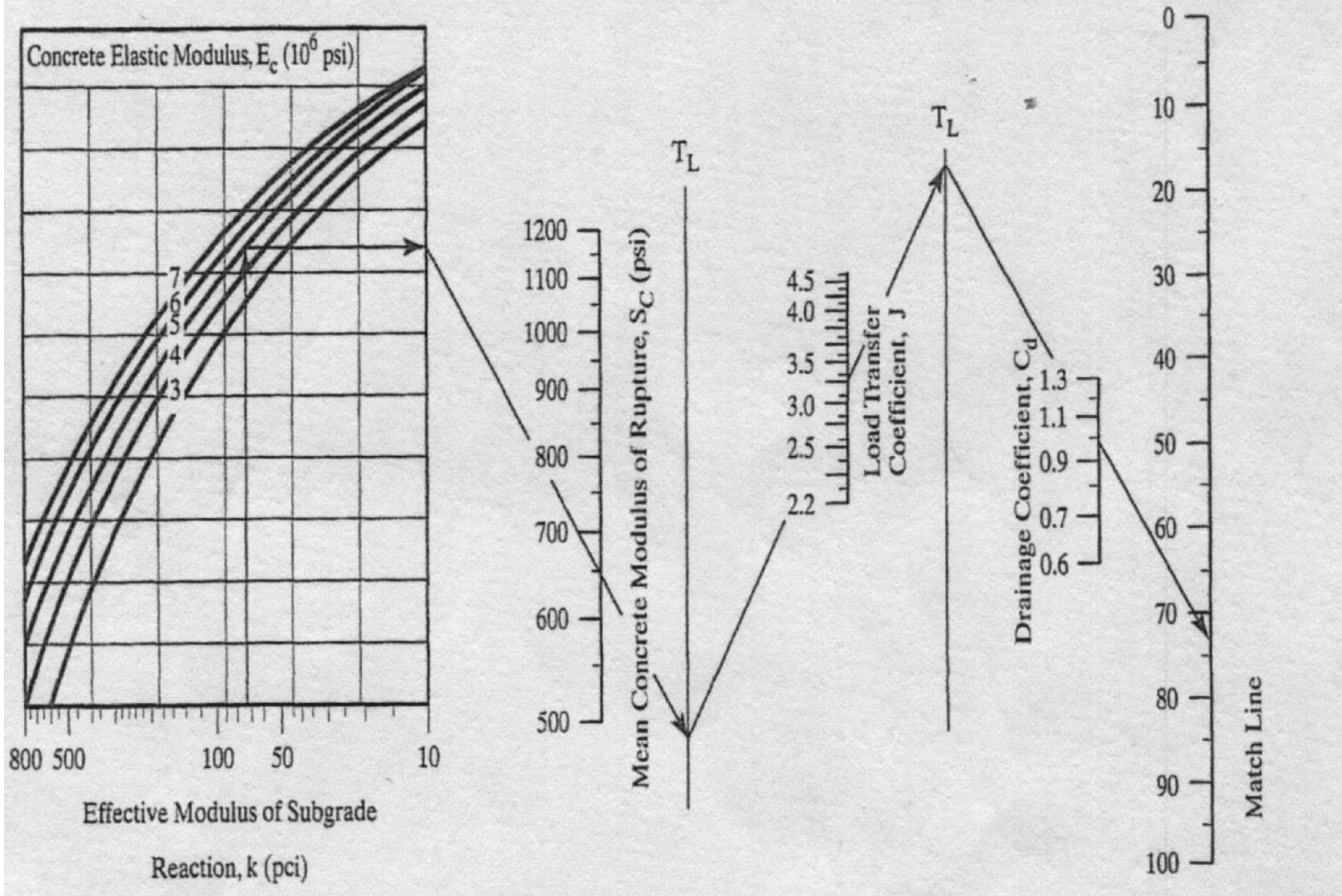
Σχεδιασμός δύσκαμπτων οδοστρωμάτων

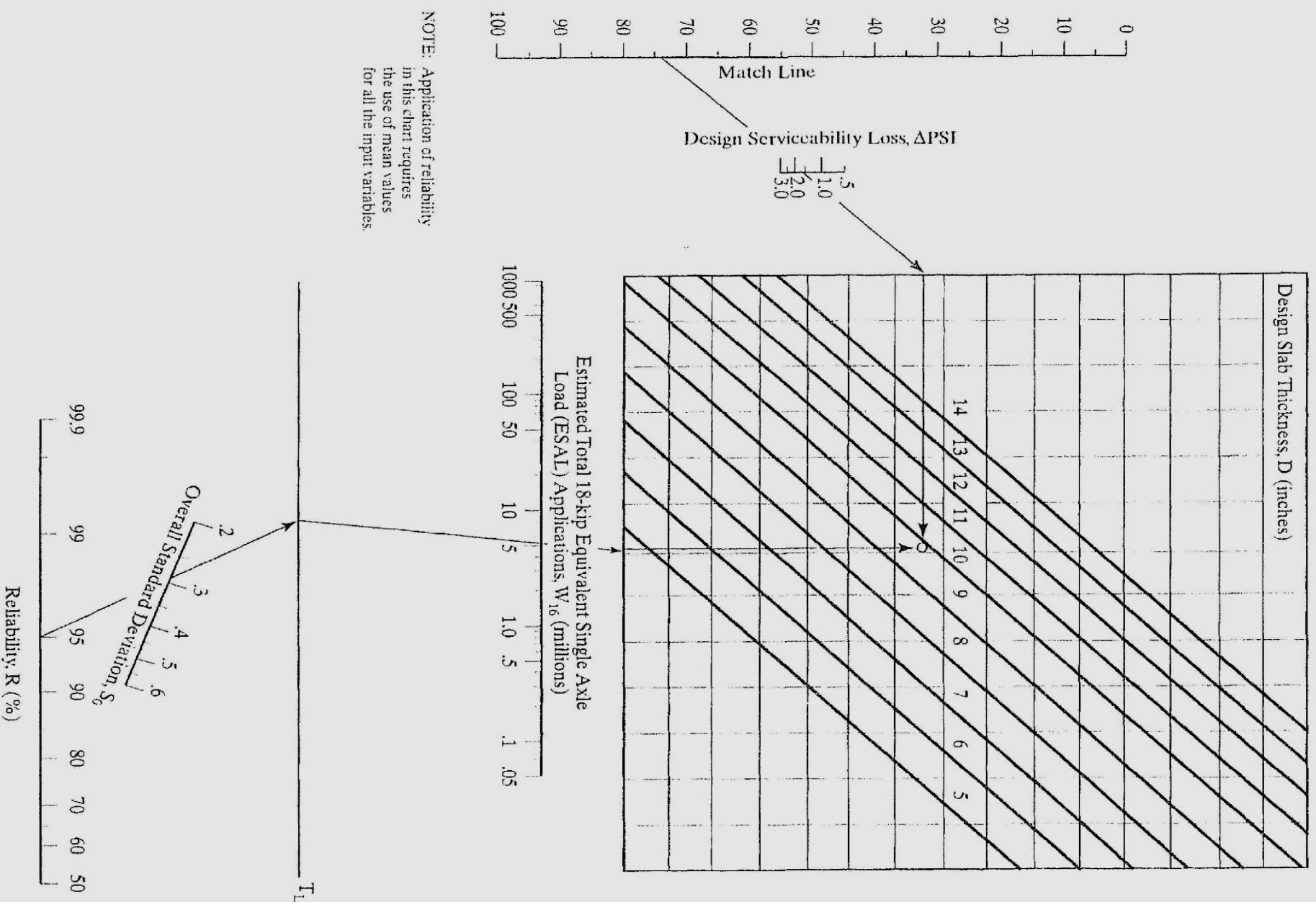
Δεδομένα: ESAL, R, S_o, ΔPSI, E_c, S_c, J, C_d, ..., K

Ζητούμενο: D

Βήματα

1. Υποτιθέμενο D
2. Νομογραφήματα 7.1 έως 7.4 : υπολογισμός ενεργού διορθωμένου k
3. Νομογράφημα 7.5 : υπολογισμός D
4. Έλεγχος D





Αστοχία δύσκαμπτου οδοστρώματος

Κυριότερο κριτήριο αστοχίας : **ρηγμάτωση λόγω κόπωσης**

Αιτία: τάσεις στο μέσο των ακραίων πλευρών της πλάκας σκυροδέματος.

Μορφή: εγκάρσιες και διαμήκεις ρωγμές στα άκρα.

Ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων φορτίου για πρόκληση ρηγμάτωσης κόπωσης εξαρτάται από τον λόγο της εφελκυστικής καμπτικής τάσης και του μέτρου ρηγμάτωσης του σκυροδέματος.

Αστοχία δύσκαμπτου οδοστρώματος

Κυριότερο κριτήριο αστοχίας : **ρηγμάτωση λόγω κόπωσης**

Μέθοδος: υπολογισμός ισοδύναμου αριθμού διελεύσεων ακραίων φορτίων

Κριτήριο Darter and Barenberg (1977)

$$\log N_f = 16.61 - 17.61 (\sigma/S_c)$$

N_f : επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων

σ : καμπτική εφελκυστική τάση πλάκας

S_c : μέτρο ρηγμάτωσης σκυροδέματος

50% πιθανότητα αστοχίας

Διάρκεια ζωής

Cracking Index

$$CI = \frac{n_i}{N_f}$$

Ευχαριστώ
