



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΠΟΙΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΜΦΑΣΗ ΣΤΗ ΓΑΛΛΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ



ΑΘΗΤΑΚΗ ΔΕΣΠΟΙΝΑ

Επιβλέπουσα: Πλατή Χριστίνα, Επικ. Καθηγήτρια ΕΜΠ

Αθήνα, Νοέμβριος 2018

Διερεύνηση παραμέτρων για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στη Γαλλική Μέθοδο

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της διπλωματικής μου εργασίας ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Στο σημείο αυτό, νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους, αλλά και τον καθένα ξεχωριστά, όσους συνέβαλαν ώστε να φτάσω στο σημείο αυτό.

Θα ήθελα επομένως να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές μου, οι οποίοι με εφόπλισαν με τις απαραίτητες γνώσεις ώστε να είμαι σε θέση να ξεκινήσω την επαγγελματική μου πορεία.

Ιδιαίτερως θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Χριστίνα Πλατή, για την εμπιστοσύνη που έδειξε εξαρχής στο πρόσωπό μου, αναθέτοντάς μου την παρούσα διπλωματική εργασία και την ευκαιρία που μου έδωσε, μέσα από αυτήν, να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο. Αναγνωρίζω την καθοδήγηση, την οργάνωση και τις πολύτιμες συμβουλές της από την αρχή έως το πέρας αυτής.

Επίσης, ένα θερμό ευχαριστώ οφείλω στην κυρία Κωνσταντίνα Γεωργούλη, με την οποία είχα την τιμή να συνεργαστώ κατά την εκπόνηση της εργασίας. Καθοριστική ήταν η συμβολή της τόσο στη διεξαγωγή ενός μέρους της εργασίας, όσο και στη διαρκή βελτίωση και εξέλιξη του συνόλου της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα αγαπημένα μου πρόσωπα, τα οποία συνειδητά με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια. Πάντα μου έδιναν την εναλλακτική μίας πιο ευχάριστης αντιμετώπισης, ακόμα και των πιο δύσκολων στιγμών.

Αθητάκη Δέσποινα,

Αθήνα, 2/11/2018,

ΕΜΠ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ	1
1.2 ΣΤΟΧΟΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	3
1.3 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	3
2. ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ	5
2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	5
2.2 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ.....	6
2.3 ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΦΘΟΡΕΣ	7
3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	11
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ.....	11
3.2 ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ.....	12
3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	17
4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ.....	21
4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	21
4.2 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΟΣ ΦΟΡΤΟΣ	22
4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΡΩΣΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ	25
4.4 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ	28
4.5 ΥΛΙΚΑ.....	30

4.6 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ – ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	32
4.6.1 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	32
4.6.2 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	34
4.6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	35
4.6.4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ	37
 5. ΓΑΛΛΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ	39
5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	39
5.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ.....	41
5.2.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΦΥΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ	41
5.2.2 ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΥΒΕΥΣΗΣ.....	42
5.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	42
5.3.1. ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ	42
5.3.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ	45
5.3.3 ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΔΡΑΣΗΣ.....	46
5.3.4 ΥΛΙΚΑ.....	47
5.3.5 ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ	48
 6. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	56
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	56
6.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ	59
6.2.1 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ	59
6.2.2 ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΔΡΑΣΗΣ.....	61
6.2.3 ΥΛΙΚΑ.....	61
6.2.4 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ.....	63

6.2.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	65
6.2.6 ΠΟΣΟΣΤΟ ΔΙΑΚΥΒΕΥΣΗΣ.....	66
6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ.....	66
6.3.1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	66
6.3.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	67
6.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΘΟΡΑΣ	84
6.4.1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ	84
6.4.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ	85
6.5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ	91
 7. ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	 95
 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	 100

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Τρόπος κατανομής τάσεων σε εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα (www.pavementinteractive.org).....	5
Εικόνα 2.2: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος	6
Εικόνα 3.1: Αντιστοίχιση κατακόρυφων τάσεων – πιέσεων επαφής κατά Burmister	14
Εικόνα 3.2: Εντατικά μεγέθη σε εύκαμπτο οδόστρωμα (Journal of the South African Institution of Civil Engineering)	15
Εικόνα 3.3: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος	16
Εικόνα 3.4: Χρονοδιάγραμμα της εξέλιξης του σχεδιασμού οδοστρωμάτων (Pereira&Pais,2017)	17
Εικόνα 3.5: Κατηγοριοποίηση μεθόδων σχεδιασμού	18
Εικόνα 3.6: Σχεδιασμός οδοστρώματος: ένα απλοποιημένο πλαίσιο σχεδιασμού/ανάλυσης	19
Εικόνα 4.1: Παράμετροι σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων.....	21
Εικόνα 4.2: Πίεση επαφής ελαστικών στο οδόστρωμα (Anuroju,2016)	22
Εικόνα 4.3: Κατανομή παραμορφώσεων ισοδύναμου φορτίου μονού τροχού (Factors influencing pavement design, theconstructor.org)	23
Εικόνα 4.4: Ισοδύναμο φορτίο αναφοράς 8.16tn	24
Εικόνα 4.5: Κοκκομετρικές καμπύλες (Βαρδουλάκης,2004)	26
Εικόνα 4.6: Ρωγμές λόγω υπερβολικής συστολής εύκαμπτου οδοστρώματος.....	29
Εικόνα 4.7: Επίδραση βροχής σε εύκαμπτο οδόστρωμα	29
Εικόνα 4.8: Διόγκωση λόγω δράσης παγετού(Khanna,2015).....	30
Εικόνα 4.9: Κύκλος ζωής οδοστρώματος (‘Network Management – Asset Management’, Transport Infrastructure Ireland)	33
Εικόνα 4.10: Συντήρηση και αποκατάσταση στο σχεδιασμό	34

Εικόνα 4.11: Ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων	36
Εικόνα 4.12: Εναπομένουσα διάρκεια ζωής οδοστρώματος (Mack&Sullivan,2013).....	37
Εικόνα 5.1: Τυπική διάταξη 13tn φορτίου αναφοράς της Γαλλικής Μεθόδου.....	44
Εικόνα 5.2: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος κατά τη Γαλλική Μέθοδο	46
Εικόνα 5.3: Συσκευή LPC Dynaplaque (Balay et al., 2012).....	47
Εικόνα 5.4: Δοκιμή κάμψης δύο σημείων τραπεζοειδούς δοκιμίου	49
Εικόνα 5.5: Καμπύλη κόπωσης για R=50%	50
Εικόνα 6.1: Πρότυπο διατομής για τις αναλύσεις ευαισθησίας	57
Εικόνα 6.2: Πορεία ανάλυσης ευαισθησίας σε διατομή μεταβλητού πάχους ασφαλικής στρώσης	58
Εικόνα 6.3: Πορεία ανάλυσης ευαισθησίας σε διατομή σταθερού πάχους ασφαλικής στρώσης	59
Εικόνα 6.4 : Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας συναρτήσει f,T (GB3).....	62
Εικόνα 6.5: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας συναρτήσει f,T (GB4)	63
Εικόνα 6.6: Ενεργό μήκος σε οδόστρωμα (Hajj et al.,2011).....	64
Εικόνα 6.7: Διάγραμμα κατανομής τάσεων (Burmister) - συχνότητα.....	65
Εικόνα 6.8: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος μεταβλητού πάχους ασφαλικής στρώσης	67
Εικόνα 6.9: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB4,T=15°C).....	67
Εικόνα 6.10: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4,T=15°C)	68
Εικόνα 6.11 : Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4,T=15°C) .	68
Εικόνα 6.12: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB4,T=20°C).....	69
Εικόνα 6.13: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4,T=20°C)	70
Εικόνα 6.14: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4,T=20°C) ..	70

Εικόνα 6.15 : Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB4,T=25°C).....	71
Εικόνα 6.16: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4,T=25°C)	72
Εικόνα 6.17: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4,T=25°C) ..	72
Εικόνα 6.18: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB4,T=30°C).....	73
Εικόνα 6.19: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4,T=30°C)	74
Εικόνα 6.20: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4,T=30°C) ..	74
Εικόνα 6.21: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB3,T=15°C).....	76
Εικόνα 6.22: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3,T=15°C)	76
Εικόνα 6.23: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3,T=15°C) ..	77
Εικόνα 6.24: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB3,T=20°C).....	78
Εικόνα 6.25: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3,T=20°C)	78
Εικόνα 6.26: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3,T=20°C) ..	79
Εικόνα 6.27: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB3,T=25°C).....	80
Εικόνα 6.28: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3,T=25°C)	80
Εικόνα 6.29: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3,T=25°C) ..	81
Εικόνα 6.30: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB3,T=30°C).....	82
Εικόνα 6.31: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3,T=30°C)	82
Εικόνα 6.32: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3,T=30°C) ..	83
Εικόνα 6.33: Διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος (GB4,T= 15°C,f=10Hz,R=2.5%)	84
Εικόνα 6.34: Διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος (GB3,T= 15°C,f=10Hz,R=2.5%)	84

Εικόνα 6.35: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4,h=19cm,T=15°C).....	85
Εικόνα 6.36: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4,h=19cm,T=20°C).....	85
Εικόνα 6.37: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4,h=19cm,T=25°C).....	86
Εικόνα 6.38: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4,h=19cm,T=30°C).....	86
Εικόνα 6.39: Διάγραμμα φθοράς έδρασης (GB4,h=19cm)	87
Εικόνα 6.40: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB3,h=22cm,T=15°C).....	88
Εικόνα 6.41: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB3,h=22cm,T=20°C).....	89
Εικόνα 6.42: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB3,h=22cm,T=25°C).....	89
Εικόνα 6.43: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB3,h=22cm,T=30°C).....	90
Εικόνα 6.44: Διάγραμμα φθοράς έδρασης (GB3,h=22cm)	91
Εικόνα 6.45: Σύγκριση φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4).....	92
Εικόνα 6.46: Σύγκριση φθοράς έδρασης (GB4)	92
Εικόνα 6.47: Σύγκριση φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB3).....	93
Εικόνα 6.48: Σύγκριση φθοράς έδρασης (GB3)	94

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Αίτια φθοράς ανά κατηγορία	8
Πίνακας 4.1: Μέγιστα αξονικά φορτία σε διάφορες χώρες.....	25
Πίνακας 4.2: Κατάταξη εδαφών κατά AASHTO	27
Πίνακας 5.1: Τιμές συντελεστών α και k κατά την Γαλλική Μέθοδο (LCPC,1994).....	43
Πίνακας 5.2: Τάξεις κυκλοφορίας.....	44
Πίνακας 5.3: Τιμές του συντελεστή CAM συναρτήσει της κυκλοφορίας.....	45
Πίνακας 5.4: Τιμές του συντελεστή CAM συναρτήσει του τύπου της οδού	45
Πίνακας 5.5: Κατηγορίες φέρουσας ικανότητας	47
Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά ασφαλικών υλικών, $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $f=10\text{Hz}$	48
Πίνακας 5.7: Τιμές $\varepsilon_{6,b}$	51
Πίνακας 5.8: Τιμές του συντελεστή k_s	52
Πίνακας 5.9: Τιμές του συντελεστή k_c	52
Πίνακας 5.10: Τιμές του συντελεστή u	53
Πίνακας 5.11: Τιμές του συντελεστή Sh	54
Πίνακας 5.12: Τιμές του συντελεστή kr	54
Πίνακας 6.1: Κυκλοφοριακά στοιχεία βαρέων οχημάτων για την περίοδο σχεδιασμού	60
Πίνακας 6.2: Συντελεστές ισοδυναμίας για τη μετατροπή της σύνθεσης των βαρέων οχημάτων σε ESALs	60
Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά ασφαλικών υλικών	62
Πίνακας 6.4: Τιμές του συντελεστή kr στις αναλύσεις.....	66

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία διερευνά τις παραμέτρους που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Μέσω αναλύσεων ευαισθησίας που πραγματοποιούνται με εφαρμογή της Γαλλικής Μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων, σε δεδομένη διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος, αναδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο οι παράμετροι επιδρούν στη διατομή, τόσο σε επίπεδο διαστασιολόγησης, όσο και σε επίπεδο φθοράς. Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι, από τις υπό διερεύνηση παραμέτρους, η θερμοκρασία και τα υλικά πλήρωσης των ασφαλικών στρώσεων έχουν τη σημαντικότερη επίδραση στο αποτέλεσμα σχεδιασμού ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Τέλος, διαπιστώνεται ότι η Γαλλική Μέθοδος σχεδιασμού είναι δυνατό να εφαρμοστεί και στον ελληνικό χώρο, αλλά υπό προϋποθέσεις.

Λέξεις κλειδιά: εύκαμπτα οδοστρώματα, παράμετροι σχεδιασμού, μηχανιστική-εμπειρική προσέγγιση, Γαλλική Μέθοδος, διακύβευση, ανάλυση ευαισθησίας, καμπύλη κόπωσης

ABSTRACT

The present thesis constitutes a research on the parameters involved in the design of flexible pavements. Through sensitivity analyses which are carried out by applying the French Method of pavement design, at a given reference cross-section of flexible pavement, the way in which the parameters affect the cross section is highlighted, regarding not only pavement design but damage, as well. The evaluation of the results shows that, from the researched parameters, the temperature and filling materials of the asphalt layers have got the most significant effect on the result of the flexible pavement design. Finally, it is established that the French Method of design can be also applied in Greece, under certain conditions, though.

Keywords: flexible pavements, design factors, Mechanistic-Empirical approach, French design Method, calculated risk, sensitivity analysis, fatigue curve

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ

Η μειωμένη φέρουσα ικανότητα του φυσικού εδάφους το καθιστά ανίκανο να παραλάβει τα φορτία της κυκλοφορίας χωρίς να παραμορφωθεί σημαντικά, ενώ η τραχεία υφή του δεν εξασφαλίζει μία ομαλή επιφάνεια κίνησης. Κατά συνέπεια, για την ασφαλή και ομαλή κυκλοφορία των οχημάτων είναι αναγκαία η κατασκευή *οδοστρώματος*, δηλαδή μίας πολυστρωματικής δομής από υλικό ανώτερης ποιότητας που παρεμβάλλεται ανάμεσα στο φυσικό έδαφος και στην επιφάνεια κυκλοφορίας. Πρόκειται για μία σύνθετη κατασκευή που καλείται να επιτελέσει ένα σύνολο λειτουργιών, ανόμοιων μεταξύ τους. Το γεγονός αυτό καθιστά τη μελέτη των οδοστρωμάτων αρκετά πολύπλοκη.

Γενικά, ο ρόλος του οδοστρώματος είναι να μεταφέρει στο έδαφος αισθητά μειωμένες τις τάσεις που προκαλούνται από την κυκλοφορία και να εξασφαλίζει την απαιτούμενη ποιότητα κύλισης των οχημάτων για όλο το χρονικό διάστημα λειτουργίας του. Επιπροσθέτως, άξια αναφοράς είναι η προστασία που παρέχει το οδόστρωμα στο έδαφος έναντι των καιρικών επιδράσεων.

Αναλυτικότερα, για να θεωρηθεί ότι ένα οδόστρωμα υλοποιεί το σκοπό λειτουργίας του, οφείλει να εγγυάται:

- Τη μετάδοση στο έδαφος των φορτίων των διερχόμενων οχημάτων απομειωμένων σε τέτοιο βαθμό, ώστε να αποτρέπεται η ανάπτυξη μόνιμων παραμορφώσεων.
- Τη δομική επάρκεια του ίδιου του οδοστρώματος έναντι των επαναλαμβανόμενων καταπονήσεων της κυκλοφορίας και του περιβάλλοντος (αποφυγή ρηγματώσεων, παραμορφώσεων, αποφλοιώσεων).
- Την προστασία του εδάφους θεμελίωσης του οδοστρώματος (στρώση έδρασης) από τις επιδράσεις του περιβάλλοντος (παγετός, βροχή), οι οποίες συνεπάγονται απώλεια της φέρουσας ικανότητας και μόνιμες παραμορφώσεις.
- Τη διατήρηση ενός ελάχιστου επιτρεπόμενου επιπέδου αντιστοιχιστικών χαρακτηριστικών και ποιότητας κύλισης της επιφάνειας κυκλοφορίας των οχημάτων.

Στην Ευρώπη, σύμφωνα με τις Στατιστικές Οδικής Κυκλοφορίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης (European Union Road Statistics - EURF, 2015) και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission - EC, 2015), το 50% των θέσεων απασχόλησης εντοπίζεται σε δραστηριότητες που επιβάλλουν μετακινήσεις στις οδικές αρτηρίες. Κατά την περίοδο 1995-2007, οι μετακινήσεις του επιβατικού κοινού σημείωσαν αύξηση 21% και η κίνηση των εμπορευματικών οχημάτων 37%, γεγονός που ήταν σύμφωνο με την παράλληλη αύξηση του ΑΕΠ κατά 34%. Ωστόσο, η κρίση του 2008 κατέλυσε την αύξηση αυτή, κυρίως σε επίπεδο μεταφοράς αγαθών. Σήμερα, οι μεταφορές εμπορευμάτων στην Ευρώπη υποστηρίζονται από ένα οδικό δίκτυο συνολικής έκτασης 6.000.000km, αριθμός συγκρίσιμος μόνο με το μήκος του οδικού δικτύου των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής, αθροισμένο με εκείνο της Ιαπωνίας και της Ρωσίας. Η παρούσα αξία της συγκεκριμένης ευρωπαϊκής υποδομής ανέρχεται σε περισσότερο από 20δισ ευρώ. Προς το παρόν, το εν λόγω δίκτυο απαιτεί ετήσιο κόστος άνω των 10δισ ευρώ, για την κάλυψη των απαιτούμενων διαδικασιών συντήρησης και τη διασφάλιση ποιότητας υψηλών προδιαγραφών. Το 2006, προ κρίσης, η αντίστοιχη ετήσια αξία ήταν τριπλάσια (Pereira&Pais,2017).

Κάθε οδόστρωμα, ανεξάρτητα από τον τύπο του, αποτελεί σταθερά ένα από τα ακριβότερα τμήματα ενός οδικού δικτύου. Ειδικότερα, κατά τις ενέργειες συντήρησής του, το οδόστρωμα είναι το στοιχείο για το οποίο δαπανώνται τα περισσότερα χρήματα προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η επίδοσή του θα είναι και η βέλτιστη δυνατή, υπό τις εκάστοτε συνθήκες κυκλοφορίας, περιβάλλοντος και διαθεσιμότητας υλικών.

Σήμερα, ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων και των υλικών πλήρωσής τους αντανakλά ένα έντονο ζήτημα, με γνώση που αποκτήθηκε μετά από μακρά περίοδο έρευνας, εργαστηριακών πειραμάτων και εφαρμογών που έλαβαν χώρα από τη δεκαετία του 1950 και μετά. Ωστόσο, η μεταβλητότητα που εμφανίζει στο χρόνο η πλειοψηφία των παραγόντων που υπεισέρχονται στον σχεδιασμό, προϋποθέτει τη συνεχή ενημέρωση και την εξέλιξη των διαδικασιών σχεδιασμού, στοχεύοντας σε καλύτερα επενδυτικά αποτελέσματα, καθώς και στην αναβάθμιση της ποιότητας των οδικών υποδομών.

1.2 ΣΤΟΧΟΣ - ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η διερεύνηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Οι κυριότερες από αυτές είναι η κυκλοφορία, τα υλικά, το περιβάλλον και η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης. Με έμφαση στα εύκαμπτα οδοστρώματα, διερευνάται πώς οι εν λόγω παράμετροι επηρεάζουν το προϊόν σχεδιασμού, δηλαδή το οδόστρωμα. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διερεύνησή τους, σε θεωρητικό επίπεδο, υπό το πρίσμα της πιθανολογικής προσέγγισης της Γαλλικής Μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων.

Για το σκοπό αυτό, επιλέγεται μία διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος, η οποία είναι δομικά επαρκής για τις προεπιλεγμένες συνθήκες φόρτισης που προτείνει η Γαλλική Μέθοδος. Λαμβάνοντας υπόψη δύο υλικά, τέσσερις θερμοκρασίες, τρεις συχνότητες και τρεις πιθανότητες αστοχίας του οδοστρώματος (ποσοστά διακύβευσης), πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας, οι οποίες έχουν ως σημείο εκκίνησης τη δεδομένη διατομή αναφοράς. Μέσω των αναλύσεων, διαφαίνεται ο βαθμός με τον οποίο η κάθε παράμετρος μεμονωμένα επιδρά, τόσο στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων, όσο και στο δείκτη φθοράς τους.

Ειδικότερα, για τις ανάγκες της ερευνητικής διαδικασίας, οι αναλύσεις ευαισθησίας χωρίζονται σε δύο σκέλη, με κοινή αρχή τη διατομή αναφοράς. Αρχικά, το πάχος της ασφαλικής στρώσης της διατομής μεταβάλλεται με παράλληλη μεταβολή των συνθηκών φόρτισης, έτσι ώστε η διατομή να παραμένει δομικά επαρκής. Με την ανάλυση αυτή, διερευνάται ο βαθμός με τον οποίο οι υπόψη συνθήκες επηρεάζουν τα απαιτούμενα πάχη οδοστρώματος. Στη συνέχεια, το πάχος της διατομής αναφοράς παραμένει σταθερό, με τιμή που διαφοροποιείται ανάμεσα στα δύο επιλεγμένα υλικά, και η διατομή του οδοστρώματος μελετάται ως προς την εξέλιξη της φθοράς συναρτήσει της μεταβολής των συνθηκών φόρτισης. Τέλος, τα αποτελέσματα των αναλύσεων αξιολογούνται συνδυαστικά.

1.3 ΔΟΜΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται συνολικά από οχτώ κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος. Συγκεκριμένα:

Στο **2^ο κεφάλαιο** γίνεται μία εκτενής αναφορά στα εύκαμπτα οδοστρώματα. Παρουσιάζονται η τυπική διατομή τους, τα υλικά πλήρωσης των στρώσεών τους και οι συνήθεις μορφές φθοράς που εμφανίζονται σε αυτά.

Στο **3^ο κεφάλαιο** επισημαίνονται οι βασικές αρχές και οι στόχοι κατά το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, καθώς και τα κριτήρια αστοχίας των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, ενώ παρουσιάζεται και η εξέλιξη των μεθόδων σχεδιασμού στο χρόνο.

Στο **4^ο κεφάλαιο** αναπτύσσονται οι βασικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων και συγκεκριμένα η θερμοκρασία, η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης, το περιβάλλον και τα υλικά. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον τρόπο με τον οποίο τα οικονομικά κριτήρια επηρεάζουν τη λήψη αποφάσεων κατά το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων.

Στο **5^ο κεφάλαιο** γίνεται μία πρώτη εισαγωγή στη Γαλλική Μέθοδο σχεδιασμού. Μετά από την παράθεση σύντομου ιστορικού, ακολουθεί η αναφορά στις βασικές αρχές της μεθόδου, συμπεριλαμβανομένων των παραμέτρων σχεδιασμού και των κριτηρίων αστοχίας για εύκαμπτα οδοστρώματα.

Στο **6^ο κεφάλαιο** πραγματοποιούνται μελέτες ευαισθησίας ως προς τη θερμοκρασία, τη συχνότητα φόρτισης και τη διακύβευση, με θεώρηση χαρακτηριστικών διατομών εύκαμπτου οδοστρώματος σε αυτοκινητόδρομο και εφαρμογή της Γαλλικής Μεθόδου.

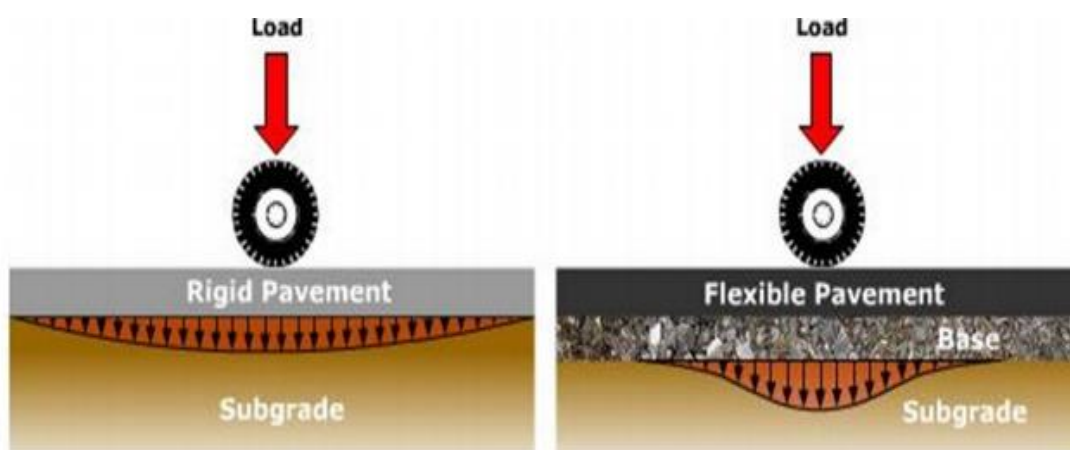
Στο **7^ο κεφάλαιο** συνοψίζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία και επισημαίνονται σημεία ενδιαφέροντος για περαιτέρω έρευνα.

Στο **8^ο κεφάλαιο** περιέχονται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές που αξιοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2. ΕΥΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Έχει εδραιωθεί η διάκριση των οδοστρωμάτων σε δύο μεγάλες κατηγορίες: στα εύκαμπτα (flexible pavements) και στα δύσκαμπτα (άκαμπτα) οδοστρώματα (rigid pavements). Στην ουσία, η βασική τους διαφορά έγκειται στον τρόπο κατανομής των τάσεων που προκαλούνται από την κυκλοφορία στη στρώση έδρασης (subgrade), η οποία συμπυκνώνεται και αποτελεί το επίπεδο έδρασης των δομικά υπερκείμενων στρώσεων του οδοστρώματος (Εικόνα 2.1).

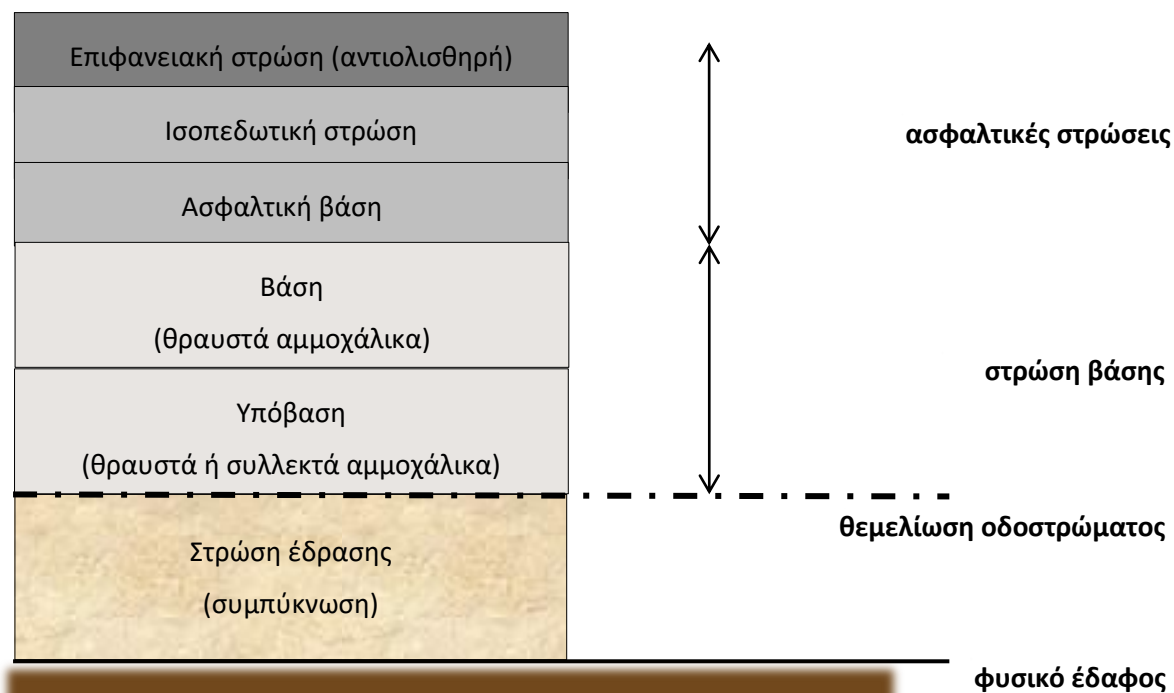


Εικόνα 2.1: Τρόπος κατανομής τάσεων σε εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα (www.pavementinteractive.org)

Στο δύσκαμπτο οδόστρωμα, εξαιτίας του μεγάλου μέτρου ελαστικότητας και της ακαμψίας που το χαρακτηρίζει, οι τάσεις κατανέμονται σχεδόν ομοιόμορφα, ενώ στο εύκαμπτο οδόστρωμα οι τάσεις που μεταβιβάζονται στη στρώση έδρασης τείνουν να είναι σημειακές. Από την παραπάνω εικόνα διαφαίνεται ότι το βάθος κατανομής των τάσεων είναι μεγαλύτερο σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα απ'ότι σε ένα δύσκαμπτο. Από το γεγονός αυτό, ανακύπτει η ανάγκη ύπαρξης πολλαπλών στρώσεων σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα, προκειμένου οι αναπτυσσόμενες τάσεις να καταλήξουν στη στρώση έδρασης εμφανώς απομειωμένες, διασφαλίζοντας με αυτό τον τρόπο την ακεραιότητά της (προστασία από την ανάπτυξη υπερβολικών μόνιμων παραμορφώσεων στην κορυφή της στρώσης έδρασης).

2.2 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ

Ο χαρακτηρισμός ενός οδοστρώματος ως εύκαμπτο οφείλεται στην ιδιότητα των επιμέρους στρώσεών του να κάμπτονται υπό την επίδραση των φορτίων της κυκλοφορίας. Οι ανώτερες στρώσεις ενός οδοστρώματος είναι άμεσα εκτεθειμένες στις κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές συνθήκες και συντίθενται από υλικά ανώτερης ποιότητας ώστε να παραλάβουν ικανοποιητικά τις μέγιστες αναπτυσσόμενες τάσεις (Adorjányi,2011). Για τις χαμηλότερες στρώσεις, όπου οι τάσεις σταδιακά μειώνονται, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά χαμηλότερης ποιότητας (και κόστους) (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος

Οι στρώσεις στα εύκαμπτα οδοστρώματα ομαδοποιούνται σε δύο τμήματα ανάλογα με τα υλικά κατασκευής τους. Το ανώτερο τμήμα είναι το τμήμα των ασφαλτικών στρώσεων, οι οποίες συγκροτούνται από επιμέρους στρώσεις. Αυτές είναι: η επιφανειακή στρώση (στρώση κυκλοφορίας), η ισοπεδωτική στρώση και η ασφαλτική βάση. Κάτω από αυτές, και σε επαφή με τη στρώση έδρασης, υπάρχει το τμήμα των στρώσεων από ασύνδετα υλικά, το οποίο περιλαμβάνει τη βάση και την υπόβαση. Οι στρώσεις βάσης και υπόβασης είθισται να εξετάζονται σαν ενιαία στρώση, αποτελούμενη εξολοκλήρου από θραυστά υλικά. Η διαφοροποίηση των υλικών καθορίζει τις διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες και συμπεριφορά των επιμέρους στρώσεων. Επομένως, κάθε επιμέρους στρώση λειτουργεί σαν

ανεξάρτητη μονάδα και συμβάλλει με μοναδικό τρόπο στην ευστάθεια του οδοστρώματος επιτελώντας διαφορετικές λειτουργίες.

Η αντοχή του οδοστρώματος είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη φύση και την κατάσταση του επιφανειακού τμήματος των ασφαλικών στρώσεων. Για το λόγο αυτό, συχνά ο όρος 'εύκαμπτα οδοστρώματα' αντικαθίσταται από το χαρακτηρισμό τους ως 'ασφαλτικά', λόγω της σύστασης του επιφανειακού τμήματος. Η πολυπλοκότητα των λειτουργιών που καλείται να επιτελέσει το συγκεκριμένο τμήμα καθιστά δεσμευτική τη μελέτη ενός φάσματος κριτηρίων πριν την επιλογή του εκάστοτε καταλληλότερου τύπου επιφανειακής στρώσης. Τα βασικότερα μηχανικά και λειτουργικά κριτήρια που οφείλει να πληρεί μία επιφανειακή στρώση είναι:

- Ανθεκτικότητα έναντι κυκλοφοριακών και καιρικών συνθηκών.
- Ομαλή και αντιολισθηρή επιφάνεια κύλισης.
- Επαρκή αντιθορυβική ικανότητα.
- Επαρκή αποστραγγιστική ικανότητα (να είναι σχεδόν αδιαπέρατη από το νερό).

Γενικά, προβλέπεται η αφαίρεση και η αντικατάσταση της επιφανειακής στρώσης κυκλοφορίας καθώς η φθορά της εξελίσσεται στο χρόνο. Ένα σωστά σχεδιασμένο και χρηματοδοτούμενο πρόγραμμα συντήρησης οφείλει να εντοπίζει άμεσα την επιφανειακή φθορά, πριν αυτή επεκταθεί στις δομικά υποκείμενες στρώσεις καταλήγοντας στην αστοχία του οδοστρώματος.

2.3 ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΦΘΟΡΕΣ

Φθορά (distress) ονομάζεται κάθε είδους ανωμαλία η οποία χειροτερεύει τις συνθήκες κύλισης των οχημάτων στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Οι φθορές είναι συγχρόνως αιτίες και αποτελέσματα, διότι οι αρχικές φθορές αποτελούν συνήθως αιτία νέων φθορών του ίδιου ή διαφορετικού τύπου. Η εξέλιξή τους είναι ταχύτατη και οδηγούν σε αστοχία, αν δεν προγραμματιστεί συντήρηση και αποκατάστασή τους.

Η φθορά οδοστρώματος είναι ατέλεια (defect) ή καταπόνηση που γίνεται αντιληπτή με απλή παρατήρηση και σχετίζεται με τον κύκλο ζωής για κάθε τύπο οδοστρώματος, για δεδομένες κυκλοφοριακές και καιρικές συνθήκες. Κάθε είδος καταπόνησης σχετίζεται με συγκεκριμένες ιδιότητες του οδοστρώματος όπως γήρανση, τριβές, εξασθένιση ή τα υλικά

Διερεύνηση παραμέτρων για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στη Γαλλική Μέθοδο

κατασκευής. Αυτού του είδους οι ατέλειες μπορεί να διαχωριστούν και να εκτιμηθούν από το ανθρώπινο μάτι ή αυτοματοποιημένες τεχνικές, σε αντίθεση με άλλου είδους ατέλειες που σχετίζονται με τα υλικά υπόβασης, την αποχέτευση ή άλλες συνθήκες (ΥΠΕΧΩΔΕ, 2002).

Συνήθως τα αίτια που οδηγούν σε φθορά σημείου ή τμήματος ενός οδοστρώματος είναι πάνω από ένα και ο συνδυασμός τους είναι αυτός που καθορίζει την τελική φθορά. Στον Πίνακα 2.1 γίνεται μία κατηγοριοποίηση των βασικότερων αιτιών φθοράς λόγω κυκλοφορίας, περιβάλλοντος, διαστασιολόγησης, ποιότητας των υλικών και των εργασιών προς εκτέλεση (Νικολαΐδης, 2011).

Πίνακας 2.1: Αίτια φθοράς ανά κατηγορία

Κυκλοφορία	Κλίμα-Περιβάλλον	Διαστασιολόγηση οδοστρώματος	Ποιότητα υλικών	Εργασίες προς εκτέλεση
Μεγάλο μέγεθος φορτίων	Ακραίες θερμοκρασίες	Υπερδιαστασιολόγηση στρώσεων	Κοκκομετρία εκτός προδιαγραφών	Ανεπαρκής συμπίκνωση
Μεγάλη διάρκεια φόρτισης	Παγετός	Υπερβολικά μικρό πάχος ασφαλτικής στρώσης	Αδρανή ανεπαρκούς αντοχής	Κακή συγκόλληση
Επαναληπτικά φορτία	Ανεπαρκής αποστράγγιση		Εσφαλμένη σύνθεση μίγματος	
Μικρό πλάτος λωρίδας κυκλοφορίας			Ανεπαρκής ανάμιξη	

Γενικά, οι φθορές των οδοστρωμάτων κατατάσσονται και εκτιμούνται ανάλογα με τον τύπο, τη σοβαρότητα και την έκταση στην οποία παρατηρούνται. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι φθορές ταξινομούνται σε τρία επίπεδα ανάλογα με το βαθμό σοβαρότητας που εμφανίζουν, ενώ η έκτασή τους μετριέται ή εκτιμάται ως ποσοστό του μήκους που εμφανίζεται το πρόβλημα επί του συνολικού μήκους του απογραφόμενου τμήματος.

Με τον όρο *σοβαρότητα* φθοράς νοείται η εκτίμηση της έντασης της φθοράς ή ο βαθμός επικινδυνότητας που ενέχει. Οι φθορές ανάλογα με την ένταση που εμφανίζουν κατάσσονται σε χαμηλού, μεσαίου και υψηλού βαθμού σοβαρότητας. Με τον όρο *έκταση* φθοράς νοείται η ποσοτική εκτίμηση του μεγέθους της φθοράς.

Σύμφωνα με το Strategic Highway Research Program 1993, υπάρχουν διάφοροι τύποι φθορών εύκαμπτων οδοστρωμάτων που μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες:

- τις ρηγματώσεις
- τις παραμορφώσεις
- τις αποσαθρώσεις
- τη λείανση της επιφάνειας κύλισης

Οι αποσαθρώσεις και η λείανση της επιφάνειας κύλισης συνδέονται με το λειτουργικό χαρακτήρα του οδοστρώματος καθώς εμφανίζονται και αναπτύσσονται αποκλειστικά στην επιφανειακή στρώση (Poudel,2015). Αντιθέτως, οι ρηγματώσεις και οι παραμορφώσεις είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τα δομικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος. Για το λόγο αυτό, ο σχεδιασμός των οδοστρώματων προσανατολίζεται στον περιορισμό της εμφάνισης αυτών των ειδών φθοράς, οι οποίες μειώνουν το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων και επηρεάζουν την αντοχή του οδοστρώματος.

Οι ρηγματώσεις της ασφαλικής επιφάνειας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος οφείλονται στη συνδυασμένη δράση κυκλοφοριακών και περιβαλλοντικών παραγόντων. Η εμφάνιση ρηγματώσεων σε ένα τμήμα της οδού σηματοδοτεί την έναρξη της διαδικασίας επιδείνωσης της κατάστασης του οδοστρώματος. Στις περιπτώσεις όπου η ρηγμάτωση ξεκινάει από την επιφάνεια, το οδόστρωμα εξασθενεί και επιτρέπει τη διέλευση νερού μέσω των ρωγμών στις δομικά υποκείμενες στρώσεις του, προκαλώντας περαιτέρω φθορά και μεγαλύτερη ρηγμάτωση (top-down cracking). Σε άλλες περιπτώσεις, η ρηγμάτωση ξεκινάει από τις υποκείμενες στρώσεις και προοδευτικά επεκτείνεται προς την επιφάνεια (bottom-up cracking). Στην προκειμένη, οι ρηγματώσεις είναι αποτέλεσμα δομικής ανεπάρκειας των στρώσεων της βάσης και της υπόβασης. Οι ρωγμές του οδοστρώματος σταδιακά αυξάνονται σε έκταση, σοβαρότητα και συχνότητα και οδηγούν στην αποσύνθεση της επιφάνειας του οδοστρώματος (αλιγατορικές ρηγματώσεις). Γενικά, οι ρηγματώσεις αποτελούν μία πολύ συνηθισμένη φθορά του οδοστρώματος, η οποία λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού διότι αποτελεί ένδειξη της κατάστασης του οδοστρώματος.

Οι παραμορφώσεις είναι αποτέλεσμα ανάπτυξης διαφορικών καθιζήσεων στις επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος. Η ανάπτυξη υπερβολικών μόνιμων παραμορφώσεων οδηγεί το οδόστρωμα σε αστοχία. Στις περιπτώσεις μάλιστα που η ύπαρξη παραμορφώσεων συνδυαστεί με την ύπαρξη ρηγματώσεων, ενώ το οδόστρωμα εξακολουθεί να εκτίθεται

Διερεύνηση παραμέτρων για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στη Γαλλική Μέθοδο

στην κυκλοφορία, τότε η διάρκεια ζωής του μειώνεται σημαντικά και καθίσταται επιτακτική ανάγκη η άμεση αποκατάσταση ή συντήρησή του. Γενικά, οι παραμορφώσεις του οδοστρώματος λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό, διότι αποτελούν ένδειξη προβλήματος στη γεωτεχνική υποδομή.

3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων συνίσταται στον υπολογισμό του πάχους της κάθε στρώσης, οι οποίες σαν σύνολο συνθέτουν το οδόστρωμα (Νικολαΐδης, 2012). Σκοπός της διαστασιολόγησης είναι ο σχεδιασμός του οδοστρώματος με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξυπηρετεί αποτελεσματικά το σύνολο της κυκλοφορίας καθ'όλη τη διάρκεια λειτουργίας του, λαμβάνοντας υπόψη τις εκάστοτε κυκλοφοριακές και περιβαλλοντικές συνθήκες.

Ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία του κύκλου ζωής μιας οδικής υποδομής. Οι μελέτες των μηχανικών αναφορικά με το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων έχουν παγιώσει την αντίληψη ότι πρόκειται για έναν κλάδο δυναμικό, υπό την έννοια ότι καθώς με την πρόοδο των επιστημών νέες μέθοδοι και υλικά γνωστοποιούνται, η εγκυρότητα των ως τότε διαδικασιών σχεδιασμού κρίνεται αμφισβητήσιμη. Ωστόσο, οι βασικές αρχές σχεδιασμού παραμένουν αναλλοίωτες και άρρηκτα συνδεδεμένες με πολιτικά, οικονομικά, τεχνικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά ζητήματα.

Η προστασία της στρώσης έδρασης είναι καίριας σημασίας στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Τα φορτία της κυκλοφορίας έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσεων και παραμορφώσεων στις επιμέρους στρώσεις ενός οδοστρώματος. Τα εν λόγω ενταντικά μεγέθη πρέπει να καταλήγουν στη στρώση έδρασης απομειωμένα προς αποφυγή ενδεχόμενης αστοχίας της. Βασική προϋπόθεση του σχεδιασμού είναι, επομένως, η μελέτη των εδαφών και των υλικών οδοστρωσίας, ώστε να εκτιμηθεί η συμπεριφορά τους σε φόρτιση. Για το λόγο αυτό, θεμελιώδεις γνώσεις της εδαφομηχανικής κρίνονται απαραίτητες.

Στα πρώτα στάδια της εξέλιξης, ο σχεδιασμός των οδοστρωμάτων βασιζόταν στην τήρηση εμπειρικών κανόνων. Η εμπειρική προσέγγιση ξεκίνησε κατά τη διάρκεια του Δεύτερου Παγκοσμίου Πολέμου και αποτέλεσε την κύρια προσέγγιση στο σχεδιασμό για τρεις περίπου δεκαετίες. Σε αυτό το διάστημα, πολλές Υπηρεσίες χρησιμοποιούσαν

τυποποιημένες διατομές για τις περισσότερες οδούς - μία πρακτική που συχνά βασιζόταν σε οικονομικά κριτήρια. Αρχές της δεκαετίας του 1950, παρατηρείται αύξηση της κυκλοφορίας των βαρέων οχημάτων με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται φθορές στην πλειοψηφία των οδοστρωμάτων. Η ακαταλληλότητα των τυποποιημένων διατομών έναντι του διαρκώς αυξανόμενου κυκλοφοριακού φόρτου, κατέστησε επιτακτική την ανάγκη εκτενούς έρευνας για τη μελέτη των οδοστρωμάτων υπό διαφορετικές συνθήκες φόρτισης.

Μετά από 30 χρόνια χρήσης εμπειρικών μεθόδων, οι Dormon και Metcalf (1965) επιχείρησαν μία μηχανιστική - εμπειρική προσέγγιση στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Εισάγωντας τη θεωρία του Burmister σε διάφορα λογισμικά, υπολόγισαν τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη (τάσεις και παραμορφώσεις) ως συνάρτηση των ιδιοτήτων των υλικών, του πάχους των στρώσεων και των συνθηκών φόρτισης. Εν συνεχεία, συσχέτισαν τις μετρήσεις τους με την πραγματική συμπεριφορά του οδοστρώματος στο πεδίο, ενέργεια που δικαιολογεί το εμπειρικό μέρος της μεθόδου.

3.2 ΕΝΤΑΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ – ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

Ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων τάσεων και παραμορφώσεων είναι καταλυτικό στάδιο της διαδικασίας του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων κι επιτυγχάνεται με διάφορες θεωρίες, αναλόγως του αριθμού των στρώσεων που συνθέτουν το οδόστρωμα.

Η ανάλυση των εντατικών μεγεθών σε ιδεατές μάζες βασίζεται στη θεωρία του Boussinesq που αρχικά αφορούσε ένα ομογενές, ισότροπο και ελαστικό μέσο, με ένα φορτίο στην επιφάνειά του συγκεντρωμένο σε ένα σημείο (Yoder&Witczak,1975). Σύμφωνα με τον τύπο του Boussinesq, η κατακόρυφη τάση σε οποιοδήποτε βάθος κάτω από την επιφάνεια της γης, που οφείλεται σε ένα συγκεντρωμένο φορτίο στην επιφάνεια, είναι:

$$\sigma_z = k \frac{P}{z^2} \quad (3.1)$$

όπου,

$$k = \frac{3}{2\pi} \times \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}} \quad (3.2)$$

Οι βασικές παραδοχές της θεωρίας του Boussinesq είναι:

- Το φορτίο δεν είναι σημειακό αλλά κατενέμεται σε μία ελλειπτική επιφάνεια.

- Η μεταβολή των τάσεων ακολουθεί το ίδιο γενικό πρότυπο.
- Η κατακόρυφη τάση που προκύπτει από ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο κυκλικό φορτίο μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση του Boussinesq.

Ειδικότερα, η εξίσωση που αντιστοιχεί στην κατακόρυφη τάση κάτω από το κέντρο εφαρμογής του φορτίου είναι:

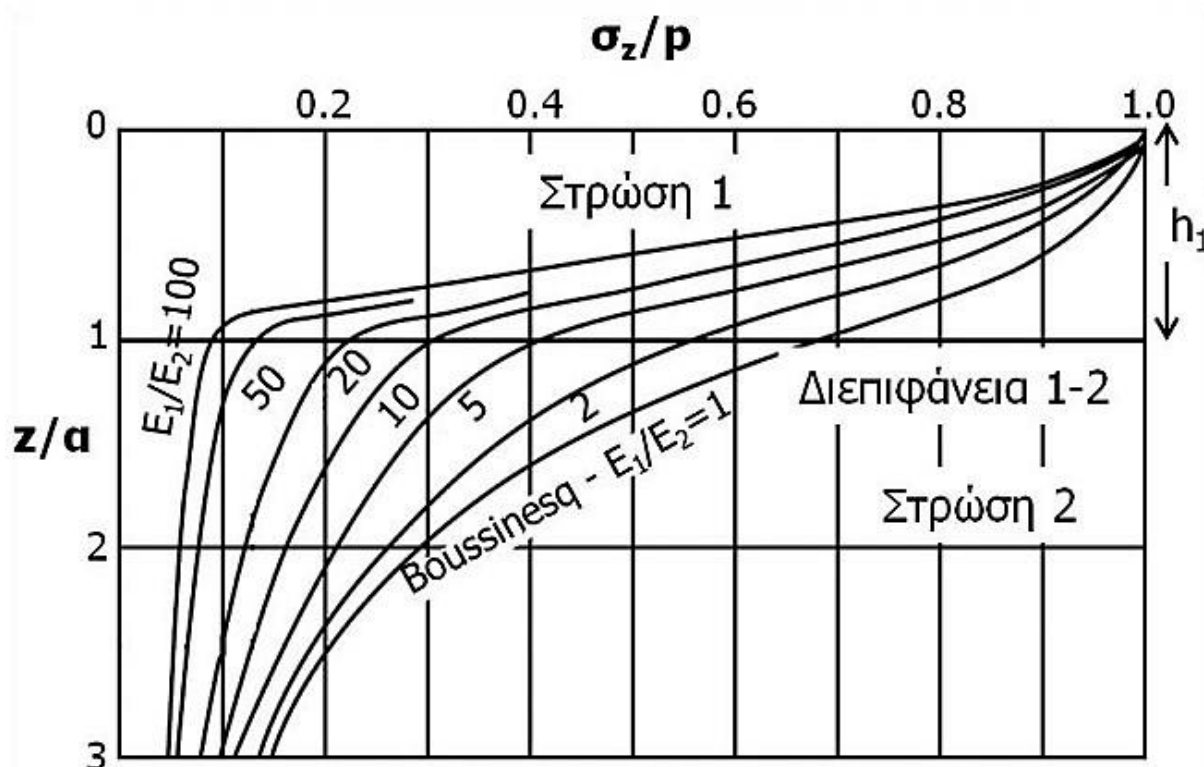
$$\sigma_z = p \left[1 - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \right] \quad (3.3)$$

Σαράντα χρόνια μετά την ανάπτυξη της θεωρίας του Boussinesq, ο Westergaard ανέπτυξε τη δική του θεωρία για τον υπολογισμό των τάσεων σε σύστημα των δύο στρώσεων, από τις οποίες η πρώτη στρώση ήταν κατασκευασμένη από σκυρόδεμα (Νικολαΐδης, 2011). Αν και δεν κάλυπτε την περίπτωση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, αποτέλεσε τη βάση για την ανάπτυξη θεωριών αναφορικά με τα εύκαμπτα οδοστρώματα δύο στρώσεων. Ένας από τους ερευνητές που ανέπτυξε τις θεωρίες υπολογισμού των τάσεων και των παραμορφώσεων σε εύκαμπτα οδοστρώματα δύο στρώσεων ήταν ο Burmister.

Οι βασικές παραδοχές της θεωρίας του Burmister είναι:

- Το υλικό κάθε στρώσης θεωρείται ελαστικό, ομογενές και ισότροπο.
- Η πρώτη στρώση έχει απεριόριστες διαστάσεις στο οριζόντιο επίπεδο και πεπερασμένες στο κάθετο επίπεδο.
- Η τελευταία στρώση έχει απεριόριστες διαστάσεις και στα δύο επίπεδα.
- Η πάνω επιφάνεια της ανώτερης στρώσης δεν υφίσταται καμία άλλη οριζόντια ή κατακόρυφη φόρτιση, πλην της κυκλοφορίας.
- Η τιμή της κατακόρυφης τάσης εξαρτάται από το λόγο αντοχής των στρώσεων E_1/E_2 , όπου E_1 και E_2 είναι οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας της ανώτερης και της κατώτερης στρώσης αντίστοιχα.

Η Εικόνα 3.1 που παρατίθεται παρουσιάζει την απομείωση των τάσεων, η οποία εξαρτάται από το λόγο των μέτρων ελαστικότητας E_1/E_2 .



Εικόνα 3.1: Αντιστοίχιση κατακόρυφων τάσεων – πιέσεων επαφής κατά Burmister

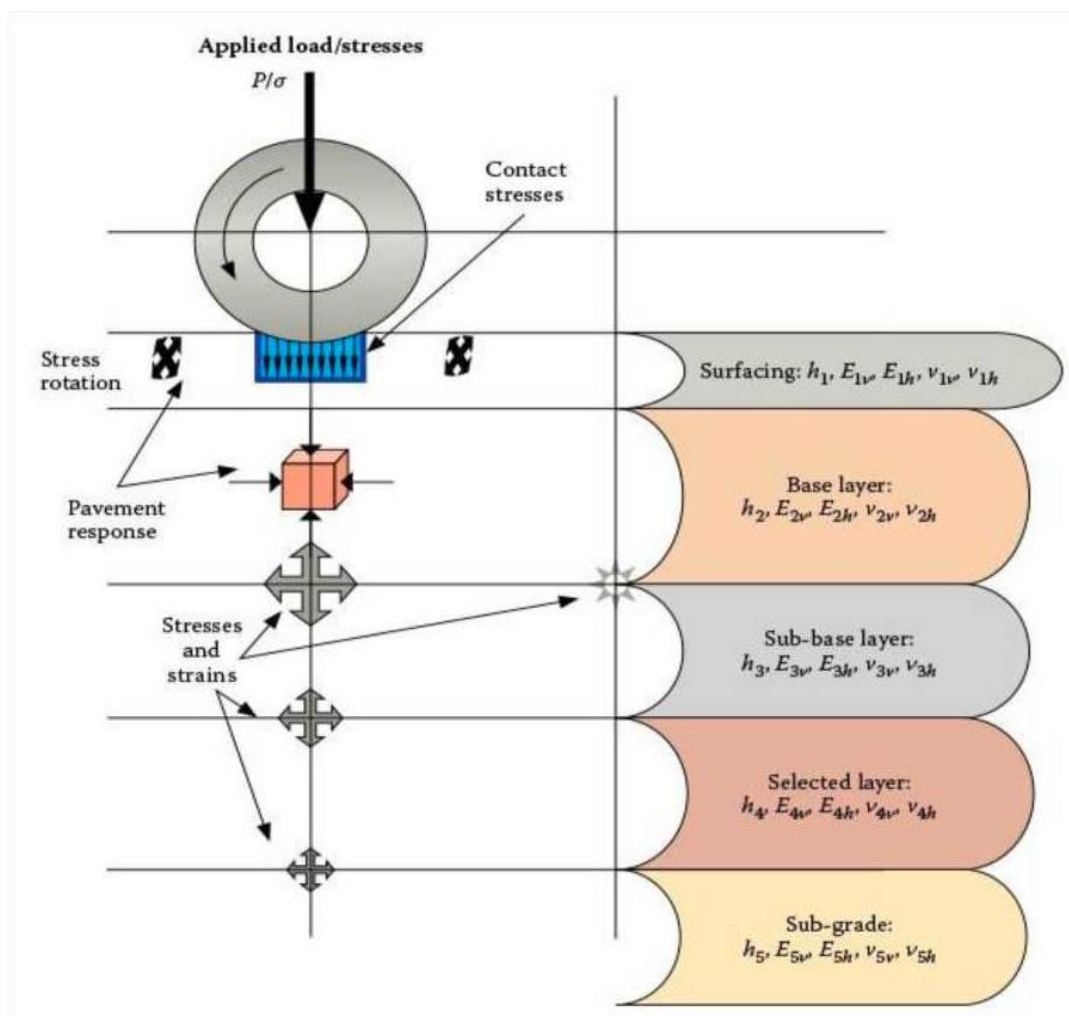
Για παράδειγμα, για $a/h_1=1$ και $E_1/E_2=1$, η κατακόρυφη τάση σ_z στη διεπιφάνεια αντιστοιχεί σε ποσοστό 65% της πίεσης επαφής ενώ για $a/h_1=1$ και $E_1/E_2=100$ το ανάλογο ποσοστό είναι 8%. Αποδεικνύεται επομένως ότι οι κατακόρυφες τάσεις θα μειωθούν αισθητά με την αύξηση του λόγου E_1/E_2 .

Αν και υπάρχουν διάφορες μέθοδοι σχεδιασμού οδοστρωμάτων, μεγάλη έμφαση έχει δοθεί από πολλούς μηχανικούς στη χρήση της γραμμικής θεωρίας ελαστικότητας πολλαπλών στρώσεων (Yoder&Witczak,1975). Τα εν λόγω συστήματα αφορούν τις περιπτώσεις όπου στο οδόστρωμα υπάρχουν περισσότερες από δύο επιμέρους στρώσεις, προσομοιάζοντας με αυτόν τον τρόπο την πραγματική κατάσταση των οδοστρωμάτων. Ένα τυπικό εύκαμπτο οδόστρωμα υπάγεται σε αυτή την κατηγορία (Εικόνα 3.2).

Οι βασικές παραδοχές της θεωρίας ελαστικού συστήματος πολλαπλών στρώσεων είναι:

- Ομοιογένεια στρώσεων. Διαφορετικά σημεία που ανήκουν στην ίδια εδαφική στρώση έχουν κοινές ιδιότητες.
- Κάθε στρώση - πλην της κατώτερης - θεωρείται πεπερασμένου πάχους, ενώ όλες εκτείνονται άπειρα πλευρικά.

- Κάθε στρώση είναι ισότροπη, δηλαδή η ιδιότητα σε ένα σημείο είναι ίδια σε κάθε διεύθυνση και προσανατολισμό.
- Στις διαχωριστικές επιφάνειες των στρώσεων αναπτύσσεται πλήρης τριβή.
- Δεν υπάρχουν διατμητικές δυνάμεις στην επιφάνεια.
- Οι λύσεις των τάσεων χαρακτηρίζονται από δύο ιδιότητες του υλικού για κάθε στρώση: του λόγου Poisson μ και του μέτρου ελαστικότητας E .



Εικόνα 3.2: Εντατικά μεγέθη σε εύκαμπτο οδόστρωμα (Journal of the South African Institution of Civil Engineering)

Με την αύξηση του αριθμού των στρώσεων, οι δυσκολίες υπολογισμού των τάσεων και των παραμορφώσεων πολλαπλασιάζονται με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν νομογραφήματα ή πίνακες που να καλύπτουν τις ανάγκες του σχεδιασμού. Η εμφάνιση των ηλεκτρονικών υπολογιστών έδωσε τη δυνατότητα υπολογισμού των αναπτυσσόμενων εντατικών μεγεθών μέσω ειδικών λογισμικών, όπως το BISAR που αναπτύχθηκε από την Shell στις αρχές του 1970 και το DAMA από το Ινστιτούτο Ασφάλτου των ΗΠΑ.

Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη βάσει της θεωρίας ελαστικού συστήματος πολλαπλών στρώσεων έχουν ως εξής:

Τάσεις

- Σε κάθε σημείο μίας οποιασδήποτε στρώσης αναπτύσσονται 9 τάσεις, 3 εκ των οποίων είναι ορθές ($\sigma_z, \sigma_r, \sigma_t$) και οι υπόλοιπες 6 είναι διατμητικές τάσεις ($\tau_{rz}=\tau_{zr}, \tau_{rt}=\tau_{tr}, \tau_{tz}=\tau_{zt}$).
- Σε κάθε σημείο του συστήματος υπάρχει ένας ορισμένος προσανατολισμός του στοιχείου τέτοιος ώστε οι διατμητικές τάσεις που ενεργούν σε κάθε έδρα να είναι μηδενικές.

Κάτω από αυτές τις συνθήκες οι ορθές τάσεις χαρακτηρίζονται σαν κύριες με σ_1 τη μέγιστη, σ_2 την ενδιάμεση και σ_3 την ελάχιστη τιμή τάσης.

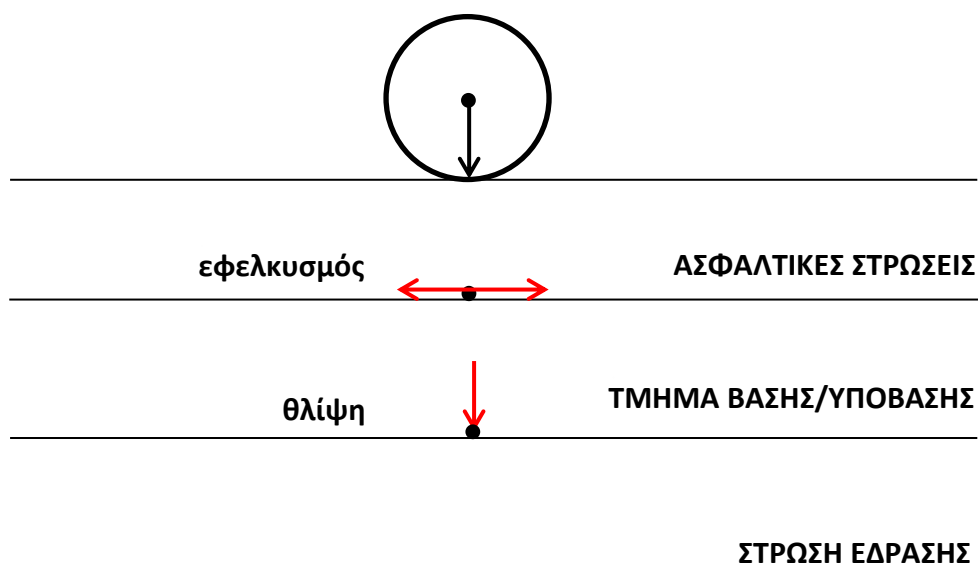
Παραμορφώσεις

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_t)] \quad (3.4)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu(\sigma_t + \sigma_z)] \quad (3.5)$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} [\sigma_t - \mu(\sigma_r + \sigma_z)] \quad (3.6)$$

Η διαδικασία του σχεδιασμού των εύκαμπτων οδοστρωμάτων πλέον εστιάζει στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη σε δύο θέσεις, οι οποίες ονομάζονται κρίσιμες θέσεις αστοχίας (Εικόνα 3.3).



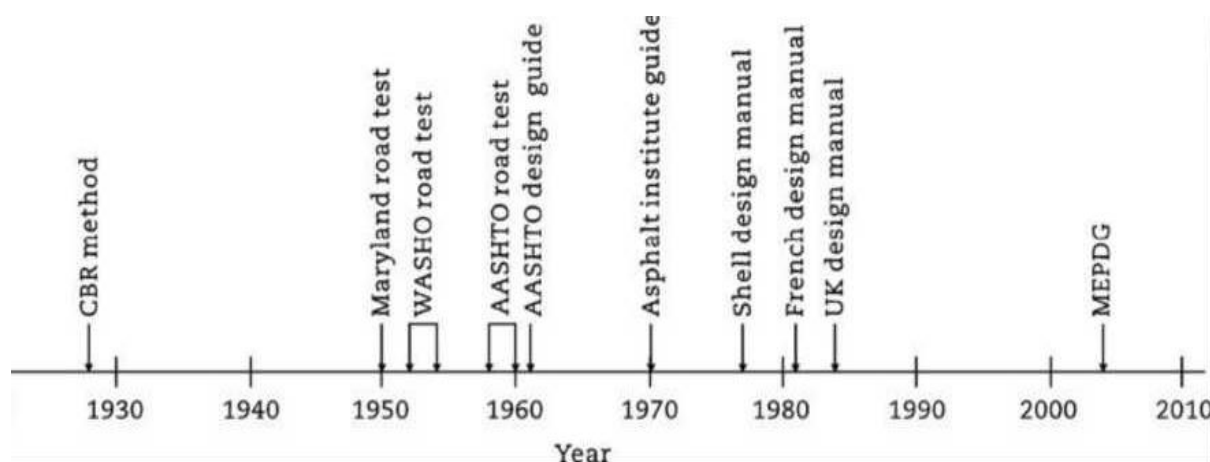
Εικόνα 3.3: Κρίσιμες θέσεις αστοχίας εύκαμπτου οδοστρώματος

Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη είναι, επομένως, η ανάπτυξη οριζόντιων εφελκυστικών τάσεων στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και η ανάπτυξη κατακόρυφων θλιπτικών τάσεων στην κορυφή της στρώσης έδρασης. Για να θεωρηθεί ένα οδόστρωμα δομικά επαρκές, η τιμή των αναπτυσσόμενων τάσεων στις κρίσιμες θέσεις του δεν πρέπει να υπερβεί τη μέγιστη τιμή των τάσεων που μπορεί να παραλάβει το δεδομένο οδόστρωμα χωρίς να αστοχήσει. Για το λόγο αυτό, θεωρείται ότι η διάρκεια ζωής ενός οδοστρώματος είναι στην ουσία η διάρκεια ζωής των κρίσιμων θεσεών του.

3.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

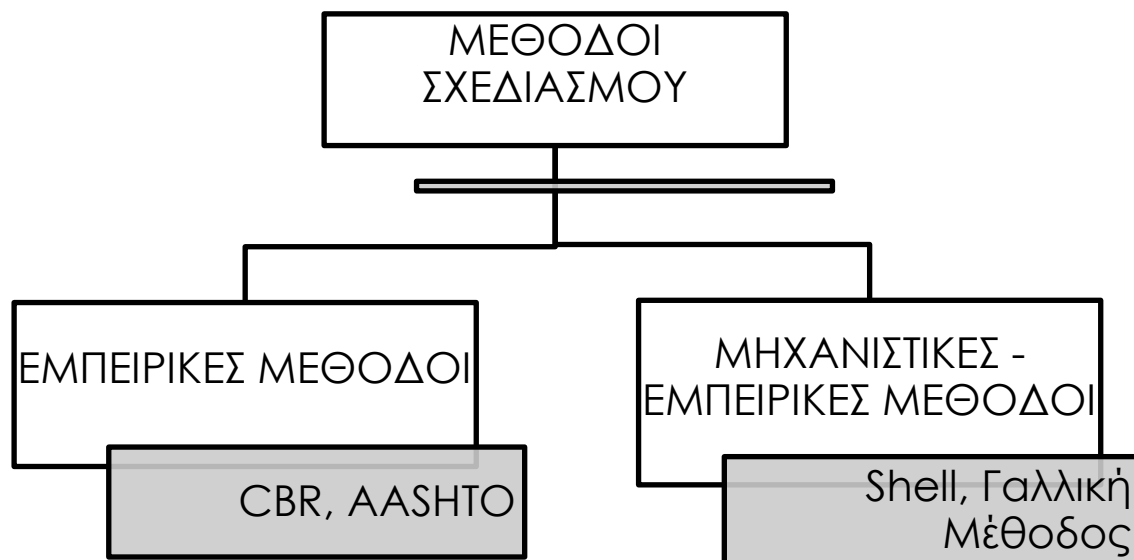
Παρά το γεγονός ότι οι ευρέως αποδεκτοί παράγοντες που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων έχουν καθιερώσει έναν κοινό άξονα αναφοράς στο σώμα των μηχανικών επί μισό αιώνα περίπου, είναι γεγονός ότι στην πράξη υπάρχουν διαφορές ανάμεσα στον τρόπο δράσης κάθε μηχανικού, δηλαδή στη διαδικασία που θα επιλέξει να ακολουθήσει στο σχεδιασμό. Ακόμα και για τις ίδιες παραμέτρους, η εφαρμογή διαφορετικών μεθόδων σχεδιασμού έχει σαν αποτέλεσμα διαφορετικά απαιτούμενα πάχη οδοστρώματος. Η διαφοροποίηση στις τιμές οφείλεται εν μέρει στην εμπειρική φύση των περισσότερων μεθόδων, αλλά κυρίως στην έλλειψη ακριβούς και ποσοτικής περιγραφής του τί ακριβώς είναι η φθορά του οδοστρώματος της οδού.

Η Εικόνα 3.4 συνοψίζει την εξέλιξη της διαδικασίας του σχεδιασμού, αναγράφοντας ενδεικτικά τις βασικές μεθόδους και οδικές δοκιμές που καταγράφηκαν στην ιστορία του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων.



Εικόνα 3.4: Χρονοδιάγραμμα της εξέλιξης του σχεδιασμού οδοστρωμάτων (Pereira&Pais,2017)

Οι μέθοδοι που ακολουθούνται σήμερα στο σχεδιασμό διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στις εμπειρικές (Empirical Pavement Design) και στις μηχανιστικές - εμπειρικές μεθόδους (Mechanistic - Empirical Design) (Εικόνα 3.5).

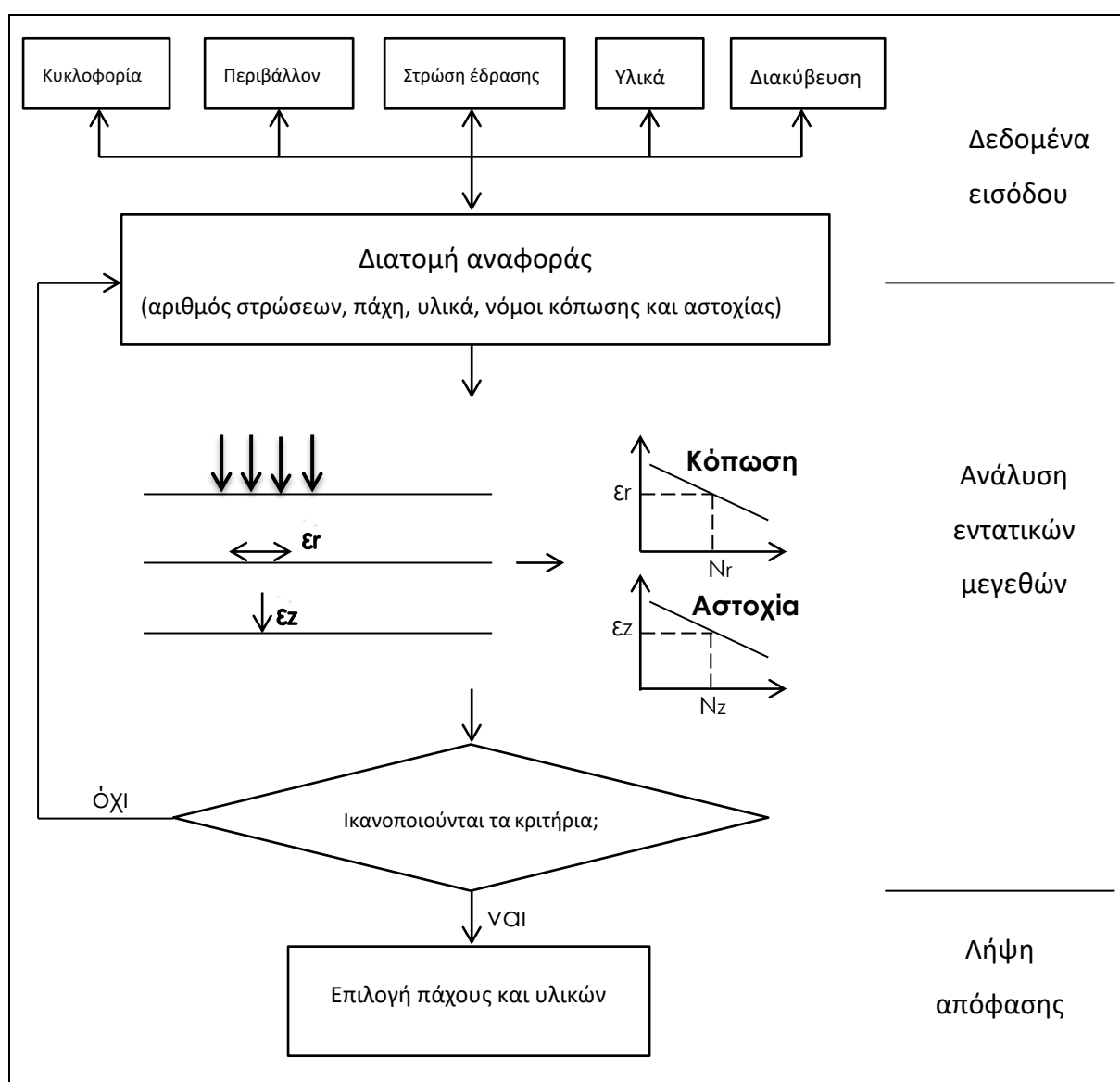


Εικόνα 3.5: Κατηγοριοποίηση μεθόδων σχεδιασμού

- **Εμπειρικές μεθοδολογίες**, είναι εκείνες που βασίζονται στα αποτελέσματα πειραμάτων ή εμπειρίας ή ακόμα και στο συνδυασμό αυτών των δύο συνιστωσών. Γενικά, χρειάζεται να πραγματοποιηθεί μία σειρά παρατηρήσεων προκειμένου να εξακριβωθεί η σχέση ανάμεσα στις παραμέτρους που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό και στη φθορά του οδοστρώματος. Οι εμπειρικές μέθοδοι είναι δυνατό να διαβαθμιστούν από απλές διαδικασίες έως και σχετικά πολύπλοκες. Στην πρώτη περίπτωση, θα χρησιμοποιηθούν μέθοδοι σχεδιασμού από τις οποίες έχουν προκύψει ικανοποιητικές δομές οδοστρωμάτων στο παρελθόν. Στη δεύτερη περίπτωση, γίνεται χρήση εμπειρικών εξισώσεων αντλούμενων από πειράματα, προσέγγιση ικανή να παρέχει περισσότερες πληροφορίες συγκριτικά με την πρώτη. Σε κάθε περίπτωση, τα απαιτούμενα πάχη των στρώσεων του οδοστρώματος υπολογίζονται πολύ εύκολα με τη χρήση νομογραφημάτων ή διαγραμμάτων. Τυπικά παραδείγματα εμπειρικών μεθόδων σχεδιασμού αποτελούν η μέθοδος CBR (California Bearing Ratio) και η μέθοδος AASHTO 1993 (American Association of State Highway and Transportation Officials).

- **Μηχανιστικές - εμπειρικές μεθοδολογίες** θεωρούνται όσες εστιάζουν στα φυσικά αίτια που προκαλούν τις τάσεις στις κρίσιμες θέσεις ενός οδοστρώματος (μηχανιστικό μέρος) και εν συνεχεία τις συγκρίνουν με τις τιμές των τάσεων που αναπτύσσει ένα οδόστρωμα ίδιου τύπου στο πεδίο (εμπειρικό μέρος) (Newcomb et al., 2001).

Η διαδικασία σχεδιασμού οδοστρωμάτων στο πλαίσιο των μηχανιστικών - εμπειρικών μεθόδων, είναι μία επαναληπτική διαδικασία αποτελούμενη από τρία μέρη: τα δεδομένα εισόδου (δηλαδή τις παραμέτρους σχεδιασμού: κυκλοφορία, περιβάλλον, στρώση έδρασης, υλικά, διακύβευση), τις δοκιμές κόπωσης και αστοχίας και τελικά τη λήψη αποφάσεων σχεδιασμού (Εικόνα 3.6).



Εικόνα 3.6: Σχεδιασμός οδοστρώματος: ένα απλοποιημένο πλαίσιο σχεδιασμού/ανάλυσης

Το μέρος των δεδομένων εισόδου της μηχανιστικής - εμπειρικής μεθόδου περιλαμβάνει πέντε παραμέτρους για τον καθορισμό μίας διατομής αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος, η οποία αποτελείται από δεδομένο αριθμό στρώσεων. Καθεμία από τις στρώσεις αυτές έχει το δικό της πάχος και χαρακτηριστικές μηχανικές ιδιότητες, εκφραζόμενες μέσω του μέτρου ελαστικότητας E (MPa) και του λόγου Poisson ν , όπως ακριβώς και στην ανάλυση μονοστρωματικών συστημάτων. Οι κυριότερες παράμετροι για τον καθορισμό της διατομής αναφοράς είναι τα κυκλοφοριακά στοιχεία και η αντοχή της στρώσης έδρασης. Οι άλλοι παράγοντες περιλαμβάνουν το περιβάλλον, τη διακύβευση και τα υλικά πλήρωσης των ασφαλικών στρώσεων ενός εύκαμπτου οδοστρώματος (Erlingsson,2018).

Το δεύτερο μέρος της διαδικασίας περιλαμβάνει τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Τα κρίσιμα εντατικά μεγέθη ενσωματώνονται στους νόμους κόπωσης και αστοχίας των ασφαλομιγμάτων, με σκοπό την εκτίμηση της φθοράς και κατ'επέκταση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος.

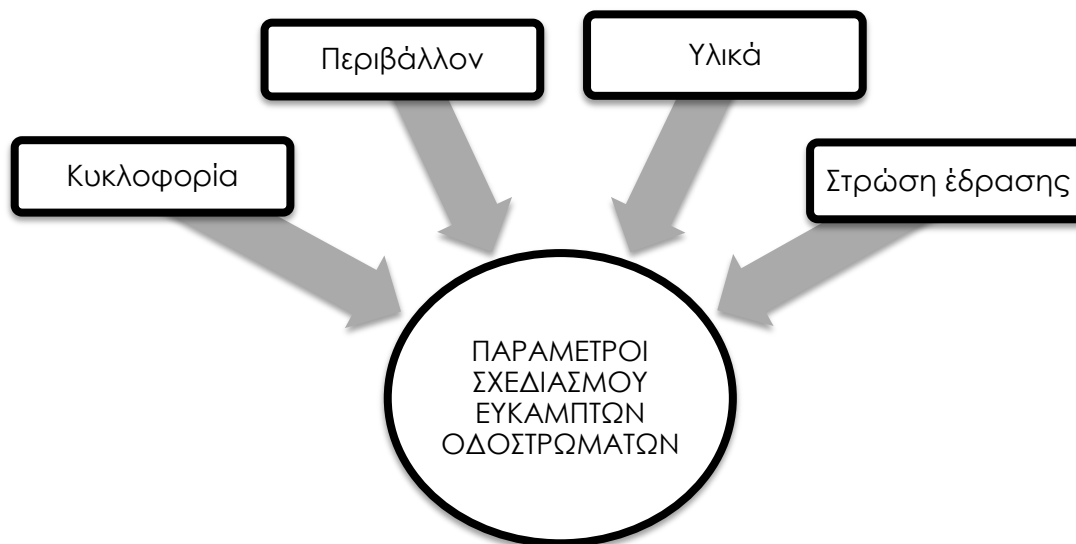
Το τρίτο μέρος περιλαμβάνει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το πάχος των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος που πρόκειται να κατασκευαστεί και την επιλογή των υλικών προς χρήση. Ο ιδιωτικός φορέας ή ο μηχανικός με βάση την κρίση τους, εξετάζουν αν ο τρόπος που αποκρίθηκε η διατομή αναφοράς στα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη είναι αποδεκτός. Αν όντως είναι αποδεκτός, οι θεωρήσεις που προηγήθηκαν (πάχη,υλικά) διατηρούνται στον τελικό σχεδιασμό του οδοστρώματος. Σε αντίθετη περίπτωση, προφανώς, ακολουθεί αναθεώρηση και πρόταση εναλλακτικών λύσεων.

Στο σημείο αυτό ανακύπτει ένα ερώτημα το οποίο θα μπορούσε να διατυπωθεί ως εξής: *‘Υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις έναντι των αρχικών παραδοχών σχεδιασμού που θα μπορούσαν να συντελέσουν στην καλύτερη απόδοση της διατομής αναφοράς με χαμηλότερο ολικό κόστος κατασκευής;’* - Ακόμα και αν οι αρχικές παραδοχές σχεδιασμού φαίνονται ικανοποιητικές, με την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων ενισχύεται η βεβαιότητα ότι η απόφαση που τελικά θα ληφθεί στο σχεδιασμό θα είναι και η βέλτιστη δυνατή.

4. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Κατά το σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων υπάρχουν τέσσερις θεμελιώδεις εξωτερικοί παράγοντες που οφείλουν να ληφθούν υπόψη έτσι ώστε το οδόστρωμα που πρόκειται να κατασκευαστεί να είναι ικανό να επιτελέσει το σκοπό λειτουργίας του (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1: Παράμετροι σχεδιασμού εύκαμπτων οδοστρωμάτων

Αρχικά η στρώση έδρασης, δηλαδή το επίπεδο πάνω στο οποίο θεμελιώνεται το οδόστρωμα, έχει άμεσο αντίκτυπο στη δομική επάρκεια του οδοστρώματος. Η αντοχή της στρώσης έδρασης καθορίζει το πάχος των επιμέρους στρώσεων. Επιπλέον, ο κυκλοφοριακός παράγοντας είναι βασική παράμετρος σχεδιασμού, διότι επιδρά τόσο στη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος (τον καθορισμό δηλαδή του πάχους των επιμέρους στρώσεων), όσο και στη σύνθεσή του. Τέλος, το περιβάλλον είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών πλήρωσης των στρώσεων. Περιβαλλοντικοί παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η υγρασία και η δράση παγετού ενδέχεται να επηρεάσουν την αντοχή του οδοστρώματος και κατ'επέκταση τη διάρκεια ζωής του.

4.2 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΚΟΣ ΦΟΡΤΟΣ

Ο κυκλοφοριακός φόρτος αποτελεί το καθοριστικότερο κριτήριο του σχεδιασμού. Αντιπροσωπεύει το μέγεθος και τη συχνότητα του επιβαλλόμενου φορτίου, δηλαδή τον αριθμό, το μέγεθος και το είδος των αξόνων των οχημάτων. Σε αρχικό στάδιο σχεδιασμού πραγματοποιείται μία αποτίμηση της κυκλοφορίας για την εκτίμηση του μελλοντικού κυκλοφοριακού φόρτου που αναμένεται να παραλάβει το υπό κατασκευή οδόστρωμα. Η πίεση επαφής, το φορτίο τροχού, τα επαναληπτικά φορτία, η διαμόρφωση των αξόνων και η ταχύτητα των οχημάτων, αποτελούν ενδεικτικά τους βασικότερους συντελεστές του κυκλοφοριακού φόρτου.

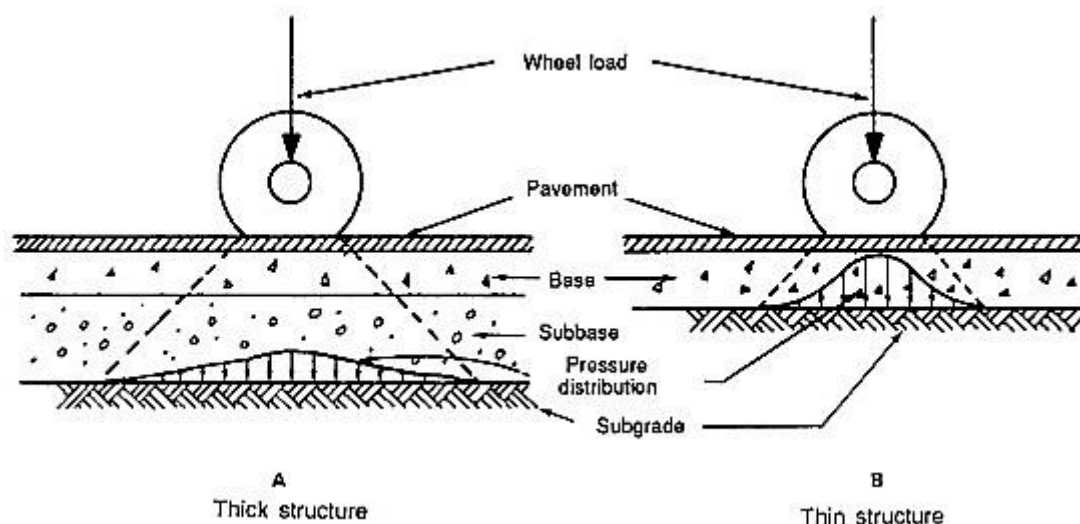
Κατά την κίνηση ενός οχήματος στην οδό, αναπτύσσεται μία πίεση ανάμεσα στο ελαστικό και στο οδόστρωμα, γνωστή ως πίεση επαφής (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2: Πίεση επαφής ελαστικών στο οδόστρωμα (Ανυροју,2016)

Για ελαστικά χαμηλής πίεσης, οι πιέσεις επαφής κάτω από το τοίχωμα του ελαστικού είναι μεγαλύτερες απ' ό τι στο κέντρο του ελαστικού. Για ελαστικά υψηλής πίεσης ισχύει το αντίστροφο (Yoder&Witczak,1975). Αν και η μορφή της επιφάνειας επαφής είναι ελλειπτική, χάριν απλούστευσης στους υπολογισμούς γίνεται θεώρηση κυκλικής επιφάνειας επαφής.

Μετά την πίεση επαφής, το φορτίο τροχού κατέχει σημαντικό ρόλο στην τελική διαμόρφωση του κυκλοφοριακού φόρτου, καθώς ορίζει το απαιτούμενο πάχος του οδοστρώματος ώστε να μην επέλθει αστοχία της στρώσης έδρασης. Το φορτίο τροχού δρα σε ένα συγκεκριμένο σημείο προκαλώντας παραμορφώσεις (Εικόνα 4.3).

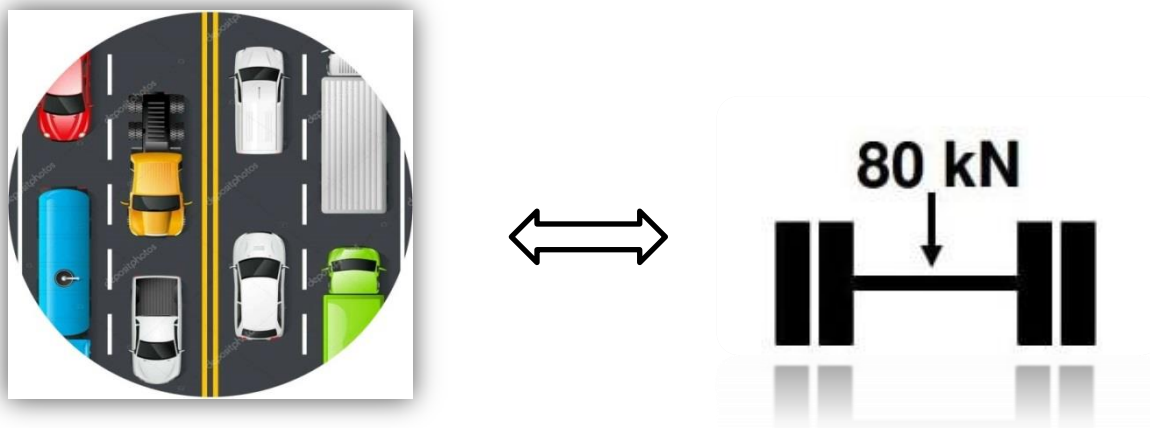


Εικόνα 4.3: Κατανομή παραμορφώσεων ισοδύναμου φορτίου μονού τροχού (*Factors influencing pavement design, theconstructor.org*)

Ωστόσο, η επιρροή της κυκλοφορίας στο οδόστρωμα δεν περιορίζεται μόνο στο μέγεθος του φορτίου των τροχών, αλλά επεκτείνεται και στη συχνότητα εφαρμογής τους. Κάθε διέλευση φορτίου προκαλεί ένα βέλος κάμψης και ως συνολική παραμόρφωση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος θεωρείται το άθροισμα αυτών των επιμέρους βελών κάμψης (Kamarudin, *Structural Design of Flexible Pavement*). Αν και η παραμόρφωση που προκαλείται από ένα φορτίο μονού τροχού στο οδόστρωμα είναι μηδαμινή, η επαναληπτική του επίδραση είναι σημαντική.

Γενικά, για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων ορίζεται ένα φορτίο αναφοράς, το οποίο κατά το οδικό πείραμα AASHTO έχει οριστεί ως το μονοαξονικό φορτίο των 8.16tn (ή 80kN) επί διπλών τροχών. Το ισοδύναμο φορτίο θεωρείται ότι επιφέρει τον ίδιο αριθμό διελεύσεων στο οδόστρωμα με εκείνον που θα προκαλούσε η σύνθεση της κυκλοφορίας (Εικόνα 4.4).

Η ισοδύναμη κυκλοφορία (**EALF** – Equivalent Axle Load Factor), όπως ορίστηκε από τον Οδηγό Σχεδιασμού AASHTO (1986), κάνει χρήση της έννοιας του ισοδύναμου αξονικού φορτίου (**ESAL** – Equivalent Single Axle Load) για τη μετατροπή της προβλεπόμενης κυκλοφορίας σε κυκλοφορία τυπικού αξονικού φορτίου αναφοράς. Η ισοδύναμη κυκλοφορία ορίζει την αναλογία μεταξύ της φθοράς που προκαλείται από τη διέλευση ενός άξονα στο οδόστρωμα και της φθοράς που προκαλείται από τη διέλευση του πρότυπου άξονα αναφοράς στο ίδιο οδόστρωμα.



Εικόνα 4.4: Ισοδύναμο φορτίο αναφοράς 8.16tn

Η τιμή της ισοδύναμης κυκλοφορίας εισέρχεται στο σχεδιασμό για τη μετατροπή ενός φάσματος οχημάτων με διαφορετικά φορτία και άξονες, σε μονούς άξονες με διπλούς τροχούς (Εξίσωση 4.1).

$$EALF = \left(\frac{P_x}{P_{80}} \right)^a, \quad (4.1)$$

όπου,

EALF: ισοδύναμη κυκλοφορία σχεδιασμού

P_x : πραγματική φόρτιση

P_{80} : ισοδύναμο φορτίο αναφοράς 80kN

a : συντελεστής ακαμψίας οδοστρώματος

Ωστόσο η εξίσωση αυτή δε λαμβάνει υπόψη τον τύπο των τροχών (μονοί, δίδυμοι ή τρίδυμοι) στον προσδιορισμό της ισοδύναμης κυκλοφορίας αλλά μόνο το συνολικό αριθμό τους.

Οι άξονες αποτελούν σπουδαίο τμήμα των οχημάτων διότι επιτρέπουν στους τροχούς να περιστρέφονται κατά την κίνηση. Στα οχήματα οι άξονες μπορεί να είναι μονοί ή δίδυμοι ή τρίδυμοι. Η ύπαρξη πολλαπλών αξόνων σημαίνει ότι το όχημα έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει μεγαλύτερο φορτίο - εδώ εντοπίζεται το σημείο όπου το αξονικό φορτίο επιδρά στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Για την προστασία των οδοστρωμάτων, όλες οι χώρες έχουν θεσπίσει μέγιστα επιτρεπτά φορτία ανά τύπο άξονα (Πίνακας 4.1).

Πίνακας 4.1: Μέγιστα αξονικά φορτία σε διάφορες χώρες

Χώρα	Μέγιστα επιτρεπτά αξονικά φορτία (τόνοι)			
	Μονός άξονας		Δίδυμος	Τρίδυμος
	Δίχως κίνηση	Με κίνηση		
Αγγλία	9 - 10 ^(α)		16 ή 20 - 26 ^(α)	Δεν καθορίζονται όρια
Αυστραλία	4.6 – 9 ^(α)		9 - 16.5 ^(α)	
Αυστρία	10	10	16	
Βέλγιο	10	13	20	
Γαλλία	13	13	21	
Γερμανία	10	10	16	
Γιουγκοσλαβία	10	10	16	
Δανία	10	10	16	
Ελλάδα	10	13	20	
Ελβετία	10 - 12 ^(α)		18	
ΗΠΑ ^(β)	9	9	15.6	
Ιαπωνία	-	10	20	
Ιρλανδία	10	10.5	11-20	
Ισπανία	13	13	21	
Ιταλία	12	12	19	
Καναδάς	4.5 - 10 ^(α)		16 - 20 ^(α)	
Λουξεμβούργο	10	13	20	
Νορβηγία	10	10	16	
Ολλανδία	10	10	18	
Πορτογαλία	-	10	16	
Σουηδία	10	10	16	
Τουρκία	13	13	19	
Φινλανδία	10	10	16	
Ευρωπαϊκή Ένωση	10	11.5	18	

^(α) Εξαρτάται από τον άξονα

^(β) Ενδεικτικά όρια, αλλάζει ελαφρώς από Πολιτεία σε Πολιτεία

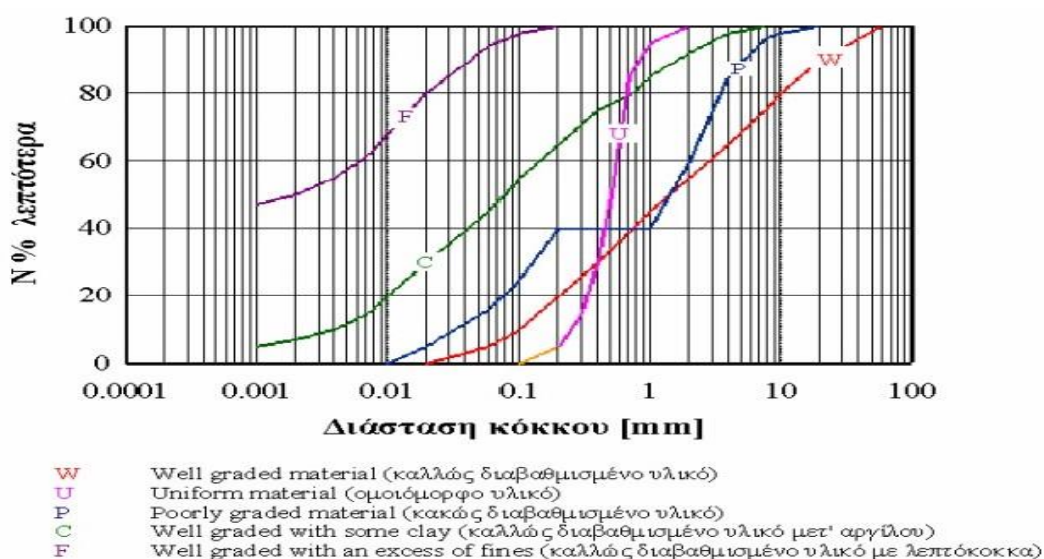
Ως προς την ταχύτητα, τα κινούμενα σε χαμηλές ταχύτητες φορτία προκαλούν μεγαλύτερη φθορά στο οδόστρωμα απ'ότι εκείνα που κινούνται σε υψηλότερες ταχύτητες. Αποτελέσματα ερευνών έχουν αποδείξει πως όταν η ταχύτητα κίνησης αυξάνεται από 2 km/h σε 4 km/h οι αναπτυσσόμενες τάσεις καταλήγουν στη στρώση έδρασης απομειωμένες κατά 40%.

4.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΡΩΣΗΣ ΕΔΡΑΣΗΣ

Γενικά η στρώση έδρασης, αλλά και ειδικότερα τα υλικά που τη συνθέτουν, επιδρούν με καθοριστικό τρόπο στη φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος που πρόκειται να

κατασκευαστεί. Μία στρώση έδρασης οφείλει να παρουσιάζει αντοχή, αποστράγγιση και κατάλληλη συμπύκνωση προκειμένου να εγγυηθεί την καλή λειτουργία του οδοστρώματος. Για το λόγο αυτό, σε αρχικό στάδιο του σχεδιασμού, απαιτείται εδαφοτεχνική μελέτη από την οποία ο μηχανικός θα λάβει επαρκείς πληροφορίες για τη σύσταση της στρώσης έδρασης, τη φέρουσα ικανότητά της και την περιεκτικότητά της σε υγρασία.

Ο πρώτος έλεγχος που διεξάγεται είναι η κοκκομετρική ανάλυση του εδάφους, δηλαδή ο καθορισμός της ποσοστιαίας κατανομής του μεγέθους των κόκκων που εμπεριέχονται στη στρώση έδρασης. Αυτή η διαδικασία αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος περιλαμβάνει την κοκκομετρική ανάλυση με κόσκινα, όπου καθορίζεται η κατανομή του μεγέθους των κόκκων του εδάφους που συγκρατούνται στο κόσκινο οπής 4.25mm (χονδρόκοκκα εδαφικά υλικά). Το δεύτερο μέρος περιλαμβάνει την κοκκομετρική ανάλυση με υδρόμετρο, όπου καθορίζεται η κατανομή των κόκκων του εδάφους που διέρχονται από το κόσκινο οπής 0.075 mm (παιπάλη). Σαν αποτέλεσμα αυτών των δύο ελέγχων προκύπτει μία κοκκομετρική καμπύλη που μας δίνει τη συνολική εικόνα της σύστασης του εδάφους (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Κοκκομετρικές καμπύλες (Βαρδουλάκης, 2004)

Ανάλογα με τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν, ο μηχανικός κρίνει το βαθμό καταλληλότητας του εδάφους, προβαίνοντας σε τυχόν ενέργειες βελτίωσης σε περίπτωση που αυτό κριθεί απαραίτητο.

Ένα έδαφος χαρακτηρίζεται ως καλώς διαβαθμισμένο όταν περιέχει μία ποικιλία μεγεθών κόκκων που αλληλοκλειδώνουν μεταξύ τους παρέχοντας μία σταθερή δομή. Αντιθέτως, ένα κακώς διαβαθμισμένο έδαφος δεν εμφανίζει ποικιλία μεγεθών κόκκων και αποτυπώνεται στο διάγραμμα με μία καμπύλη που τείνει να γίνει κατακόρυφη.

Ακολουθώς γίνεται κατάταξη των εδαφών, δηλαδή ομαδοποίησή τους σε γενικές ομάδες με σκοπό την εκτίμηση της καταλληλότητάς τους (Πίνακας 4.2).

Πίνακας 4.2: Κατάταξη εδαφών κατά AASHTO

Γενική Κατάταξη	Κοκκώδης (ή χονδρόκοκκα) εδαφικά υλικά διερχ. % από κόσκινο 0.075mm: <35							Λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά (ιλυώδη-αργιλώδη) διερχ. % από κόσκινο 0.075mm >35				
Ομάδα Κατάταξης Υποομάδες	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
	A-1-α	A-1-β		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Διερχ. % από κόσκινο 2.00 mm	50 max	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.425 mm	30 max	50 max	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0.075 mm	15 max	25 max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min	36 min
Χαρακτηριστικά (διερχ. Του 0.425 mm)												
Όριο Υδαρότητας	-		-	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	41 min
Δείκτης Πλαστικότητα	6 max		N.P.	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min ^A	11 min ^B
Συνήθεις τύποι εδαφικών υλικών	Χαλίκια, άμμος και αμμοχάλικο		Λεπτή άμμος	Ιλυώδη ή αργιλώδη αμμοχάλικα				Ιλυώδη εδάφη		Αργιλώδη εδάφη		
Καταλληλότητα ως υπέδαφος	Εξαιρετικά έως καλά							Μέτρια έως ακατάλληλα				

^AΟ Δείκτης Πλαστικότητας των υλικών της κατηγορίας A-7-5 είναι $\leq LL - 30$

^BΟ Δείκτης Πλαστικότητας των υλικών της κατηγορίας A-7-6 είναι $> LL - 30$, LL =όριο υδαρότητας

Η εν λόγω κατάταξη είναι εφικτή αφού πρώτα έχουν υπολογιστεί τα όρια Atterberg (LL :όριο υδαρότητας, PL : όριο συρρίκνωσης, SL : όριο πλαστικότητας), τα οποία περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός εδάφους ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας που εμπεριέχεται σε αυτό.

Η φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης μπορεί να εκφραστεί απλουστευτικά συναρτήσει του Καλιφορνιακού Δείκτη (CBR). Πρόκειται για μία εμπειρική προσέγγιση που ωστόσο καλύπτει ικανοποιητικά τις εκάστοτε ανάγκες του σχεδιασμού. Περιλαμβάνει μία δοκιμή διείδυσης, η οποία πραγματοποιείται είτε εργαστηριακά, υπό συνθήκες βέλτιστης υγρασίας ($Proctor$), είτε *επί τόπου* σε βάθος 60cm από την επιφάνεια της στρώσης έδρασης. Σε περίπτωση που η στρώση έδρασης είναι πολύ ασθενής και η φέρουσα ικανότητά της πολύ χαμηλή, τότε επιτυγχάνεται βελτίωση μέσω συμπύκνωσης και σταθεροποίησης του εδάφους με άλλα εδαφικά υλικά ή πρόσθετα (υδράσβεστος, τσιμέντο, άσφαλτος, γαλακτώματα) τα οποία αυξάνουν την ευστάθειά της.

Η φυσική υγρασία της στρώσης έδρασης είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για το μηχανικό, διότι από αυτήν εξαρτάται άμεσα η αντοχή του οδοστρώματος. Η ακριβής εκτίμηση του ποσοστού υγρασίας είναι δύσκολη, διότι το ποσοστό της φυσικής υγρασίας του εδάφους προκύπτει από ευμετάβλητες παραμέτρους όπως είναι η διακύμανση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, η ποιότητα του εδαφικού υλικού, η ύπαρξη ή μη έργων αποστράγγισης και προστασίας της στρώσης έδρασης και το πάχος των δομικά υπερκείμενων στρώσεων. Σε γενικές γραμμές, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό φυσικής υγρασίας της στρώσης έδρασης, τόσο πιο παραμορφώσιμο γίνεται το οδόστρωμα κατά την παραλαβή των φορτίων της κυκλοφορίας.

4.4 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Ο σχεδιασμός κάθε οδοστρώματος πρέπει να λαμβάνει υπόψη το περιβάλλον όπου αυτό κατασκευάζεται. Οι περιβαλλοντικές συνθήκες διαφέρουν σημαντικά από τόπο σε τόπο και διαφοροποιούνται με την πάροδο του χρόνου. Μάλιστα, ανάλογα με την κατηγορία του οδοστρώματος, διαφορετικός είναι ο τρόπος με τον οποίο το περιβάλλον επιδρά στη διαδικασία του σχεδιασμού (Mathew&Rao,2007). Στο πλαίσιο των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, η θερμοκρασία εξετάζεται ως προς την επίδρασή της στις μηχανικές ιδιότητες των ασφαλικών μιγμάτων, ενώ στα δύσκαμπτα οδοστρώματα το ενδιαφέρον μετατοπίζεται στις τάσεις που προκαλούνται λόγω θερμότητας στις πλάκες του σκυροδέματος. Οι κλιματικές διακυμάνσεις έχουν σημαντικό αντίκτυπο στα εδαφικά υλικά και τη στρώση έδρασης, η οποία με τη σειρά της καθορίζει τη συνολική συμπεριφορά του οδοστρώματος (βλέπε 4.3). Ως κρίσιμες παράμετροι εξετάζονται η θερμοκρασία του αέρα, η υγρασία και η δράση παγετού.

Η θερμοκρασία του αέρα επιδρά στο σχεδιασμό με δύο βασικούς τρόπους. Πρώτον, οι ακραίες θερμοκρασίες επηρεάζουν το μέτρο δυσκαμψίας της επιφανειακής στρώσης ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Σε υψηλές θερμοκρασίες το μέτρο δυσκαμψίας μειώνεται αισθητά, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος. Δεύτερον, οι εναλλαγές της θερμοκρασίας υποβάλλουν τη διαστολή και τη συστολή των ασφαλικών στρώσεων. Σε ψυχρά κλίματα, τα εύκαμπτα οδοστρώματα γίνονται ψαθυρά και συχνά εμφανίζουν εγκάρσιες ρωγμές λόγω της συνεχούς συστολής τους (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6: Ρωγμές λόγω υπερβολικής συστολής εύκαμπτου οδοστρώματος

Μικρός βαθμός διαστολής και συστολής ωστόσο, συνήθως απαντάται χωρίς εκτεταμένη φθορά, σε αντίθεση με ακραίες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας που επιφέρουν καταστροφική βλάβη.

Η υγρασία (με τη μορφή συσσωρευμένου νερού ή βρόχινου) επιδρά αρνητικά, τόσο στο σχεδιασμό και την κατασκευή των οδοστρωμάτων, όσο και στη λειτουργική τους απόδοση (Εικόνα 4.7).



Εικόνα 4.7: Επίδραση βροχής σε εύκαμπτο οδόστρωμα

Αναφορικά με το σχεδιασμό, η δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι ορισμένοι τύποι εδαφών αρχίζουν να παραμορφώνονται σημαντικά σε περιβάλλον υγρασίας. Κατά την κατασκευή, η υπερβολική βροχόπτωση σε συνδυασμό με τυχόν δυσμενή αποστράγγιση τείνουν να αυξήσουν την περιεκτικότητα της στρώσης έδρασης σε υγρασία, καθιστώντας πρακτικά αδύνατη τη διαδικασία της συμύκνωσής της. Σε επίπεδο λειτουργικών απαιτήσεων, η βροχόπτωση επιβαρύνει την ποιότητα οδήγησης διότι μειώνει την αντίσταση σε ολίσθηση (πιθανότητα υδρολίσθησης σε περιοχές με έντονες λακκούβες).

Η δράση του παγετού, αρκετά επιζήμια στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων εξαιτίας της επίδρασής της στη στρώση έδρασης, μπορεί να συναντηθεί με δύο μορφές στη φύση: με εκείνη της διόγκωσης κι εκείνη της τήξης. Η διόγκωση παγετού επιφέρει ανύψωση τμημάτων του οδοστρώματος λόγω σχηματισμού παγοκρυστάλλων στα κενά της στρώσης έδρασης ή της στρώσης βάσης. Αποτέλεσμα της διαφορικής ανύψωσης είναι ένα τραχύ, ραγισμένο οδόστρωμα (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.8: Διόγκωση λόγω δράσης παγετού(Khanna,2015)

Το φαινόμενο της διόγκωσης εμφανίζεται κυρίως σε εδάφη που αποτελούνται από λεπτά σωματίδια, συχνά ονομαζόμενα και ως εδάφη ευαίσθητα σε παγετό. Υπό την κατεύθυνση αυτή, ο βαθμός ευαισθησίας στον παγετό είναι κυρίως συνάρτηση του ποσοστού των λεπτών σωματιδίων στο έδαφος. Η τήξη είναι η ακριβώς αντίστροφη διαδικασία, κατά την οποία ο εγκλωβισμένος πάγος μετατρέπεται σε υγρό. Λόγω της χαμηλής αποστραγγιστικής ικανότητας του εδάφους, η στρώση έδρασης γίνεται λιγότερο ευσταθής και ως αποτέλεσμα μειώνεται η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα έντονο την άνοιξη (*εαρινή ρήξη*), περίοδος όπου φορτίσεις που υπό άλλες συνθήκες δε θα επιβάρυναν το οδόστρωμα, μπορούν να του προκαλέσουν σημαντική δομική φθορά.

4.5 ΥΛΙΚΑ

Τα υλικά πλήρωσης των επιμέρους στρώσεων κατέχουν έναν πολύ σημαντικό ρόλο στη διαστασιολόγηση ενός εύκαμπτου οδοστρώματος. Κατά βάση χρησιμοποιούνται τα αδρανή υλικά και τα ασφαλτικά υλικά τα οποία οφείλουν να πληρούν δύο προϋποθέσεις:

- Να είναι ανθεκτικά στη χρήση και σε βάθος χρόνου.
- Να είναι οικονομικά τόσο στην αγορά τους όσο και κατά το κόστος μεταφοράς τους.

Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των εύκαμπτων οδοστρωμάτων προέρχονται κυρίως από τη θραύση κατάλληλων πετρωμάτων, ή από φυσικές αποθέσεις ποταμών, χειμάρρων, θαλάσσης ή ορυχείων με ή χωρίς θραύση. Τα αδρανή μπορεί να προέρχονται και από σκωρίες, ή από απορρίμματα ορυχείων, ή και υλικά κατεδαφίσεων με την προϋπόθεση ότι πληρούνται οι απαιτούμενες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή υλικά και τεχνητά αδρανή, ή ανακυκλωμένα υλικά από ασφαλτόμιγμα ή από σκυρόδεμα (Νικολαΐδης,2011).

Τα αδρανή υλικά διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Τα Χονδρόκοκκα Αδρανή, τα οποία συγκρατούνται στο κόσκινο των 4.75mm κατά τις Αμερικάνικες προδιαγραφές ή 5mm κατά τις Βρετανικές προδιαγραφές.
- Τα Λεπτόκοκκα Αδρανή, τα οποία διέρχονται από το κόσκινο των 4.75mm κατά τις Αμερικάνικες προδιαγραφές ή 5mm κατά τις Βρετανικές προδιαγραφές .
- Η Παιπάλη ή Φίλλερ, η οποία διέρχεται από το κόσκινο των 75μm, δηλαδή έχει τη μορφή σκόνης.

Κατάλληλες μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες οφείλουν να χαρακτηρίζουν τα αδρανή οι βασικότερες από τις οποίες είναι:

- Κοκκομετρική σύνθεση
- Μορφή κόκκων
- Απορρόφηση νερού
- Αντίσταση σε τριβή και κρούση
- Αντίσταση σε θλίψη
- Ανθεκτικότητα σε αποσάρθρωση
- Καθαρότητα

Τα ασφαλτομίγματα που χρησιμοποιούνται στην οδοστρωσία των εύκαμπτων οδοστρωμάτων αποτελούνται από αδρανή και άσφαλτο. Η ποιότητα της ασφάλτου επηρεάζει τη συμπεριφορά του μίγματος και κατά συνέπεια υπεισέρχεται στο σχεδιασμό. Ειδικότερα, το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων καθορίζει τη συμπεριφορά των επιμέρους στρώσεων και κατ'επέκταση του συνόλου του οδοστρώματος. Ένα ασφαλτόμιγμα πρέπει να απομειώνει ικανοποιητικά τις αναπτυσσόμενες τάσεις καθώς αυτές μεταβιβάζονται στις υποκείμενες στρώσεις του οδοστρώματος. Δεδομένου ότι οι

κρίσιμες θέσεις αστοχίας σε ένα εύκαμπτο οδόστρωμα εντοπίζονται στον πυθμένα των ασφαλικών στρώσεων και στην κορυφή της στρώσης έδρασης, ένα ασφαλτόμιγμα είναι απαραίτητο να έχει επαρκή αντοχή έναντι κόπωσης και έναντι μόνιμων παραμορφώσεων. Επομένως, το μέτρο δυσκαμψίας των ασφαλτομιγμάτων αποτελεί ένδειξη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος και της φέρουσας ικανότητάς του. Για το λόγο αυτό, η επιλογή του ασφαλτομίγματος κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού είναι κρίσιμη, ώστε να εξασφαλίζει την παροχή τόσο των δομικών, όσο και των λειτουργικών χαρακτηριστικών του οδοστρώματος.

4.6 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΑΣ – ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

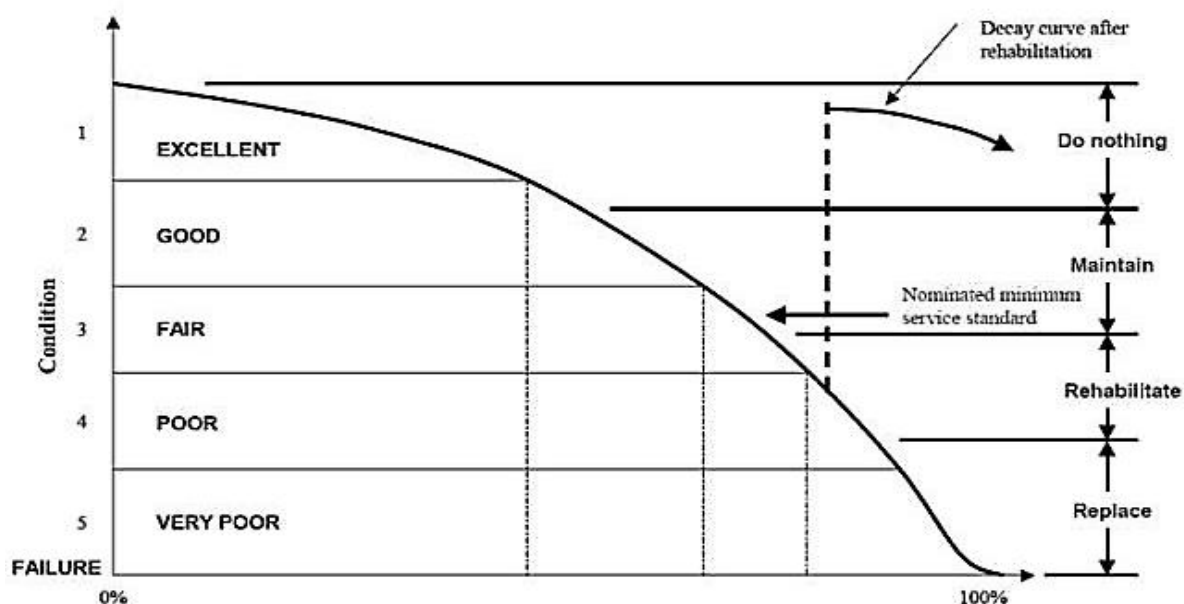
4.6.1 ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Όλα τα οδοστρώματα υποβαθμίζονται με την πάροδο του χρόνου. Ο κύκλος ζωής των οδοστρωμάτων περιγράφει την αρχική τους απόδοση, τον τρόπο μεταβολής της κατάστασής τους σε βάθος χρόνου και το πώς η διαδικασία αυτή μπορεί να επηρεαστεί από διάφορες μορφές συντήρησης, αποκατάστασης και ανασυγκρότησης.

Κατά κανόνα, η δομική και λειτουργική κατάσταση των οδοστρωμάτων επιδεινώνεται με ένα διαρκώς αυξανόμενο ρυθμό. Σε αρχικό στάδιο κατασκευής, το οδόστρωμα παραμένει σε σχετικά καλή κατάσταση. Ωστόσο, υπό την επίδραση των φορτίων της κυκλοφορίας και του περιβάλλοντος, υποβαθμίζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του οδοστρώματος κι επομένως η εξυπηρετικότητά του (Εικόνα 4.9).

Ένα από τα κρίσιμότερα ερωτήματα που καλείται να απαντήσει ένας μηχανικός είναι το εξής: *Ποιο οδόστρωμα θεωρείται τελικά ικανοποιητικό;* Παρά το βαθμό υποκειμενικότητας της απάντησης, ο στόχος του σχεδιασμού είναι πάγιος – κάθε οδόστρωμα που πρόκειται να κατασκευαστεί οφείλει να είναι ικανό να ανταπεξέλθει στην αθροιστική κυκλοφορία.

Στο πλαίσιο των προσπαθειών που έγιναν προκειμένου να περιγραφεί ποσοτικά αυτή η αναμενόμενη λειτουργία των οδοστρωμάτων, εισήχθησαν σημαντικές έννοιες. Η πρώτη από αυτές ήταν η έννοια της *λειτουργικότητας*, που ορίζεται ως η ικανότητα ενός οδοστρώματος να εξυπηρετεί την κυκλοφορία καθ' όλη την περίοδο σχεδιασμού του.



Εικόνα 4.9: Κύκλος ζωής οδοστρώματος ('Network Management – Asset Management', Transport Infrastructure Ireland)

Μικρή διαφοροποίηση παρουσιάζει η *επίδοση*, ως η ικανότητα ενός οδοστρώματος να εξυπηρετεί την κυκλοφορία για μία δεδομένη χρονική περίοδο.

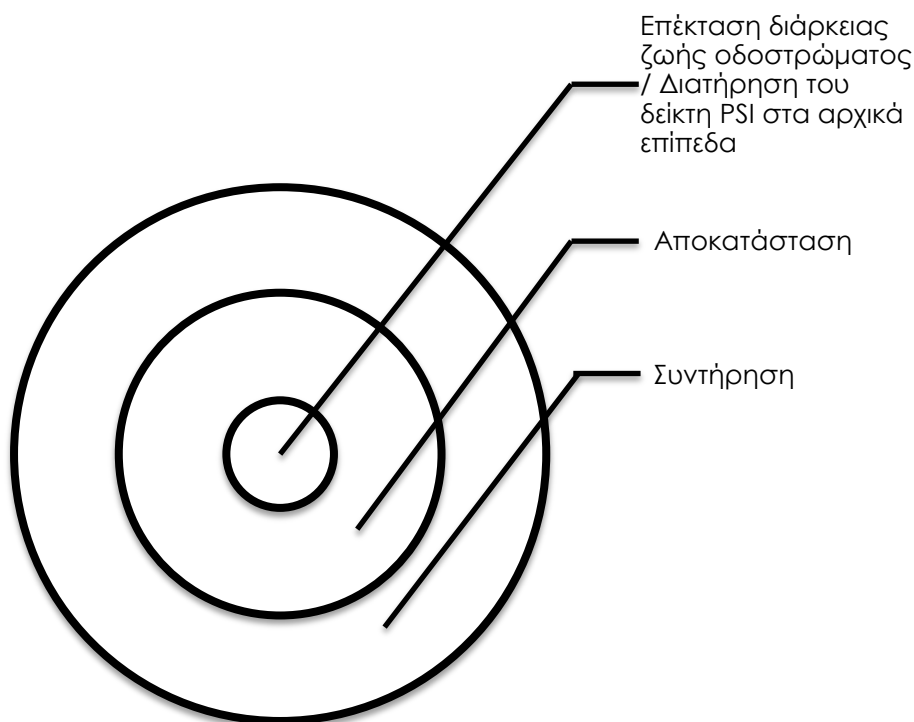
Κατά το Οδικό Πείραμα AASHO ορίστηκε ο *δείκτης παρούσας εξυπηρετικότητας* PSI με εύρος τιμών από 0 έως 5. Η τιμή 0 αντιστοιχεί σε μη βατά οδοστρώματα ενώ η τιμή 5 σε τέλεια (ιδεατά) οδοστρώματα. Οι τιμές του δείκτη παρούσας εξυπηρετικότητας καθορίζονται από μία ομάδα ατόμων που εκτελεί μετρήσεις στην επιφάνεια του εκάστοτε προς εκτίμηση οδοστρώματος. Κρισιμότερος συντελεστής είναι η τραχύτητα της επιφάνειας του οδοστρώματος, διότι αυτή καθαυτή αντανακλά το επίπεδο εξυπηρετικότητάς του με μεγάλη ακρίβεια. Η έκταση της ρηγμάτωσης και των επισκευών, και για τα εύκαμπτα οδοστρώματα ο μέσος όρος του βάθους των αυλακών που προκαλούν οι τροχοί, ενδέχεται να ληφθούν υπόψη ως δευτερεύοντες παράγοντες στον καθορισμό του δείκτη PSI (Yoder&Witczak,1975).

Ο δείκτης PSI έχει πολλές χρήσεις. Πρώτον, επιτρέπει την αξιολόγηση του οδοστρώματος με μία κοινά αποδεκτή βάση. Υπό την κατεύθυνση αυτή, ο δείκτης παρούσας εξυπηρετικότητας μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά μέσω του κύκλου ζωής του οδοστρώματος. Δεύτερον, επιτρέπει την κατάστρωση προγραμμάτων προτεραιότητας και συντήρησης με ένα λογικό τρόπο και τρίτον ο δείκτης παρούσας εξυπηρετικότητας συσχετίζει αντικειμενικές μετρήσεις οδοστρώματων με υποκειμενικές βαθμολογήσεις. Το

τελευταίο σημείο αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για το σχεδιασμό, δίνοντας στο μηχανικό τη δυνατότητα να σχηματίσει μία ιδέα για το βαθμό αυλάκωσης, ρηγμάτωσης και βλαβών. Ένα ακόμη πλεονέκτημα, είναι ότι η μέθοδος επιτρέπει αντικειμενικές μετρήσεις – το ιστορικό της επίδοσης του οδοστρώματος μπορεί να συσχετιστεί με τις μεταβολές της λειτουργικότητας με το χρόνο (Yoder&Witczak,1975).

4.6.2 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η ταυτόχρονη δράση κυκλοφοριακού φόρτου – περιβάλλοντος θα προκαλέσουν σε κάθε οδόστρωμα, ανεξάρτητα από το πόσο καλά είναι κατασκευασμένο, φθορά με την πάροδο του χρόνου. Η συντήρηση και η αποκατάσταση είναι δύο θεραπευτικές ενέργειες με στόχο την επέκταση της ζωής του οδοστρώματος (Εικόνα 4.10).



Εικόνα 4.10: Συντήρηση και αποκατάσταση στο σχεδιασμό

Ο ρόλος τους είναι διπλής σημασίας: πετυχαίνουν άμεση αναβάθμιση της κατάστασης του οδοστρώματος και επηρεάζουν το μελλοντικό βαθμό υποβάθμισής του. Σε γενικές γραμμές, η συντήρηση μπορεί να επιβραδύνει το ρυθμό υποβάθμισης του οδοστρώματος όταν περιλαμβάνει την άμεση επιδιόρθωση των φθορών που γεννά το οδόστρωμα στο αρχικό τους στάδιο, πριν δηλαδή εξελιχθούν σε δομική αστοχία. Όταν όμως οι φθορές είναι εκτεταμένες, είναι αδύνατο να αντιμετωπιστούν μέσω της συντήρησης. Σε αυτό το σημείο,

μόνο η αποκατάσταση μπορεί να δράσει αποτελεσματικά, διορθώνοντας τις σημαντικά εκτεταμένες φθορές και επιφέροντας μία βαθμιαία βελτίωση της συμπεριφοράς του οδοστρώματος.

Ειδικότερα, οι ενέργειες συντήρησης, όπως η σφράγιση ρωγμών, συντελούν στην επιβράδυνση του ρυθμού φθοράς, εντοπίζοντας και αντιμετωπίζοντας μεμονωμένα συγκεκριμένες φθορές του οδοστρώματος που συμβάλλουν στη συνολική φθορά του. Η αποκατάσταση είναι η ενέργεια επισκευής τμημάτων ενός υφιστάμενου οδοστρώματος για την επαναφορά της διαδικασίας υποβάθμισής του σε σημείο όσο το δυνατόν πλησιέστερο στην αρχική του κατάσταση. Για παράδειγμα, η αφαίρεση και η αντικατάσταση της επιφανειακής στρώσης ενός οδοστρώματος, το εφοδιάζει με νέα υλικά κι έτσι η διαδικασία φθοράς ξεκινά εκ νέου από το μηδέν.

Ενδεικτικά αναφέρεται και η περίπτωση της ανακατασκευής οδοστρώματος, η οποία ωστόσο δε θεωρείται στα όρια της αποκατάστασης αλλά μάλλον νέας κατασκευής, εφόσον οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται είναι σε γενικές γραμμές εκείνες που αναπτύχθηκαν για την κατασκευή ενός νέου οδοστρώματος.

4.6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Κάθε νέο έργο κατασκευής, ανακατασκευής, αποκατάστασης και συντήρησης οφείλει να εναρμονίζεται με ένα πλαίσιο οικονομικής αξιολόγησης. Μέσω της ανάλυσης του κύκλου ζωής των οδοστρώματων επιτυγχάνεται η διάκριση του ολικού απαιτούμενου κόστους σε αρχικό κόστος κατασκευής (ή αρχική δαπάνη) και σε κόστος συντήρησης (δαπάνη συντήρησης αντίστοιχα). Πρόκειται στην ουσία για μία κρίσιμη απόφαση σχεδιασμού που καλείται να πάρει ο μελετητής, η οποία απαιτεί πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος.

Σε γενικές γραμμές, μία υψηλή αρχική δαπάνη κατασκευής ισοδυναμεί με ένα ανθεκτικό οδόστρωμα, με επαρκή πάχη επιμέρους στρώσεων. Στην προκειμένη περίπτωση, δεν αναμένεται να παρουσιαστούν άμεσα σοβαρές φθορές και κατ'επέκταση το κόστος συντήρησης εκτιμάται χαμηλό. Αντιθέτως, μία μικρή αρχική δαπάνη εξισορροπείται από ένα δικαιολογημένα υψηλό κόστος συντήρησης ώστε το οδόστρωμα να είναι σε κάθε περίπτωση ικανό να ανταπεξέλθει στην αναμενόμενη κυκλοφορία. Για παράδειγμα, αν γίνει αποκατάσταση της επιφανειακής στρώσης με SMA (Stone Matrix Asphalt) αντί για το τυπικό

HMA (Hot Mix Asphalt), το κόστος εμφανίζεται μεν αυξημένο κατά 20%, ωστόσο η διάρκεια ζωής του οδοστρώματος παρατείνεται κατά 40% περίπου.

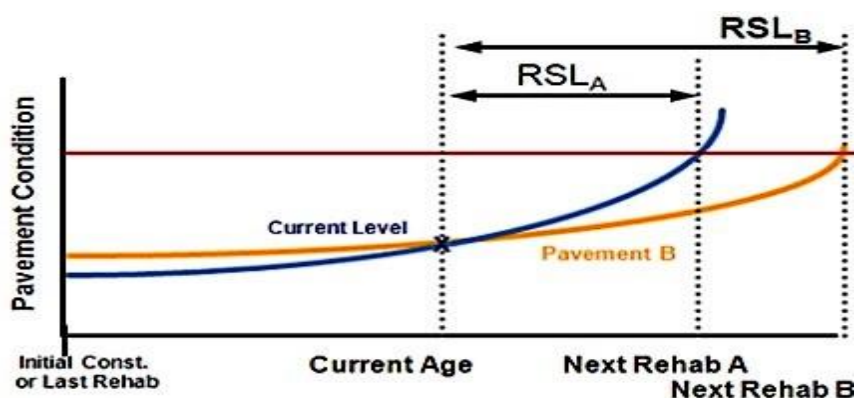
Η ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής των εύκαμπτων οδοστρωμάτων πραγματοποιείται για μία καθορισμένη περίοδο 20, 40 ή ακόμα και 50 ετών (περίοδος ανάλυσης). Τα κόστη που τυπικά λαμβάνονται υπόψη είναι (Εικόνα 4.11):



Εικόνα 4.11: Ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής των οδοστρωμάτων

- 1) Αρχικό κόστος κατασκευής.**
- 2) Κόστος συντήρησης.** Είναι το κόστος εκείνο που συνδέεται με τη διατήρηση της επιφανειακής κατάστασης του οδοστρώματος σε αποδεκτά επίπεδα.
- 3) Κόστος αποκατάστασης.** Συνήθως ισοδυναμεί με το κόστος των επιστρώσεων.
- 4) Εναπομένουσα διάρκεια ζωής οδοστρώματος.** Είναι η σχετική τιμή του οδοστρώματος που ενδέχεται να προκύψει στο τέλος της περιόδου ανάλυσης (RSL: Remaining Service Life)(Εικόνα 4.12).
- 5) Κόστος χρηστών.** Πρόκειται για τα κόστη που επιβαρύνουν τους χρήστες κατά τη διάρκεια της κατασκευής, της συντήρησης ή/και της αποκατάστασης και της καθημερινής χρήσης τμημάτων του οδοστρώματος. Περιλαμβάνουν τα έξοδα λειτουργίας των οχημάτων (πχ. ελαστικά, αέριο, πετρέλαιο) και τα έξοδα καθυστέρησης των χρηστών λόγω ενεργειών κατασκευής και συντήρησης (Paterson, 1986). Αναφορικά

με τα έξοδα λειτουργίας των οχημάτων είναι προφανές ότι θα διαφέρουν ανάμεσα σε ένα φθαρμένο οδόστρωμα και σε ένα οδόστρωμα άριστης κατάστασης.



Εικόνα 4.12: Εναπομένουσα διάρκεια ζωής οδοστρώματος (Mack&Sullivan,2013)

Όσον αφορά στα έξοδα καθυστέρησης, θα μπορούσαν για παράδειγμα να είναι απόρροια του κλεισίματος μίας οδού για συντήρηση και κατ'επέκταση της αναπόφευκτης χρήσης παρακαμπτήριας οδού.

4.6.4 ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ – ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

Η κατασκευή νέων οδοστρωμάτων αποτελεί έναν κορεσμένο κλάδο της οδοποιίας στις ανεπτυγμένες χώρες. Επομένως, ο σχεδιασμός πλέον προσανατολίζεται στη διαχείριση και την αναβάθμιση των ήδη υφιστάμενων οδοστρωμάτων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ολοκληρωμένων και συντονισμένων συστημάτων διαχείρισης, τα οποία, με προγραμματισμένες επεμβάσεις, βελτιώνουν την ποιότητα των οδών και των λειτουργικών χαρακτηριστικών τους.

Ένα σύστημα διαχείρισης οδοστρώματος είναι ένα σύνολο εργαλείων ή μεθόδων που βοηθούν τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να καθορίσουν οικονομικά αποδοτικές στρατηγικές για τη συντήρηση, την αναβάθμιση και τη λειτουργία ενός δικτύου οδών. Αναλυτικότερα, τα συστήματα διαχείρισης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό του καταλληλότερου χρόνου αποκατάστασης οδοστρώματος, της αποδοτικότερης μεθόδου και του συνολικού απαιτούμενου κόστους ώστε να διατηρηθεί σε ένα σύστημα οδοστρωμάτων το επιθυμητό επίπεδο λειτουργικότητας (WSDOT, 1994).

Από τα παραπάνω είναι προφανές ότι το κόστος που σχετίζεται με τα οδικά έργα μετατοπίζεται στη συντήρηση των οδοστρωμάτων του υπάρχοντος οδικού δικτύου. Οι

διαθέσιμοι πόροι διοχετεύονται σε θέματα συντήρησης με σκοπό την επέκταση της διάρκειας ζωής των οδοστρωμάτων πέρα από την περίοδο σχεδιασμού τους. Συνοψίζοντας, τα Συστήματα Διαχείρισης Οδοστρωμάτων προτείνουν βέλτιστες Στρατηγικές Σχεδιασμού, για την καλύτερη κατανομή των πόρων και τη διατήρηση ενός υψηλού επιπέδου εξυπηρετικότητας των οδών καθ'όλη τη διάρκεια ζωής τους.

5. ΓΑΛΛΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΣ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Μέχρι τη δεκαετία του 1950, όλα τα οδοστρώματα στη Γαλλία ήταν ουσιαστικά εύκαμπτα οδοστρώματα και ο σχεδιασμός τους κινούνταν κατά βάση σε εμπειρικό πλαίσιο. Οι Γάλλοι ερευνητές, έχοντας ως θεωρητικό υπόβαθρο την αρχή του Burmister (1943) για τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων σε πολυστρωματικά ελαστικά συστήματα (βλέπε 3.2), άρχισαν να εστιάζουν το ενδιαφέρον τους στη μηχανιστική προσέγγιση σχεδιασμού μετά το Δεύτερο Παγκόσμιο Πόλεμο. Ο De L'Hortet το 1948 επιχείρησε μία ορθολογική εξήγηση της συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων συγκρίνοντας τα πειραματικά στοιχεία της εμπειρικής μεθόδου CBR με τα εξαγόμενα αποτελέσματα της εξίσωσης του Boussinesq. Το 1959, οι Jeuffroy και Bachelez δημοσίευσαν μία σειρά γραφημάτων στα οποία εξετάζονταν η συμπεριφορά συστημάτων τριών στρώσεων σύμφωνα με μία μέθοδο όμοια με αυτή του Burmister.

Η αυξημένη καταπόνηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων έναντι των αυξανόμενων μεγάλων κυκλοφοριακών φορτίων, γέννησε την ανάγκη τροποποίησης των υλικών έτσι ώστε να εμφανίσουν μεγαλύτερη δυσκαμψία και να παρέχουν σταθερότερη δομή.

Το πρώτο μεγάλο βήμα για την τυποποίηση των υλικών προς χρήση στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων έγινε το 1971, με τον Κατάλογο Πρότυπων Δομών Οδοστρωμάτων (Catalogue of Standard Pavement Structures) που δημοσιεύτηκε από τον Οργανισμό Γαλλικών Αυτοκινητοδρόμων (French Highways Administration). Ο σχεδιασμός λαμβάνει πλέον υπόψη του δύο κριτήρια:

- Ένα ανώτατο όριο θλιπτικής τάσης στη στρώση έδρασης.
- Ένα ανώτατο όριο εφελκυστικών τάσεων στα ασφαλικά στρώματα. Οι εφελκυστικές τάσεις δε μετρούνταν άμεσα, αλλά έμμεσα μέσω της καταγραφής των παραμορφώσεων της επιφάνειας του οδοστρώματος.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας και ειδικότερα των υπολογιστών, κατέστησε ευκολότερη μία πιο ακριβή και ολοκληρωμένη ανάλυση των τάσεων και των παραμορφώσεων σε πολυστρωματικά συστήματα. Το λογισμικό ALIZE αναπτύχθηκε από την LCPC (Laboratoire

central des ponts et chaussées - Central Laboratory of Roads and Bridges) το 1964 και χρησιμοποιήθηκε συστηματικά για τον υπολογισμό των εφελκυστικών τάσεων στα ασφαλικά στρώματα, όπως καταγράφηκε στο Νέο Κατάλογο Πρότυπων Δομών Οδοστρωμάτων (Catalogue of Standard New Pavement Structures) που δημοσιεύτηκε το 1977.

Στην περίοδο που μεσολάβησε ανάμεσα στην πρώτη και τη δεύτερη έκδοση των νέων καταλόγων σχεδιασμού, εξελίσσονταν λεπτομερείς προσπάθειες κατανόησης της συμπεριφοράς των υλικών σε επίπεδο παραμορφωσιμότητας, απόκρισης σε φόρτιση και φθορά. Αν και αρκετά από τα αναγραφόμενα συμπεράσματα των δύο καταλόγων σχεδιασμού παρέμειναν αναλλοίωτα στο χρόνο, αισθητές βελτιώσεις ακολούθησαν την προσθήκη δύο επιπλέον στοιχείων:

- Η ιδέα μίας δομής οδοστρώματος η οποία λαμβάνει υπόψη τη συνεισφορά της εξυγιαντικής στρώσης (capping layer) στη μηχανική συμπεριφορά.
- Η εισαγωγή της έννοιας της *διακύβευσης* και ο υπολογισμός του πάχους των ασφαλικών στρώσεων συναρτήσει μίας συγκεκριμένης πιθανότητας αστοχίας.

Ακολούθησαν συμπληρώσεις και βελτιώσεις μέσω δύο ακόμη εγχειριδίων (Design Guide for the Strengthening of Flexible Pavements 1977 και Manual for the Design of New Low Traffic Pavements 1981). Οι βασικές αρχές στις οποίες είχε πλέον θεμελιωθεί η νέα διαδικασία σχεδιασμού δε διαφοροποιήθηκαν σημαντικά.

Η Γαλλική Μέθοδος (LCPC,1981) είναι η πιο ολοκληρωμένη μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων που χρησιμοποιείται στην Ευρώπη. Πρόκειται για μία προσπάθεια βελτιστοποίησης της σχεδιαστικής διαδικασίας, η οποία πλέον αποδεσμεύεται από τους περιορισμούς προγενέστερων εμπειρικών μεθόδων και προσανατολίζεται σε μηχανιστικά κριτήρια, εστιάζοντας στις μηχανικές ιδιότητες των υλικών (Reddy&Moorthy,2005).

Ο σχεδιασμός ενός νέου οδοστρώματος ξεκινά με την επιλογή της επιφανειακής στρώσης σε προκατασκευαστικό στάδιο. Η επιλογή σύνθεσης της επιφανειακής στρώσης γίνεται εμπειρικά, συναρτήσει του τύπου της οδού και των καιρικών συνθηκών. Η επιφανειακή στρώση είθιστε να εξετάζεται σαν ανεξάρτητη μονάδα, καθώς οι λειτουργίες που καλείται να επιτελέσει διακρίνονται από αυτές που αναλαμβάνουν οι δομικά υποκείμενες στρώσεις. Ο σχεδιασμός της ακολουθεί τα πρότυπα που εφαρμόζονται στο σχεδιασμό ασφαλικών

Διερεύνηση παραμέτρων για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στη Γαλλική Μέθοδο

μιγμάτων. Αντιθέτως, η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων και η επιλογή των κατάλληλων υλικών είναι αποτέλεσμα μηχανιστικής προσέγγισης.

Ο σχεδιασμός οφείλει να εξασφαλίσει ότι το οδόστρωμα που πρόκειται να κατασκευασθεί θα είναι ικανό να ανταποκριθεί στις αναμενόμενες κυκλοφοριακές ανάγκες κατά την περίοδο σχεδιασμού του. Αυτή η απαίτηση επισφραγίζεται συγκρίνοντας:

- Τις μέγιστες τάσεις ή/και παραμορφώσεις που αναπτύσσονται στα διαφορετικά υλικά του οδοστρώματος κατά τις διελεύσεις του φορτίου αναφοράς με
- Τις επιτρεπόμενες τάσεις ή/και παραμορφώσεις για κάθε υλικό, οι οποίες εξάγονται από τα χαρακτηριστικά κόπωσης του καθενός, είτε μέσω εργαστηριακών δοκιμών (για τα επεξεργασμένα υλικά), είτε μέσω εμπειρικών σχέσεων κόπωσης (για τα ανεπεξέργαστα υλικά και εδάφη).

Σε τελικό στάδιο, η κατασκευασθείσα δομή θα θεωρηθεί επαρκής αν οι αναπτυσσόμενες τάσεις ή/και παραμορφώσεις είναι μικρότερες ή ίσες των αντίστοιχα επιτρεπόμενων.

5.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ

5.2.1 ΣΗΜΑΣΙΑ ΠΙΘΑΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΦΥΣΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

Εισάγοντας την έννοια της μεταβλητότητας στη διαδικασία του σχεδιασμού, ένα από τα κύρια στοιχεία που χαρακτηρίζει τη Γαλλική Μέθοδο είναι η πιθανολογική της φύση.

Στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων υπεισέρχονται πολλοί παράγοντες που παρουσιάζουν μεταβλητό ή αβέβαιο χαρακτήρα, με την κυκλοφοριακή πρόβλεψη, τις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις και την εκτίμηση της διάρκειας ζωής του οδοστρώματος να αποτελούν τα ενδεικτικότερα παραδείγματα. Αν και η τυποποίηση των υλικών περιορίζει την απόκλιση των χαρακτηριστικών τιμών τους εντός μικρού φάσματος τιμών, η εξέλιξη της φθοράς τους γίνεται με ακανόνιστο τρόπο, όπως επιβεβαιώνεται από εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης. Επιπλέον, η πιθανολογική προσέγγιση καλύπτει τυχόν αποκλίσεις των παχών των επιμέρους στρώσεων κατά την κατασκευή τους στο πεδίο, όπου οι τιμές τους αναπόφευκτα διαφοροποιούνται ανάλογα με τη μέθοδο που θα ακολουθηθεί και την ποιότητα της εργασίας.

Ο συνδυασμός των ανωτέρω μεταβλητών παραμέτρων ωθεί τη σχεδιαστική διαδικασία σε πιθανολογικό πλαίσιο, προκειμένου να προβλεφθεί η πορεία της φθοράς του οδοστρώματος και κατ'επέκταση η διάρκεια ζωής του.

5.2.2 ΕΝΝΟΙΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΚΥΒΕΥΣΗΣ

Ο πραγματικός χρόνος της διάρκειας ζωής ενός οδοστρώματος είναι δύσκολο να προσδιοριστεί κυρίως εξαιτίας του ακανόνιστου ρυθμού υποβάθμισης του οδοστρώματος. Η πιθανολογική προσέγγιση της Γαλλικής Μεθόδου δίνει τη δυνατότητα σύνδεσης της διάρκειας ζωής όπως εκτιμάται στο σχεδιασμό, γνωστή ως *αρχική διάρκεια ζωής*, με ένα ποσοστό αστοχίας του οδοστρώματος το οποίο ονομάζεται διακύβευση (%). Συγκεκριμένα, το ποσοστό διακύβευσης ορίζεται ως: *Κατά το σχεδιασμό ενός οδοστρώματος, με τον όρο 'διακύβευση R% σε μία περίοδο x ετών' ορίζουμε την πιθανότητα, στο πέρας αυτών των x ετών και χωρίς δομική συντήρηση στο ενδιάμεσο, η φθορά του οδοστρώματος να είναι τόσο ώστε να απαιτεί ενέργειες ενίσχυσης ισάξιας της ολικής ανακατασκευής του* (French Design Manual For Pavement Structures, LCPC).

Κατά την επιλογή της βέλτιστης στρατηγικής σχεδιασμού ο μελετητής καλείται να πάρει σημαντικές αποφάσεις υπό το πρίσμα τεχνικοοικονομικών κριτηρίων (βλέπε 4.6.3). Οι έννοιες της αρχικής διάρκειας ζωής και της διακύβευσης είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το μέγεθος της αρχικής δαπάνης. Ειδικότερα, μία υψηλή αρχική δαπάνη αντιστοιχεί σε οδοστρώματα μακράς διάρκειας (15 έως 20 έτη ή περισσότερο) με μικρό ποσοστό διακύβευσης από τη στιγμή που η πιθανότητα δομικής φθοράς είναι περιορισμένη. Αντιθέτως, μία μικρή αρχική δαπάνη αντιστοιχεί σε οδοστρώματα που σχεδιάζονται για μικρότερη διάρκεια ζωής με αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης δομικής φθοράς, άρα και αυξημένο ποσοστό διακύβευσης.

5.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

5.3.1. ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Σε αντίθεση με τη μέθοδο AASHTO (βλέπε εξίσωση 4.1), το γαλλικό εγχειρίδιο σχεδιασμού οδοστρωμάτων (LCPC, 1997) λαμβάνει υπόψη την επίδραση του τύπου των αξόνων (μονοί, δίδυμοι ή τρίδυμοι) στο σχεδιασμό και όχι του συνόλου αυτών. Η εξίσωση του ισοδύναμου φορτίου αναδιαμορφώνεται ως εξής:

$$EALF = k \left(\frac{P_x}{P_{130}} \right)^\alpha \quad (5.1)$$

όπου,

EALF: ισοδύναμη κυκλοφορία

k: συντελεστής συναρτήσεως του τύπου των αξόνων

α : αριθμητική μεταβλητή

P_x : φορτίο πραγματικής κυκλοφορίας

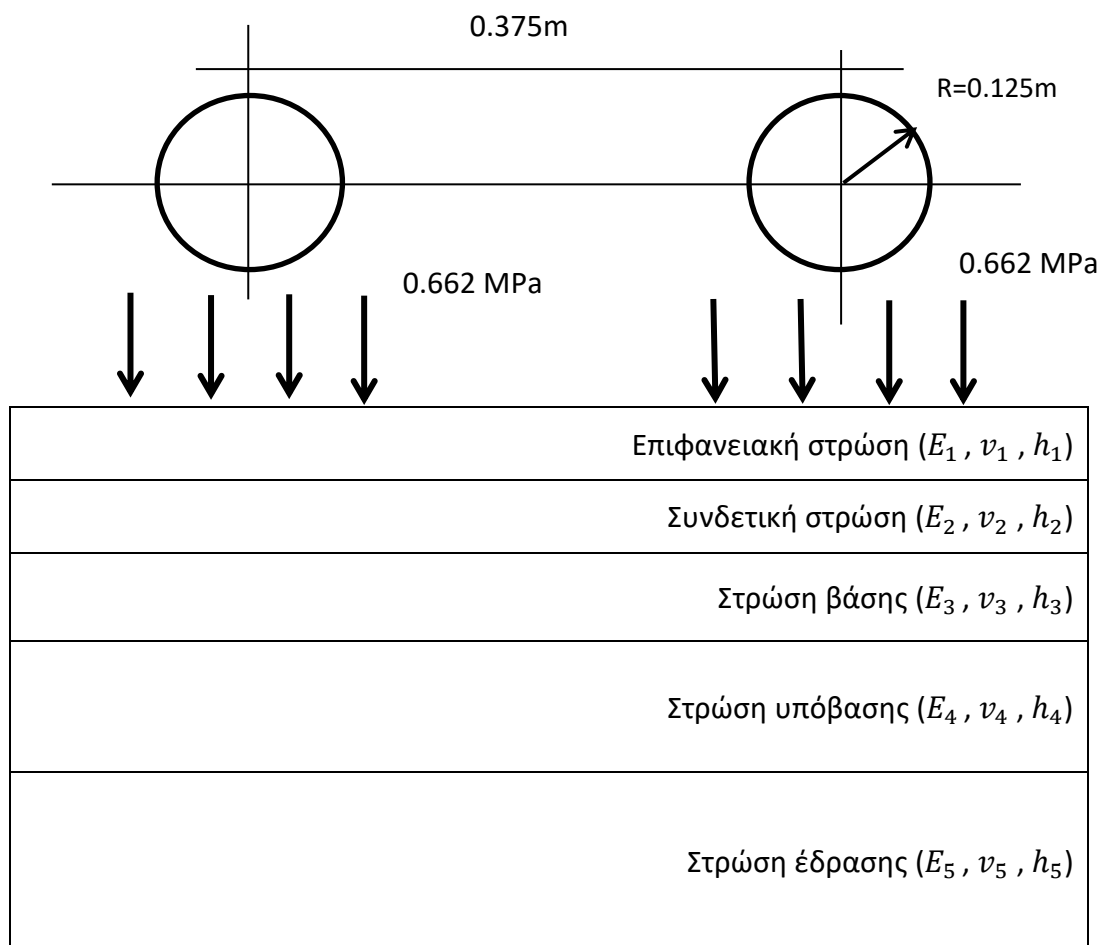
P_{130} : φορτίο αναφοράς (130kN) όπως υιοθετήθηκε από τη Γαλλική Μέθοδο

Πίνακας 5.1: Τιμές συντελεστών α και k κατά την Γαλλική Μέθοδο (LCPC,1994)

Τύπος Οδοστρώματος	α	k		
		Μονός άξονας	Διπλός άξονας	Τριπλός άξονας
Εύκαμπτα	5	1	0.75	1.1
Ημί- εύκαμπτα & Δύσκαμπτα	12	1	12	113

Η τιμή του συντελεστή k έχει καθολική ισχύ στα εύκαμπτα οδοστρώματα, ανεξάρτητα από τις διαφορές τους ως προς το πάχος και τη δυσκαμψία. Ένα στοιχείο που δε συμπεριλαμβάνεται στους υπολογισμούς είναι η απόσταση μεταξύ των αξόνων (στην περίπτωση των διπλών και των τριπλών), η οποία επηρεάζει καθοριστικά τις αναπτυσσόμενες τάσεις και παραμορφώσεις.

Σχετικά με το φορτίο αναφοράς, το 1945 υιοθετήθηκε το 13^{tn} φορτίο (μονός άξονας, διπλοί τροχοί) στο σχεδιασμό τόσο των εύκαμπτων όσο και των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων – τιμή που αντιστοιχεί στο μέγιστο επιτρεπτό όριο αξονικού φορτίου στη Γαλλία. Σε επίπεδο ανάλυσης, το φορτίο εφαρμόζεται σε δύο κυκλικές περιοχές καθεμία από τις οποίες έχει ακτίνα 12.5cm, απόσταση από κέντρο σε κέντρο τροχού 37.5cm και ασκεί ομοιόμορφη πίεση επαφής ίση με 0.662MPa στο υποκείμενο οδόστρωμα (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Τυπική διάταξη 13tn φορτίου αναφοράς της Γαλλικής Μεθόδου

Εξετάζοντας τις διελεύσεις μόνο των βαρέων οχημάτων N_{PL} , η Γαλλική Μέθοδος ταξινομεί την κυκλοφορία με βάση τη μέση ημερήσια κυκλοφοριακή ροή βαρέων οχημάτων ΕΜΗΚ που αντιστοιχεί στη λωρίδα με τον υψηλότερο κυκλοφοριακό φόρτο, τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του οδοστρώματος (Πίνακας 5.2).

Πίνακας 5.2: Τάξεις κυκλοφορίας

Class	T5	T4	T3	T2	T1	T0	TS	TEX
ΕΜΗΚ	0	25	50	150	300	750	2000	5000

Τα επιβατικά οχήματα δε λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό διότι η επίδραση τους στο οδόστρωμα είναι αμελητέα συγκριτικά με εκείνη των βαρέων οχημάτων (φορτίο μεγαλύτερο των 5tn).

Η αθροιστική κυκλοφορία μετατρέπεται σε ισοδύναμο αριθμό διελεύσεων του άξονα αναφοράς **NE**, σύμφωνα με την εξίσωση 5.2:

$$NE = N_{PL} \times CAM \quad (5.2)$$

όπου,

NE: Ο ισοδύναμος αριθμός διελεύσεων του άξονα αναφοράς, ο οποίος θα προκαλέσει την ίδια βλάβη στο οδόστρωμα με εκείνη που θα προκαλούσε η σύνθεση της κυκλοφορίας.

N_{PL} : Ο συνολικός αριθμός διελεύσεων των βαρέων οχημάτων για την περίοδο σχεδιασμού.

CAM: μέσος συντελεστής έκφρασης της έντασης των φορτίων (Njock&Yueguang,2015), η τιμή του οποίου καθορίζεται από τον τύπου του οδοστρώματος και την τάξη της κυκλοφορίας (Πίνακες 5.3 και 5.4).

Πίνακας 5.3: Τιμές του συντελεστή CAM συναρτήσει της κυκλοφορίας

Κατηγορία	T5	T4	T3	≥T2
CAM	0.4	0.5	0.7÷0.8	1

Πίνακας 5.4: Τιμές του συντελεστή CAM συναρτήσει του τύπου της οδού

Υλικά	Εθνικές οδοί και αυτοκινητόδρομοι	Άλλες οδοί
Ασφαλτικά υλικά	0.8	0.5
Εδαφικά υλικά	1.0	1.0
Συνδετικά υλικά και σκυρόδεμα	1.3	0.8

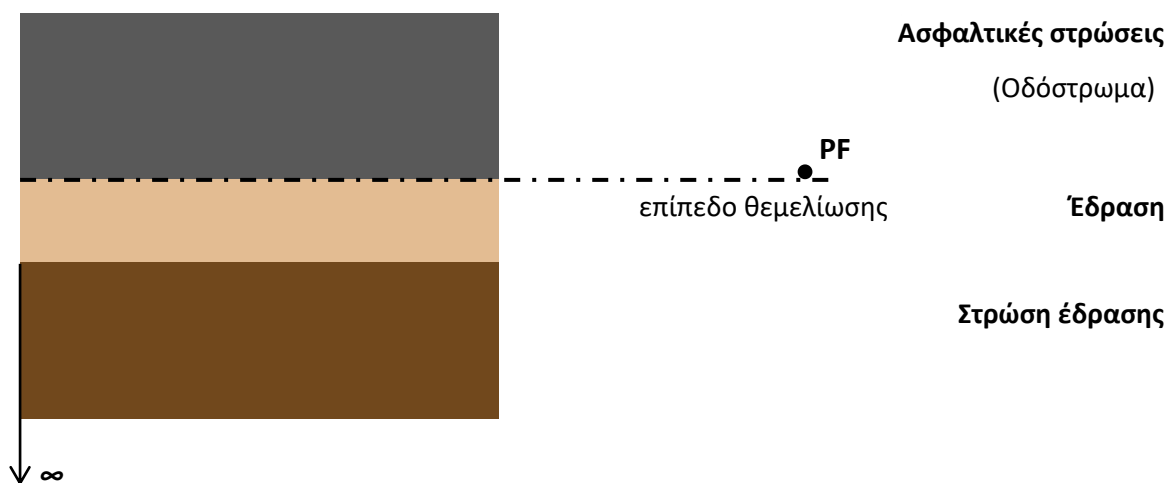
5.3.2 ΚΛΙΜΑΤΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Τα ασφαλτικά υλικά είναι ιξωδοελαστικά υλικά κι επομένως οι τιμές των τάσεων, των παραμορφώσεων και της φθοράς τους εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία (Hornych et al., 2013). Δεδομένου ότι είναι δύσκολο να υπολογιστούν με ακρίβεια οι θερμοκρασιακές διακυμάνσεις στο σχεδιασμό, η Γαλλική Μέθοδος λαμβάνει μία σταθερή θερμοκρασία κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, η οποία ονομάζεται ισοδύναμη θερμοκρασία T_{eq} (Balay et al., 2010). Ως ισοδύναμη θερμοκρασία ορίζεται η θερμοκρασία που προκαλεί στο οδόστρωμα την ίδια φθορά με εκείνη που θα

προκαλούσαν οι πραγματικές θερμοκρασιακές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια ενός έτους. Ο προσδιορισμός της απαιτεί γνώση της μεταβολής του μέτρου δυσκαμψίας και των χαρακτηριστικών των υλικών ως αποτέλεσμα της μεταβολής της θερμοκρασίας. Επειδή αυτό δεν είναι πάντα εφικτό, στην πράξη η θερμοκρασία που έχει υιοθετηθεί στο σχεδιασμό των γαλλικών οδοστρωμάτων είναι οι 15 °C.

5.3.3 ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΔΡΑΣΗΣ

Μία τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος παρουσιάζει σημαντικές δομικές διαφορές κατά το σχεδιασμό της στη Γαλλία. Το οδόστρωμα πλέον συντίθεται κατά βάση από τις ασφατικές στρώσεις και θεμελιώνεται στην έδραση (capping layer). Κάτω από την έδραση του οδοστρώματος, βρίσκεται η στρώση έδρασης αποτελούμενη από φερτά ή επί τόπου εδαφικά υλικά (Εικόνα 5.2). Η αντοχή της στρώσης έδρασης (το μέτρο ελαστικότητάς της) καθορίζει το ελάχιστο απαιτούμενο πάχος της υπερκείμενης έδρασης του οδοστρώματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντοχή της στρώσης έδρασης, τόσο μικρότερο είναι το απαιτούμενο πάχος της υπερκείμενης έδρασης του οδοστρώματος. Η φέρουσα ικανότητα του οδοστρώματος είναι στην ουσία η φέρουσα ικανότητα της έδρασης (PF: Pavement Foundation).



Εικόνα 5.2: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος κατά τη Γαλλική Μέθοδο

Μέσω του εγχειριδίου της Γαλλικής Μεθόδου σχεδιασμού οδοστρωμάτων (LCPC,2003), διακρίνονται οι εξής κατηγορίες φέρουσας ικανότητας της έδρασης, βάσει του μέτρου ελαστικότητάς της E(MPa) (Πίνακας 5.5):

Πίνακας 5.5: Κατηγορίες φέρουσας ικανότητας

Μέτρο Ελαστικότητας (MPa)	20	50	120	200
Κατηγορία Έδρασης (PF)	PF1	PF2	PF3	PF4

Η μέτρηση της φέρουσας ικανότητας ενός οδοστρώματος πραγματοποιείται επί τόπου μέσω συσκευών όπως το LPC Dynaplaque (Εικόνα 5.3).



Εικόνα 5.3: Συσκευή LPC Dynaplaque (Balay et al., 2012)

Η κατηγοριοποίηση αυτή έχει νόημα μόνο αν τα υλικά της στρώσης έδρασης δεν παρουσιάζουν ευαισθησία σε περιβάλλον υγρασίας (δείκτης PST). Η Γαλλική Μέθοδος δε λαμβάνει άμεσα υπόψη την επίδραση της υγρασίας ως κριτήριο σχεδιασμού, αλλά έμμεσα, μέσω της επιρροής της στο μέτρο ελαστικότητας E , το οποίο αποτελεί ένδειξη της φέρουσας ικανότητας του οδοστρώματος.

5.3.4 ΥΛΙΚΑ

Τα υλικά των επιμέρους στρώσεων του οδοστρώματος χαρακτηρίζονται από τις μηχανικές τους ιδιότητες, οι οποίες προκύπτουν από εργαστηριακές δοκιμές. Στο πλαίσιο των σχεδιαστικών αναγκών, όταν δεν υπάρχει η δυνατότητα επαρκούς μελέτης των υλικών, λαμβάνονται τυποποιημένες τιμές στους υπολογισμούς της Γαλλικής Μεθόδου (Πίνακας 5.6).

Πίνακας 5.6: Χαρακτηριστικά ασφαλικών υλικών, $T=15\text{ }^{\circ}\text{C}$, $f=10\text{Hz}$

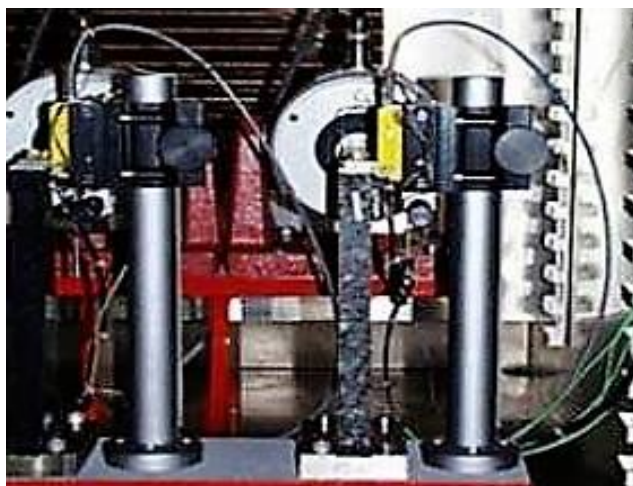
Υλικά	$E(\text{MPa})$	ν	ε_6	$-1/b$	k_c
Ασφαλτικό σκυρόδεμα (BB)	5400	0.35	100	5	1.1
Ασφαλτική στρώση βάσης (GB3)	9300	0.35	90	5	1.3
Ασφαλτική στρώση βάσης (GB4)	11000	0.35	100	5	1.3
Ασφαλτική στρώση υψηλού μέτρου δυσκαμψίας (EME)	14000	0.35	130	5	1

Τα μέτρα δυσκαμψίας των ασφαλικών υλικών προσδιορίζονται σε συνθήκες ισοδύναμης θερμοκρασίας $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (μέση θερμοκρασία στη Γαλλία) και συχνότητας 10Hz . Η τιμή των 10Hz αντιστοιχεί σε ταχύτητα κίνησης 72km/h (μέση ταχύτητα κίνησης οχημάτων στη Γαλλία (Chabot et al.,2010)). Οι τιμές ε_6 , $-1/b$ αντιστοιχούν σε παραμέτρους κόπωσης, ενώ ο συντελεστής k_c είναι ένας ρυθμιστικός συντελεστής που υπεισέρχεται στο νόμο κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων σύμφωνα με τη Γαλλική Μέθοδο.

5.3.5 ΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

Η ανάλυση της απόκρισης ενός μοντέλου οδοστρώματος απαιτεί τον υπολογισμό των τάσεων και των παραμορφώσεων στις κρίσιμες θέσεις του. Για τα εύκαμπτα οδοστρώματα της Γαλλίας οι θέσεις αυτές είναι ο πυθμένας των ασφαλικών στρώσεων (ανάπτυξη εφελκυστικής παραμόρφωσης ε_r) και η κορυφή της έδρασης (ανάπτυξη θλιπτικής παραμόρφωσης ε_z).

Τα κριτήρια σχεδιασμού κατά τη Γαλλική Μέθοδο είναι στην ουσία κριτήρια κόπωσης και αστοχίας των κρίσιμων θέσεων του, βασισμένα σε εργαστηριακές δοκιμές κόπωσης που περιλαμβάνουν την κάμψη τραπεζοειδών δειγμάτων σε δύο σημεία (Εικόνα 5.4).



Εικόνα 5.4: Δοκιμή κάμψης δύο σημείων τραπεζοειδούς δοκιμίου

Η καμπύλη κόπωσης ορίζεται για πιθανότητα αστοχίας ίση με 50% και τα εργαστηριακά αποτελέσματα εκφράζονται σε λογαριθμική μορφή (Εικόνα 5.5). Σε εργαστηριακό επίπεδο, ο νόμος κόπωσης των ασφαλτομιγμάτων μπορεί να εκφραστεί απλουστευτικά μέσω της σχέσης:

$$\varepsilon = \varepsilon_6 \times \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \quad (5.3)$$

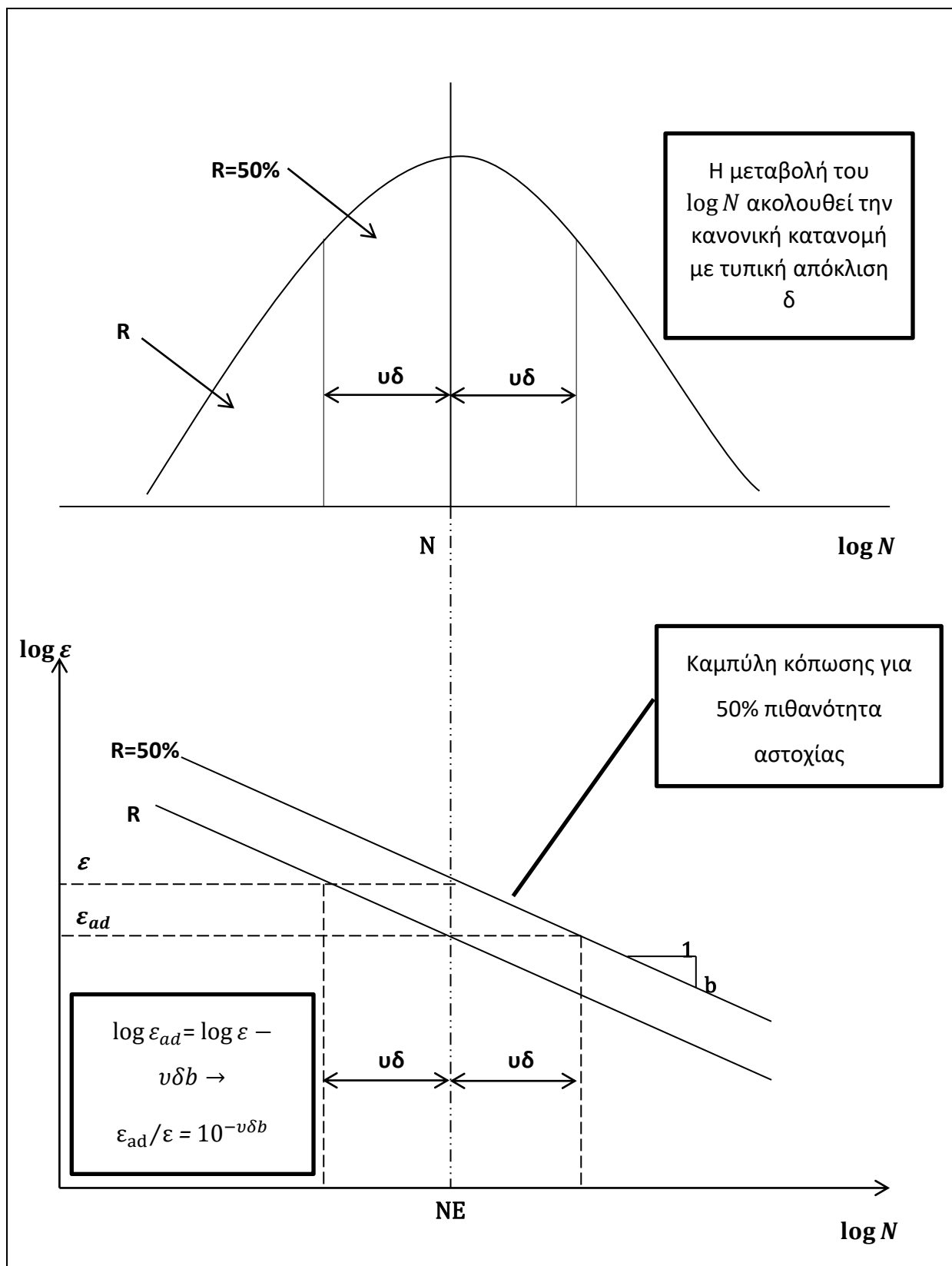
όπου,

ε : η παραμόρφωση τη στιγμή της αστοχίας

NE : ο αριθμός των διελεύσεων τη στιγμή της αστοχίας

ε_6, b : παράμετροι κόπωσης. Προσδιορίζονται σε θερμοκρασία 10°C και συχνότητα 25Hz.

Λαμβάνουν τιμές συναρτήσει της ποιότητας των ασφαλτικών μιγμάτων (Πίνακας 5.7).



Εικόνα 5.5: Καμπύλη κόπωσης για $R=50\%$

Πίνακας 5.7: Τιμές ε_6, b

Υλικά	Κατηγορία	ε_6	$-1/b$
Ασφαλτικό σκυρόδεμα	1	70	5
	2	80	5
	3	90	5
Ασφαλτική στρώση υψηλού μέτρου ελαστικότητας (ΕΜΕ)	1	100	5
	2	130	5

Οι επιτρεπόμενες τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων αντιστοιχούν στις ανώτερες τιμές τάσεων και παραμορφώσεων που τα υλικά μπορούν να αντέξουν πριν φτάσουν ένα δεδομένο επίπεδο φθοράς. Αυτό το επίπεδο φθοράς καθορίζεται από το μελετητή της οδού ανάλογα με το αναμενόμενο επίπεδο εξυπηρετικότητάς της και τη στρατηγική σχεδιασμού που έχει επιλεγεί (βλέπε 5.2.2). Ο σχεδιασμός ενός αυτοκινητοδρόμου μακράς διάρκειας για παράδειγμα, συνεπάγεται ένα μικρότερο ποσοστό διακύβευσης, μία μικρότερη επιτρεπόμενη τιμή παραμόρφωσης του πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων και τελικά με μία μικρότερη τιμή του επιτρεπόμενου αριθμού διελεύσεων.

Νόμος κόπωσης ασφαλτικής στρώσης

Ο νόμος κόπωσης της ασφαλτικής στρώσης δίνεται από τις εξισώσεις (5.5÷5.7):

$$\bullet \quad \varepsilon_{r,ad} = \varepsilon(N, T_{eq}, f) \times k_r \times k_c \times k_s \quad (5.4)$$

$$\text{με } \varepsilon(N, T_{eq}, f) = (NE/10^6)^b \times (E_{10^\circ C}/E_{\theta_{eq}^\circ C})^{0.5} \times \varepsilon_{6(10^\circ C, 25Hz)} \quad (5.5)$$

ή

$$\bullet \quad NE = \varepsilon_6 \times \left(\frac{E_{10^\circ C, 10Hz}}{E_{\theta_{eq}, 10Hz}} \right)^{0.5} \times k_r \times k_c \times k_s \times \frac{1}{\varepsilon_{r,induced}} \quad (5.6)$$

όπου,

$\varepsilon_{r,induced}$: η οριζόντια εφελκυστική παραμόρφωση που αναπτύσσεται στον πυθμένα των ασφαλτικών στρώσεων.

ϵ_6 : η επιβεβλημένη παραμόρφωση σε δοκιμές κόπωσης που αντιστοιχεί σε 10^6 διελεύσεις φορτίου. Αν και σε θερωτητικό επίπεδο εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα, σε σχεδιαστικό επίπεδο λαμβάνει τυποποιημένες τιμές όπως προκύπτουν στη θερμοκρασία των 10°C και συχνότητα των 25Hz (κάμψη σε δύο σημεία τραπεζοειδούς δοκιμίου). Πρακτικά παραμένει αμετάβλητο για φάσμα συχνοτήτων $10\div 25\text{Hz}$.

NE: ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων 13^{τη} φορτίου αναφοράς της Γαλλικής Μεθόδου σχεδιασμού.

$E_{10^\circ\text{C},10\text{Hz}}$: το μέτρο δυσκαμψίας του ασφατικού μίγματος όπως μετρείται κατά τις δοκιμές κόπωσης σε θερμοκρασία 10°C και συχνότητα 10Hz.

$E_{\text{Teq}^\circ\text{C},10\text{Hz}}$: το μέτρο δυσκαμψίας του ασφατικού μίγματος όπως μετρείται κατά τις δοκιμές κόπωσης σε θερμοκρασία σχεδιασμού Teq°C και συχνότητα 10Hz.

k_s : μειωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τις μεταβολές της φέρουσας ικανότητας της υποκείμενης ασύνδετης στρώσης. Πρότυπες τιμές που δίνονται στον Πίνακα 5.8:

Πίνακας 5.8: Τιμές του συντελεστή k_s

	$E < 50 \text{ MPa}$	$50 \text{ MPa} \leq E < 120 \text{ MPa}$	$120 \text{ MPa} > E$
k_s	1/1.2	1/1.1	1

k_c : ρυθμιστικός συντελεστής που διορθώνει την απόκλιση που προκύπτει ανάμεσα στις προβλέψεις τις υπολογιστικής διαδικασίας και στην παρατηρηθείσα συμπεριφορά που εν τέλει αναπτύσσει ένα οδόστρωμα ίδιου τύπου στην πράξη. Στα εύκαμπτα οδοστρώματα οι τιμές του k_c μεταβάλλονται ανάλογα με το υπό εξέταση υλικό (Πίνακας 5.9).

Πίνακας 5.9: Τιμές του συντελεστή k_c

Υλικά	k_c
Ασφαλτική στρώση βάσης (GB)	1.3
Ασφατικό σκυρόδεμα (BB)	1.1
Ασφαλτική στρώση υψηλού μέτρου ελαστικότητας (EME)	1.0

k_r : συντελεστής προσαρμογής των εργαστηριακών αποτελεσμάτων φθοράς σε μία δοσμένη θερμοκρασία. Στην ουσία, προσαρμόζει την τιμή της παραμόρφωσης στη διακύβευση, που καθορίζεται με ένα διάστημα εμπιστοσύνης γύρω από το πάχος (τυπική απόκλιση Sh) και τα αποτελέσματα της δοκιμής κόπωσης (τυπική απόκλιση SN). Η τιμή του k_r δίνεται από την εξίσωση :

$$k_r = 10^{-ub\delta} \quad (5.7)$$

όπου,

u : μειωτικός συντελεστής που σχετίζεται με τη διακύβευση (Πίνακας 5.10).

Πίνακας 5.10: Τιμές του συντελεστή u

u	-0.84	-1.04	-1.28	-1.65	-2.05
$R(\%)$	20	15	10	5	2

b : η κλίση της καμπύλης κόπωσης των υλικών. Για υπολογιστικές ανάγκες λαμβάνεται σταθερά $b = -1/5$.

δ : τυπική απόκλιση του $\log(N)$ στην αστοχία, που προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης 5.8 ως εξής:

$$\delta = \sqrt{SN^2 + \left(\frac{c}{b}\right)^2 Sh^2} \quad (5.8)$$

όπου,

c : συντελεστής που συνδέει τη μεταβολή των παραμορφώσεων με την τυχαία διακύμανση του πάχους του οδοστρώματος Sh . Σε συνήθεις δομές οδοστρωμάτων η τιμή του c λαμβάνεται κατά προσέγγιση ίση με $0,02\text{cm}^{-1}$.

SN : τυπική απόκλιση από τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών κόπωσης. Για υπολογιστικές ανάγκες λαμβάνεται σταθερά $SN = 0.3$ στα ασφαλτικά υλικά.

Sh : τυπική απόκλιση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων με πρότυπες τιμές κατά τον Πίνακα 5.11:

Πίνακας 5.11: Τιμές του συντελεστή Sh

$Sh(cm)$	$h(cm)$
1	≤ 10
$1 + 0.3 \times (h-10)$	$10 \leq h \leq 15$
2.5	≥ 15

Επομένως, για διαφορετικά πάχη στρώσεων, ο συντελεστής k_r λαμβάνει τιμές σύμφωνα με τον Πίνακα 5.12:

Πίνακας 5.12: Τιμές του συντελεστή k_r

$h(cm)$	δ	k_r
4-10	0.316	0.752
11	0.327	0.744
12	0.340	0.736
13	0.355	0.726
14	0.372	0.715
≥ 15	0.391	0.703

Αστοχία έδρασης

Ο νόμος αστοχίας της έδρασης εκφράζεται εμπειρικά μέσω των σχέσεων 5.9 και 5.10 για οδούς μεσαίας και υψηλής κυκλοφορίας ($T \geq T_3$) και μέσω της σχέσης 5.11 για οδούς χαμηλής κυκλοφορίας ($T < T_3$) (βλέπε Πίνακα 5.2).

$$\varepsilon_{z,ad} = 0.012 \times NE^{-0.222} \quad (5.9)$$

Επομένως, ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων φορτίου αναφοράς προκύπτει ως:

$$NE = 10^{-6} \times \left(\frac{12000}{\varepsilon_{z,induced}} \right)^{4.5045} \quad (5.10)$$

$$\varepsilon_{z,ad} = 0.016 \times NE^{-0.222} \quad (5.11)$$

όπου,

Διερεύνηση παραμέτρων για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στη Γαλλική Μέθοδο

NE: ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων φορτίου αναφοράς (σε εκατομμύρια)

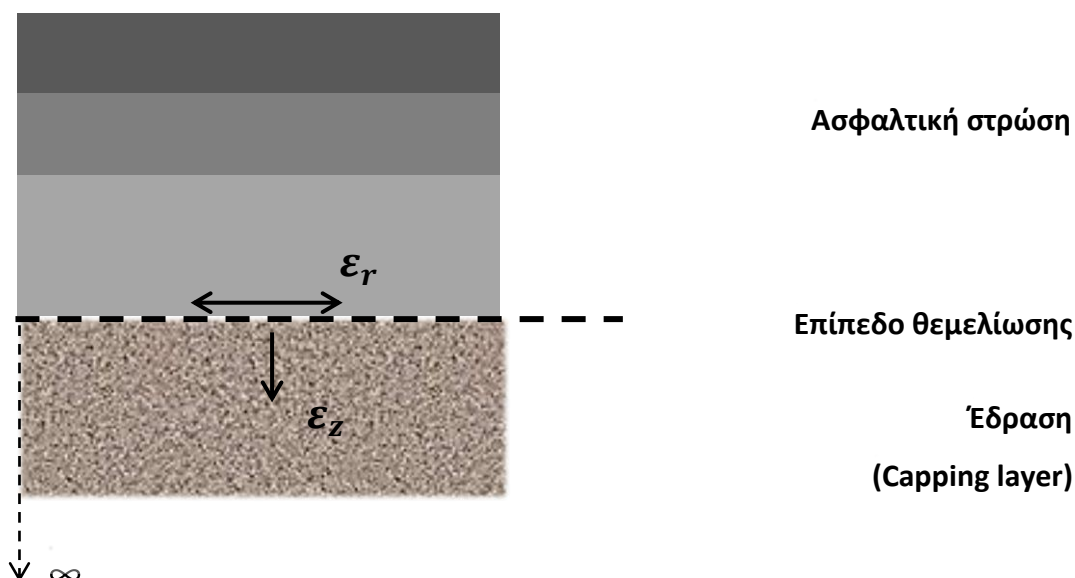
$\epsilon_{z,induced}$: η θλιπτική κατακόρυφη παραμόρφωση που ασκείται στην επιφάνεια της έδρασης.

6. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

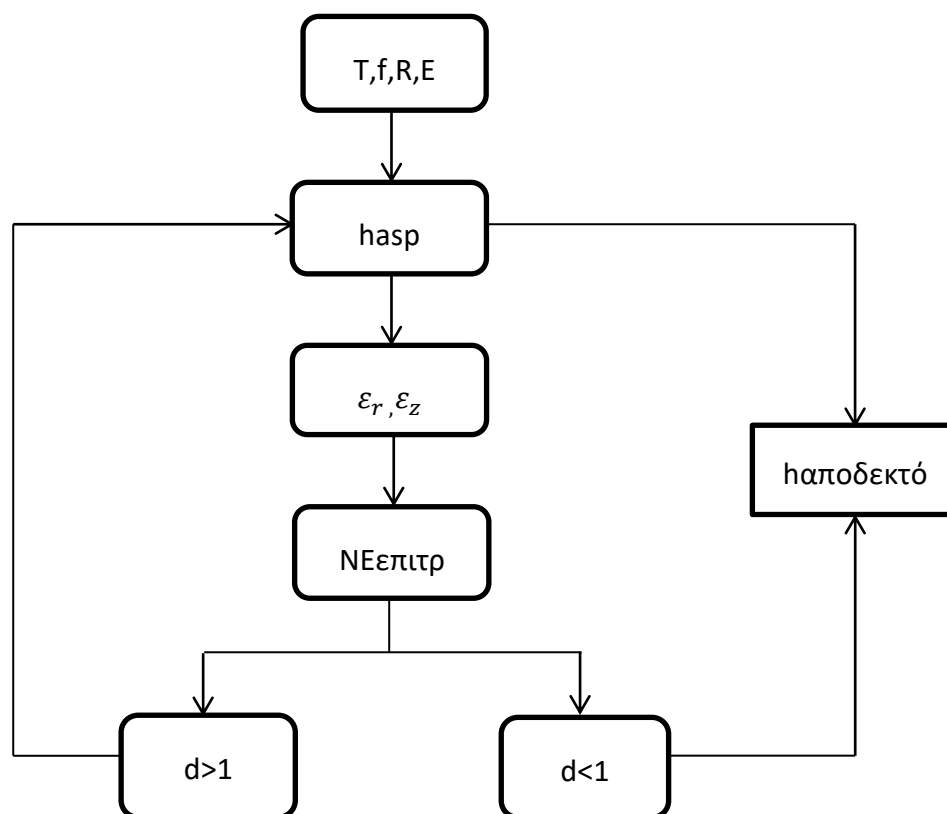
Η πιθανολογική προσέγγιση της Γαλλικής Μεθόδου ενισχύει την εισαγωγή παραμέτρων μεταβλητής φύσης στο σχεδιασμό, όπως για παράδειγμα το βαθμό σύνδεσης μεταξύ των επιμέρους στρωμάτων, το πάχος των στρώσεων, τη διακύβευση, τη θερμοκρασία και τη συχνότητα φόρτισης – όλα υπό το πρίσμα τυποποιημένων υλικών και φορτίου αναφοράς 13tn. Από το σύνολο των παραμέτρων που υπεισέρχονται στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, διαπιστώνεται ότι ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η θερμοκρασία $T(^{\circ}\text{C})$, η συχνότητα $f(\text{Hz})$, το ποσοστό διακύβευσης $R(\%)$ και τα υλικά πλήρωσης των ασφαλικών στρώσεων. Οι παραπάνω παράμετροι καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη διατομή σχεδιασμού του οδοστρώματος. Για τη διερεύνηση της επίδρασης των υπόψη παραμέτρων στο σχεδιασμό του οδοστρώματος, στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας. Επιλέγεται μία διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος όπως αυτή προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη κατά το σχεδιασμό τις προκαθορισμένες συνθήκες φόρτισης της Γαλλικής Μεθόδου σχεδιασμού, δηλαδή για θερμοκρασία 15°C , συχνότητα 10Hz και διακύβευση 2.5% . Στη δεδομένη διατομή πραγματοποιούνται αναλύσεις ευαισθησίας λαμβάνοντας υπόψη δύο τυποποιημένα ασφαλικά υλικά και όλους τους δυνατούς συνδυασμούς μεταξύ τεσσάρων διαφορετικών θερμοκρασιών, τριών συχνοτήτων και τριών ποσοστών διακύβευσης. Για τις ανάγκες της ανάλυσης γίνεται θεώρηση διστρωματικής διατομής η οποία αποτελείται από την ασφαλτική στρώση και την έδραση (capping layer) (Εικόνα 6.1).

Σκοπός των αναλύσεων είναι να περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο οι εν λόγω παράμετροι επιδρούν στη δομική επάρκεια της διατομής αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται κατά πόσο η συγκεκριμένη διατομή πληρεί τα κριτήρια κόπωσης και αστοχίας, σε διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και ποσοστού διακύβευσης. Οι αναλύσεις ευαισθησίας, λαμβάνοντας υπόψη την αθροιστική κυκλοφορία που προβλέπεται για τη διατομή αναφοράς κατά την περίοδο σχεδιασμού της, περιγράφονται σε δύο στάδια.



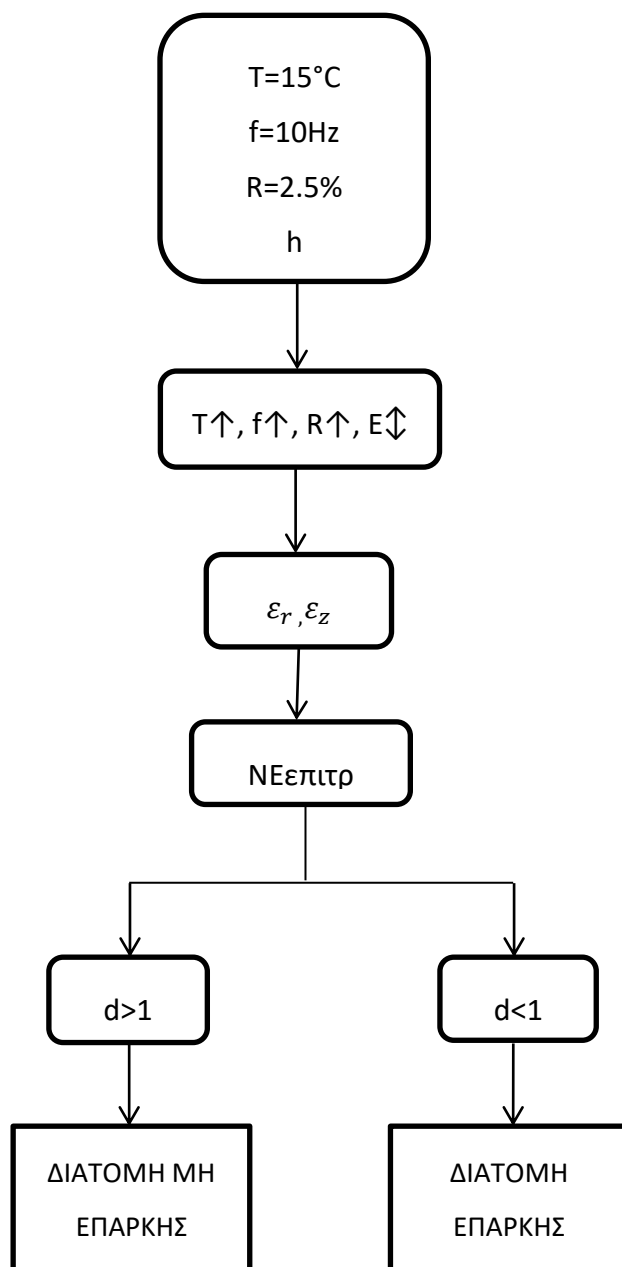
Εικόνα 6.1: Πρότυπο διατομής για τις αναλύσεις ευαισθησίας

Αρχικά, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας μεταβάλλοντας το πάχος της ασφαλτικής στρώσης της διατομής αναφοράς έτσι ώστε αυτή να παραμένει δομικά επαρκής. Γίνεται μία αρχική εκτίμηση του πάχους της ασφαλτικής στρώσης και υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας του εύκαμπτου οδοστρώματος. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι επιτρεπόμενες διελεύσεις του φορτίου αναφοράς μέσω του νόμου κόπωσης (εξισώσεις 5.4 και 5.5) και του νόμου αστοχίας (εξίσωση 5.10). Τέλος, προσδιορίζεται η φθορά της ασφαλτικής στρώσης και της έδρασης. Η διατομή θεωρείται δομικά επαρκής αν και μόνο αν η φθορά της ασφαλτικής στρώσης και της έδρασης είναι μικρότερη της μονάδας ($d < 1$) (Εικόνα 6.2).



Εικόνα 6.2: Πορεία ανάλυσης ευαισθησίας σε διατομή μεταβλητού πάχους ασφατικής στρώσης

Στη συνέχεια, πραγματοποιείται ανάλυση ευαισθησίας σε διατομή σταθερού πάχους ασφατικής στρώσης. Η τιμή του πάχους προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη δομική επάρκεια της διατομής αναφοράς για τις προκαθορισμένες συνθήκες φόρτισης της μεθόδου ($T=15^{\circ}\text{C}$, $f=10\text{Hz}$ και $R=2.5\%$)(Εικόνα 6.3). Διατηρώντας σταθερό το πάχος της ασφατικής στρώσης, ενώ παράλληλα οι συνθήκες φόρτισης μεταβάλλονται, υπολογίζονται οι αναπτυσσόμενες παραμορφώσεις στις κρίσιμες θέσεις αστοχίας της διατομής αναφοράς. Ακολούθως, με τη χρήση των νόμων κόπωσης και αστοχίας, προσδιορίζεται ο επιτρεπόμενος αριθμός διελεύσεων του φορτίου αναφοράς και, τέλος, η φθορά των στρώσεων της διατομής. Η διατομή θεωρείται ότι ικανοποιεί τα κριτήρια κόπωσης και αστοχίας μόνο στην περίπτωση που η φθορά των επιμέρους στρώσεων της προκύψει μικρότερη της μονάδας ($d<1$).



Εικόνα 6.3: Πορεία ανάλυσης ευαισθησίας σε διατομή σταθερού πάχους ασφαλτικής στρώσης

6.2 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

6.2.1 ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑ

Οι διατομές μελέτης του οδοστρώματος που διερευνούνται αφορούν σε αυτοκινητόδρομο δύο λωρίδων ανά κατεύθυνση. Για τον υπολογισμό της κυκλοφορίας σχεδιασμού διατίθενται κυκλοφοριακά στοιχεία των βαρέων οχημάτων και για τις δύο κατευθύνσεις για

Διερεύνηση παραμέτρων για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στη Γαλλική Μέθοδο

περίοδο σχεδιασμού 15 ετών, καθώς και οι συντελεστές ισοδυναμίας για τυπικό αξονικό φορτίο 8tn (Πίνακας 6.1).

Πίνακας 6.1: Κυκλοφοριακά στοιχεία βαρέων οχημάτων για την περίοδο σχεδιασμού

έτος	ΕΜΗΚ	1 κατεύθυνση	8.16t/ημέρα	8.16t/έτος	13t/έτος	13t αθροιστικά
1	3,012	1506	3682.923	1209840.206	117885.9493	1.18E+05
2	3,294	1647	4027.7385	1323112.097	128923.08	2.47E+05
3	3,461	1730.5	4231.93775	1390191.551	135459.2532	3.82E+05
4	3,634	1817	4443.4735	1459681.045	142230.2589	5.24E+05
5	3,814	1907	4663.5685	1531982.252	149275.236	6.74E+05
6	3,985	1992.5	4872.65875	1600668.399	155967.9642	8.30E+05
7	4,163	2081.5	5090.30825	1672166.26	162934.6637	9.93E+05
8	4,226	2113	5167.3415	1697471.683	165400.4057	1.16E+06
9	4,289	2144.5	5244.37475	1722777.105	167866.1476	1.33E+06
10	4,353	2176.5	5322.63075	1748484.201	170371.0283	1.50E+06
11	4,419	2209.5	5403.33225	1774994.644	172954.1866	1.67E+06
12	4,485	2242.5	5484.03375	1801505.087	175537.3449	1.84E+06
13	4,552	2276	5565.958	1828417.203	178159.6419	2.02E+06
14	4,620	2310	5649.105	1855730.993	180821.0776	2.20E+06
15	4,690	2345	5734.6975	1883848.129	183560.7909	2.39E+06

Για τον υπολογισμό του αριθμού των βαρέων οχημάτων που αναμένεται να κινηθούν σε μία κατεύθυνση, θεωρείται ισοκατανομή της κυκλοφορίας ανά κατεύθυνση και πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των βαρέων οχημάτων με 0.5. Στη συνέχεια, ο αριθμός των βαρέων οχημάτων της μίας κατεύθυνσης μετατρέπεται σε ισοδύναμες διελεύσεις φορτίου 8.16tn με τη χρήση συντελεστών ισοδυναμίας LEF (Load Equivalency Factors), συναρτήσει της κατηγορίας τους επί του συνολικού ποσοστού των βαρέων οχημάτων στον αυτοκινητόδρομο (Πίνακας 6.2).

Πίνακας 6.2: Συντελεστές ισοδυναμίας για τη μετατροπή της σύνθεσης των βαρέων οχημάτων σε ESALs

Τύπος Οχήματος	LEF	Ποσοστό(%)
Βαρύ Όχημα (άξονες ≥4)	3.025	62
Βαρύ Όχημα (άξονες ≥3)	1.5	38
Λεωφορεία	1.2	
Ελαφρύ Όχημα (2 άξονες)	0.34	

Από το ποσοστό 38% επιλέγεται η τιμή 1.5 του LEF στο σχεδιασμό υπέρ ασφαλείας. Ο σταθμισμένος συντελεστής ισοδυναμίας προκύπτει ως: $0.62 \times 3.025 + 0.38 \times 1.5 = 2.4455$ με τον οποίο πολλαπλασιάζεται ο αριθμός των βαρέων οχημάτων της μίας κατεύθυνσης κυκλοφορίας για τη μετατροπή του σε ημερήσιες διελεύσεις 8.16tn αξονικού φορτίου. Η

αναγωγή σε ετήσια βάση γίνεται μέσω του πολλαπλασιασμού με 365, ενώ γίνεται θεώρηση ότι στη δεξιά λωρίδα θα κινηθεί το 90% του συνόλου των βαρέων οχημάτων. Στη συνέχεια, οι ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις του φορτίου 8.16tn μετατρέπονται σε ισοδύναμες ετήσιες διελεύσεις του φορτίου αναφοράς 13tn της Γαλλικής Μεθόδου, μέσω του πολλαπλασιασμού του με συντελεστή ισοδυναμίας που προκύπτει από τη σχέση $(\frac{8.16}{13})^5$. Αθροιστικά, η προβλεπόμενη κυκλοφορία εκφρασμένη σε ισοδύναμες διελεύσεις τυπικού αξονικού φορτίου 13tn, ισούται με 2.39εκ για την υπό εξέταση περίοδο σχεδιασμού. Η τιμή αυτή χρησιμοποιείται ως σταθερά και συγκρίνεται με τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή διελεύσεων, η οποία υπολογίζεται συναρτήσει της εφελκυστικής παραμόρφωσης που αναπτύσσεται στον πυθμένα της ασφαλικής στρώσης της υπό εξέταση διατομής. Οι προβλεπόμενες ισοδύναμες διελεύσεις χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της φθοράς τόσο της ασφαλικής στρώσης όσο και της έδρασης.

6.2.2 ΦΕΡΟΥΣΑ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΔΡΑΣΗΣ

Για την υπόψη διερεύνηση επιλέγεται έδραση φέρουσας ικανότητας PF4, η οποία αντιστοιχεί σε σταθερό μέτρο ελαστικότητας ίσο με 200MPa (βλέπε Πίνακα 5.5). Ο λόγος Poisson λαμβάνεται ίσος με 0.35 και οι δύο στρώσεις (ασφαλική και έδραση) θεωρούνται πλήρως συνδεδεμένες (bonded).

Η θεώρηση ανάπτυξης πλήρους τριβής στην διεπιφάνεια των στρώσεων ικανοποιεί τις σχεδιαστικές απαιτήσεις σε προκατασκευαστικό στάδιο. Κατά τη λειτουργία του οδοστρώματος, οι δύο στρώσεις δεν μπορούν να θεωρηθούν πλήρως συνδεδεμένες και μάλιστα ο βαθμός σύνδεσής τους μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία (ανάπτυξη σημαντικού βαθμού ολίσθησης της διεπιφάνειας σε υψηλές θερμοκρασίες) (Duong et al., 2017).

6.2.3 ΥΛΙΚΑ

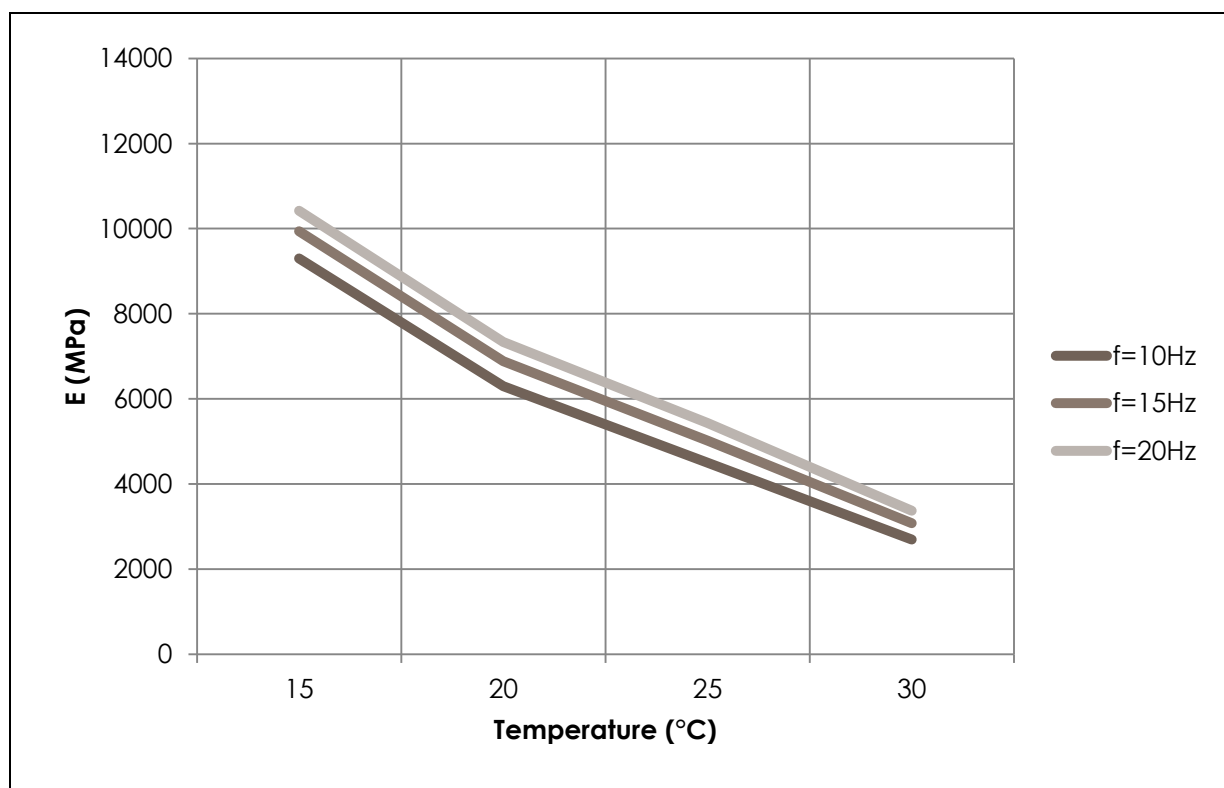
Στην παρούσα διερεύνηση επιλέχθηκαν δύο ασφατικά υλικά (bituminous materials) τύπου GB (Base Asphalt Concrete) κατηγορίας 3 και 4.

Ακολουθεί συγκεντρωτικό διάγραμμα των χαρακτηριστικών των υλικών GB3 και GB4 (Πίνακας 6.3). Οι τιμές έχουν ληφθεί από τους πίνακες που παρατίθενται στο 5^ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

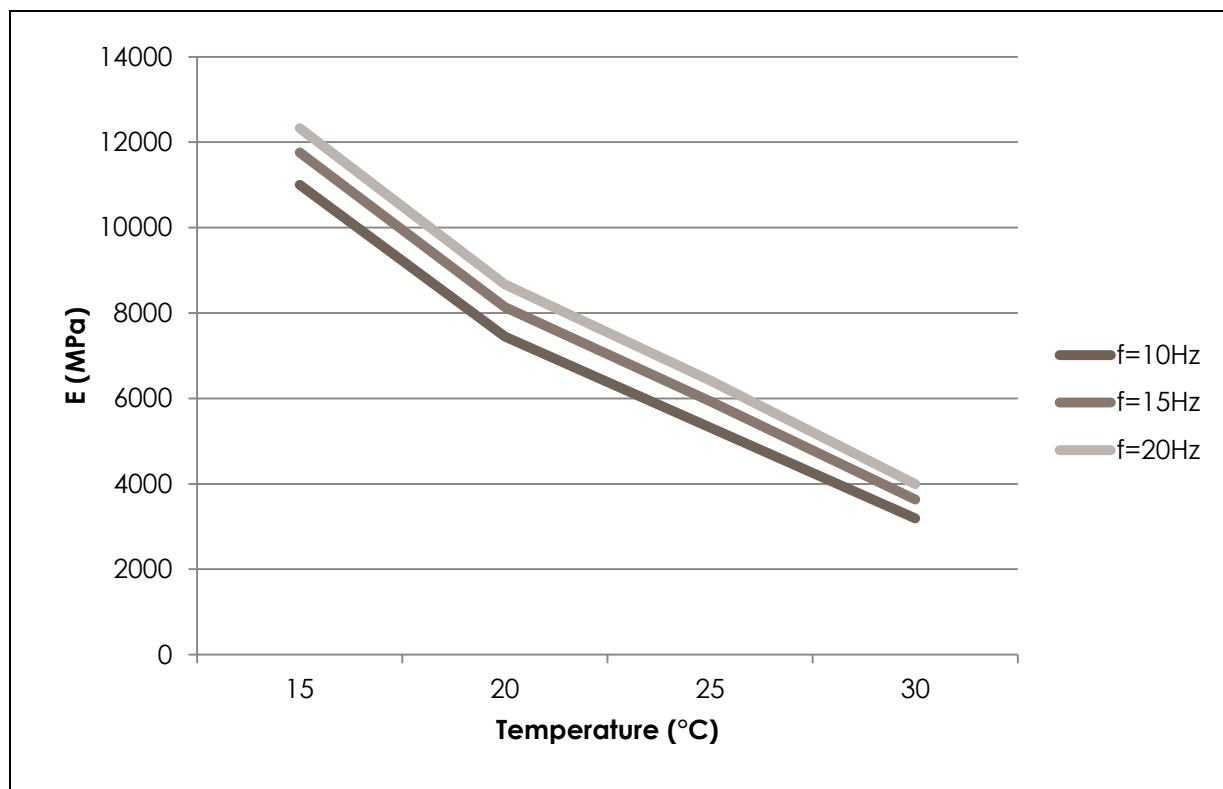
Πίνακας 6.3: Χαρακτηριστικά ασφαλικών υλικών

Υλικά	GB3	GB4
k_s	1	
k_c	1.3	
b	5	
Sh (cm)	2.5	
SN	0.3	
$\varepsilon_6 (\times 10^{-6})$	90	100
$E_{10^\circ\text{C},10\text{Hz}}$ (MPa)	12300	14550

Κάθε υλικό χαρακτηρίζεται από μία τιμή του μέτρου δυσκαμψίας E(MPa), η οποία διαφοροποιείται ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης (Εικόνες 6.4 και 6.5).



Εικόνα 6.4 : Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας συναρτήσει f, T (GB3)



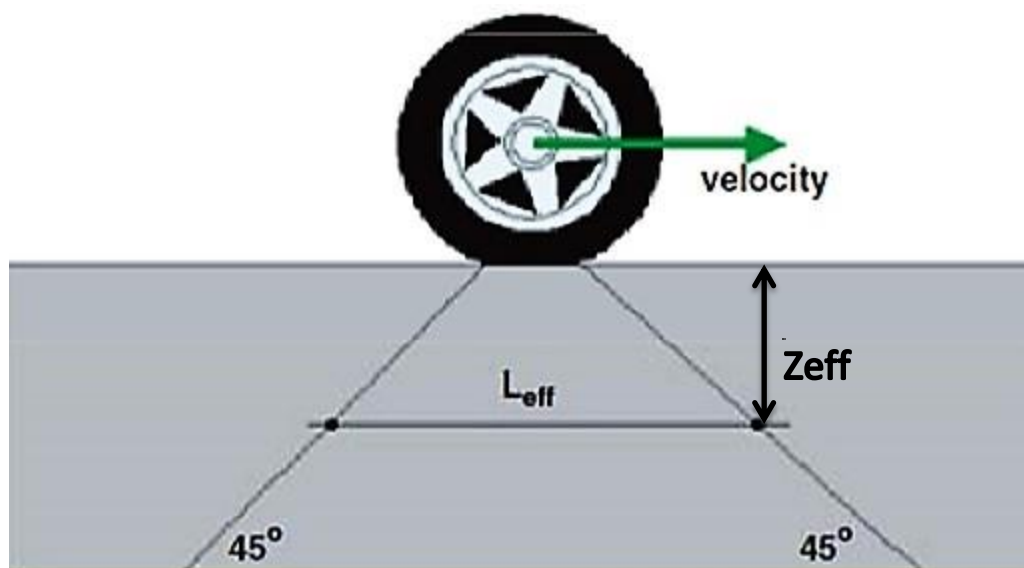
Εικόνα 6.5: Μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας συναρτήσει f, T (GB4)

Οι Εικόνες 6.4 και 6.5 περιγράφουν τη μεταβολή του μέτρου δυσκαμψίας συναρτήσει της θερμοκρασίας για επιμέρους συχνότητες φόρτισης. Παρατηρείται ότι το μέτρο δυσκαμψίας του υλικού GB3 είναι μικρότερο από το μέτρο δυσκαμψίας του υλικού GB4 στην ίδια θερμοκρασία και συχνότητα. Σε γενικές γραμμές, η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μείωση του μέτρου δυσκαμψίας για σταθερή συχνότητα, ενώ η αύξηση η συχνότητας προκαλεί αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας για σταθερή θερμοκρασία.

6.2.4 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ

Για τη διερεύνηση η συχνότητα λαμβάνει τις τιμές 10Hz (χαρακτηριστική συχνότητα σχεδιασμού), 15Hz και 20Hz. Η μεταβολή της συχνότητας επιδρά στη διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, αλλά και στη φθορά τους, μέσω της επιρροής της στην τιμή του μέτρου δυσκαμψίας των ασφαλικών στρώσεων.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον ωστόσο παρουσιάζει η σύνδεση της συχνότητας με την ταχύτητα διέλευσης ενός φορτίου. Η συχνότητα συνδέεται με τη διάρκεια του φορτίου (χρόνος φόρτισης), η οποία είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας κίνησης των οχημάτων και ανάλογη του ενεργού μήκους l_{eff} (effective length) (Ghanizadeh&Fakhri,2014) (Εικόνα 6.6).



Εικόνα 6.6: Ενεργό μήκος σε οδόστρωμα (Hajj et al., 2011)

Το ενεργό μήκος συνδέεται με την περιοχή επιρροής του φορτίου (Z_{eff}) μέσω της εξίσωσης:

$$L_{eff} = 2 \times (\alpha_c + Z_{eff}) \quad (6.1)$$

όπου,

α_c : η ακτίνα του ισοδύναμου φορτίου αναφοράς (0.125m για τη Γαλλική Μέθοδο)

Έτσι, επιλέγοντας τιμές Z_{eff} : 0.19m και 0.22m, μετά από εφαρμογή του τύπου 6.1, το ενεργό μήκος προκύπτει ίσο με 0.63m και 0.69m αντίστοιχα.

Το ενεργό μήκος συνδέεται επίσης με την ταχύτητα κίνησης (V_s) μέσω της εξίσωσης:

$$t = \frac{L_{eff}}{17.6 \times V_s} \quad (6.2)$$

όπου,

L_{eff} : ενεργό μήκος (ίντσες)

V_s : ταχύτητα κίνησης (mph)

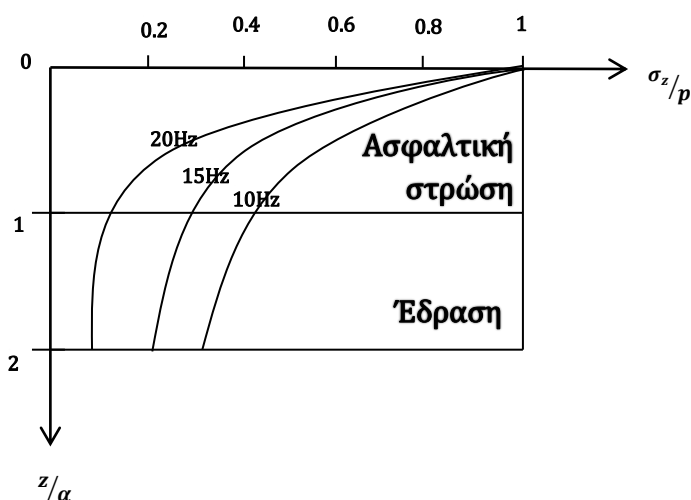
t : ο χρόνος επαφής ελαστικού με το οδόστρωμα (sec)

Ο χρόνος επαφής του ελαστικού με το οδόστρωμα συνδέεται με τη συχνότητα φόρτισης μέσω της εξίσωσης:

$$f = \frac{1}{t} \quad (6.3)$$

Με εφαρμογή των ανωτέρω τύπων, επιλέγοντας συχνότητες 10Hz, 15Hz και 20Hz, για $L_{eff}=0.63m$, οι ταχύτητες διέλευσης προκύπτουν 22kph, 33kph και 44kph, αντίστοιχα. Για $L_{eff}=0.69m$, οι αντίστοιχες ταχύτητες είναι 25kph, 35kph και 50kph. Παρατηρείται, επομένως, ότι οι τιμές της ταχύτητας διαφέρουν καθώς η τιμή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης μεταβάλλεται. Συνεπώς, η αντιστοιχία των 10Hz με 72kph (βλέπε 5.3.4) δεν έχει καθολική ισχύ.

Γενικά, μικρότεροι χρόνοι επαφής αντιστοιχούν σε μεγαλύτερες συχνότητες φόρτισης και σε μεγαλύτερες ταχύτητες κίνησης. Η ταχύτητα επηρεάζει τη λειτουργία του οδοστρώματος διότι μπορεί απλουστευτικά να μεταφραστεί ως χρόνος επαφής με το οδόστρωμα. Για τον οδοποιό η ανάπτυξη υψηλών ταχυτήτων (μικρή διάρκεια επαφής με το οδόστρωμα) συνεπάγεται μικρό βάθος κατανομής των τάσεων (z/a) και ικανοποιητικό βαθμό προστασίας της θεμελίωσης. Αντιθέτως, η κίνηση σε χαμηλές ταχύτητες, όπου ο χρόνος επαφής με το οδόστρωμα είναι μεγαλύτερος, επιβαρύνει το έδαφος καθώς τα αναπτυσσόμενα κρίσιμα εντατικά μεγέθη λαμβάνουν μεγαλύτερες τιμές (Εικόνα 6.7).



Εικόνα 6.7: Διάγραμμα κατανομής τάσεων (Burmister) - συχνότητα

Ενσωματώνοντας τη συχνότητα στο διάγραμμα κατανομής των τάσεων κατά Burmister, παρατηρείται ότι σε υψηλότερες τιμές συχνότητας οι τάσεις καταλήγουν στην έδραση εμφανώς απομειωμένες.

6.2.5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ

Αν και η θερμοκρασία σχεδιασμού κατά τη Γαλλική Μέθοδο είναι οι 15°C, στις αναλύσεις λαμβάνονται υπόψη οι θερμοκρασίες των 15°C, 20°C, 25°C και 30°C. Στόχος είναι να

διερευνηθούν οι διαφοροποιήσεις που θα επιφέρει η αλλαγή της θερμοκρασίας σχεδιασμού στη διατομή του οδοστρώματος και, κατά συνέπεια, να αξιολογηθεί εάν και κατά πόσο η Γαλλική Μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε χώρες με υψηλότερη θερμοκρασία.

6.2.6 ΠΟΣΟΣΤΟ ΔΙΑΚΥΒΕΥΣΗΣ

Το ποσοστό διακύβευσης υπεισέρχεται μόνο στο νόμο κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων και όχι στο νόμο αστοχίας της έδρασης. Σύμφωνα με την καμπύλη κόπωσης (βλέπε Εικόνα 5.4), η αύξηση του ποσοστού διακύβευσης οδηγεί σε αύξηση του επιτρεπόμενου αριθμού διελεύσεων του φορτίου αναφοράς. Για το λόγο αυτό, η διακύβευση επηρεάζει άμεσα το πάχος της ασφαλικής στρώσης και κατ'επέκταση τη φθορά της. Ωστόσο, κάνοντας θεώρηση πλήρους σύνδεσης μεταξύ των δύο στρώσεων, εκτιμάται ότι το ποσοστό διακύβευσης επηρεάζει έμμεσα τη φθορά της έδρασης. Η τιμή του συντελεστή k_r είναι η ίδια και στα δύο υλικά και μεταβάλλεται ανάλογα με το ποσοστό διακύβευσης (Πίνακας 6.4).

Πίνακας 6.4: Τιμές του συντελεστή k_r στις αναλύσεις

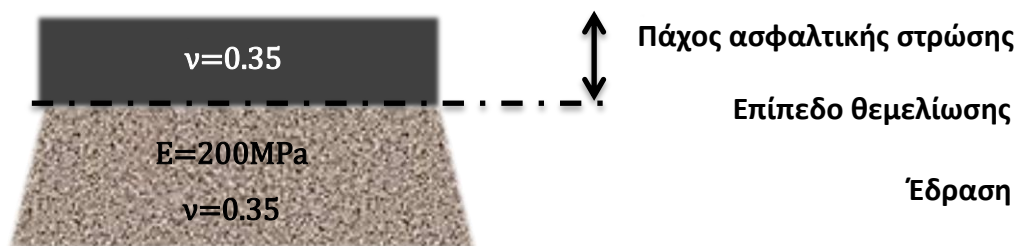
R(%)	k_r
2.5	0.703
5	0.744
10	0.794

Τα ποσοστά διακύβευσης στις εν λόγω αναλύσεις ευαισθησίας είναι 2.5%, 5% και 10%.

6.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΑΧΟΣ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΤΙΚΗΣ ΣΤΡΩΣΗΣ

6.3.1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Με σημείο εκκίνησης τη διατομή αναφοράς, το πάχος της ασφαλικής στρώσης μεταβάλλεται για διαφορετικές συνθήκες φόρτισης και ποσοστού διακύβευσης, έτσι ώστε η διατομή να παραμένει δομικά επαρκής. Το μέτρο ελαστικότητας της έδρασης παραμένει σταθερό και ίσο με 200MPa, ενώ ο λόγος Poisson και για τις δύο στρώσεις λαμβάνεται ίσος με 0.35 (Εικόνα 6.8).

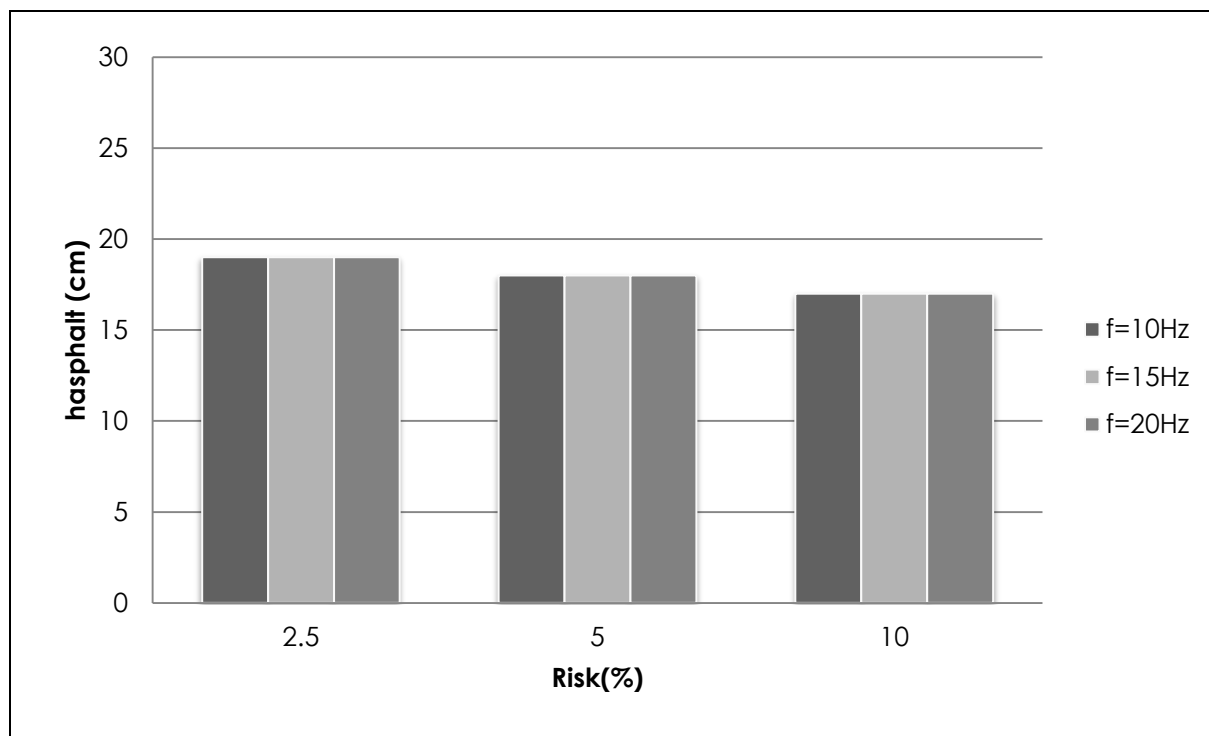


Εικόνα 6.8: Τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος μεταβλητού πάχους ασφαλτικής στρώσης

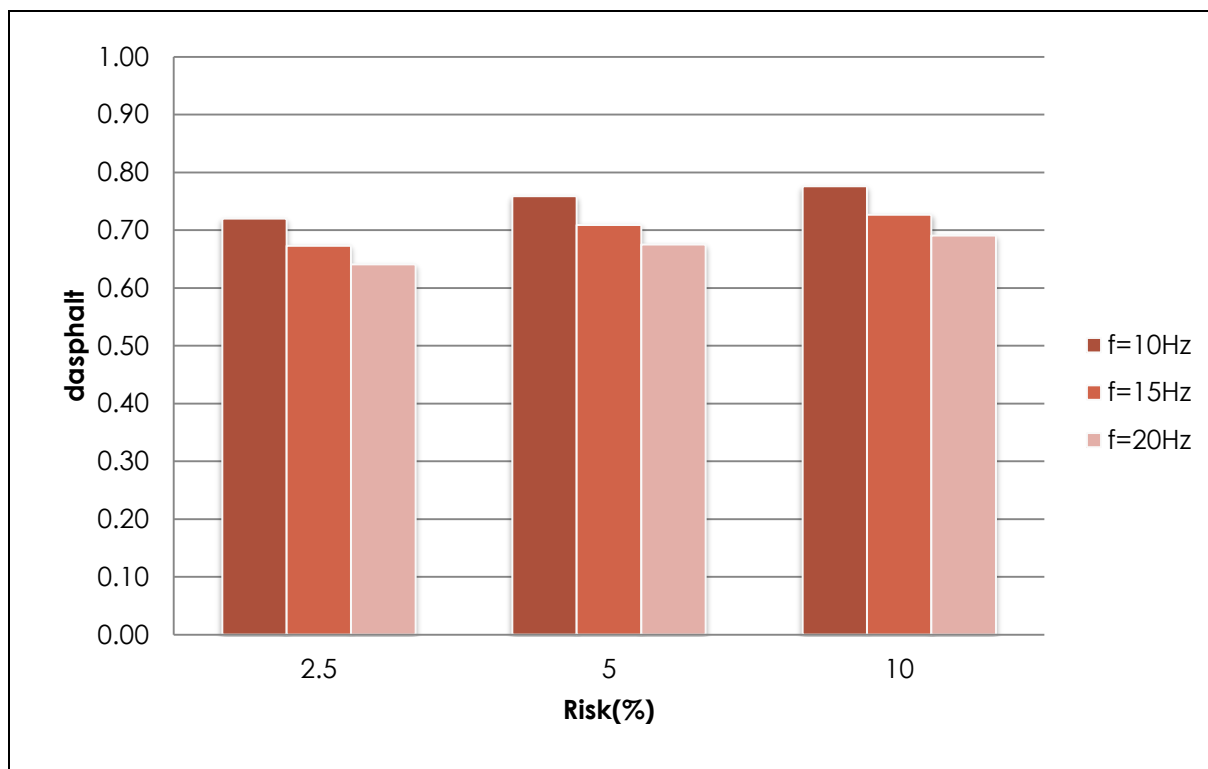
Κατά αυτό τον τρόπο διερευνάται η επίδραση των συνθηκών φόρτισης και του ποσοστού διακύβευσης στη διαστασιολόγηση εύκαμπτων οδοστρωμάτων και στο δείκτη φθοράς.

6.3.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

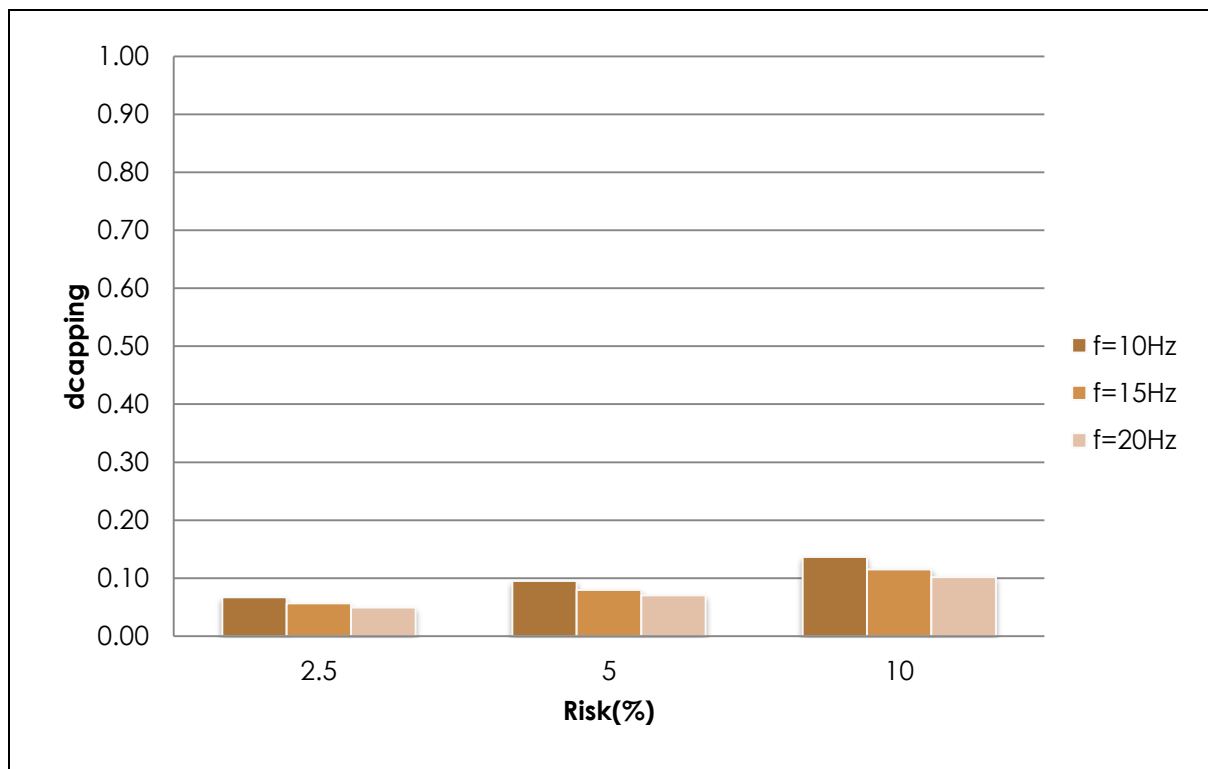
Στις Εικόνες 6.9÷6.11 παρουσιάζεται η μεταβολή του πάχους της ασφαλτικής στρώσης, η φθορά της ασφαλτικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer), αντίστοιχα, για το υλικό GB4, συναρτήσει της συχνότητας και της διακύβευσης για θερμοκρασία 15°C.



Εικόνα 6.9: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (GB4, T=15°C)



Εικόνα 6.10: Διάγραμμα φθοράς ασφαλτικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4, T=15°C)

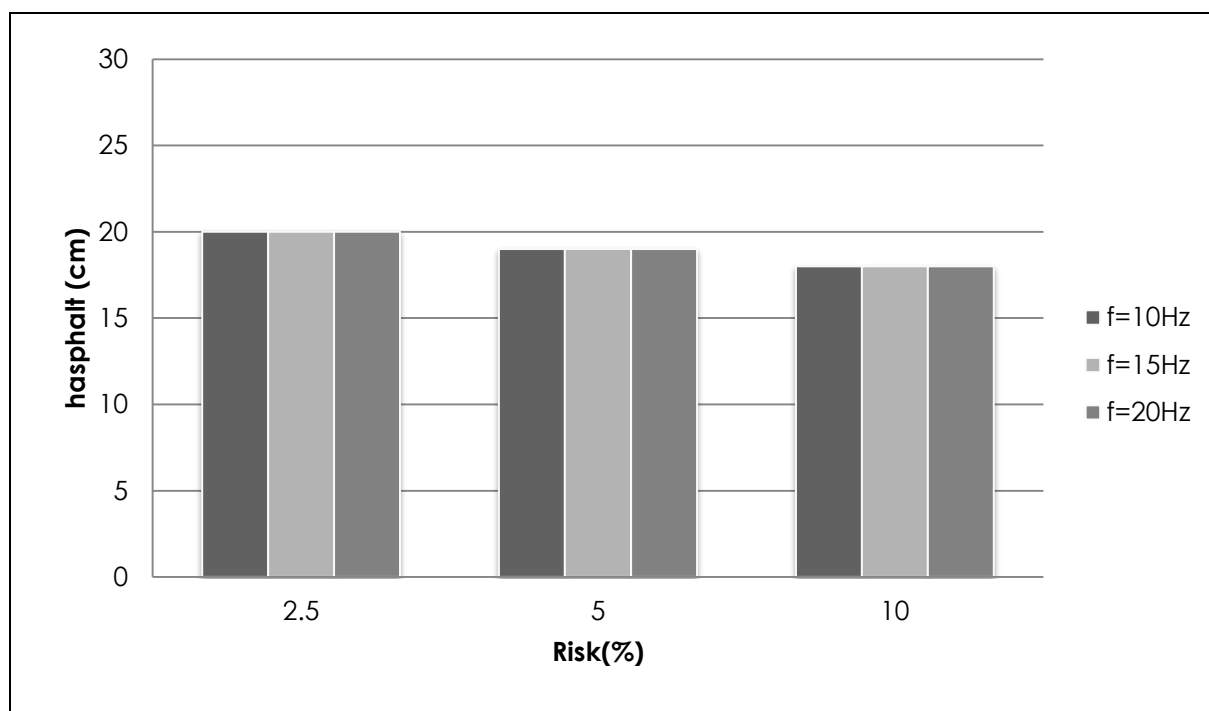


Εικόνα 6.11 : Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4, T=15°C)

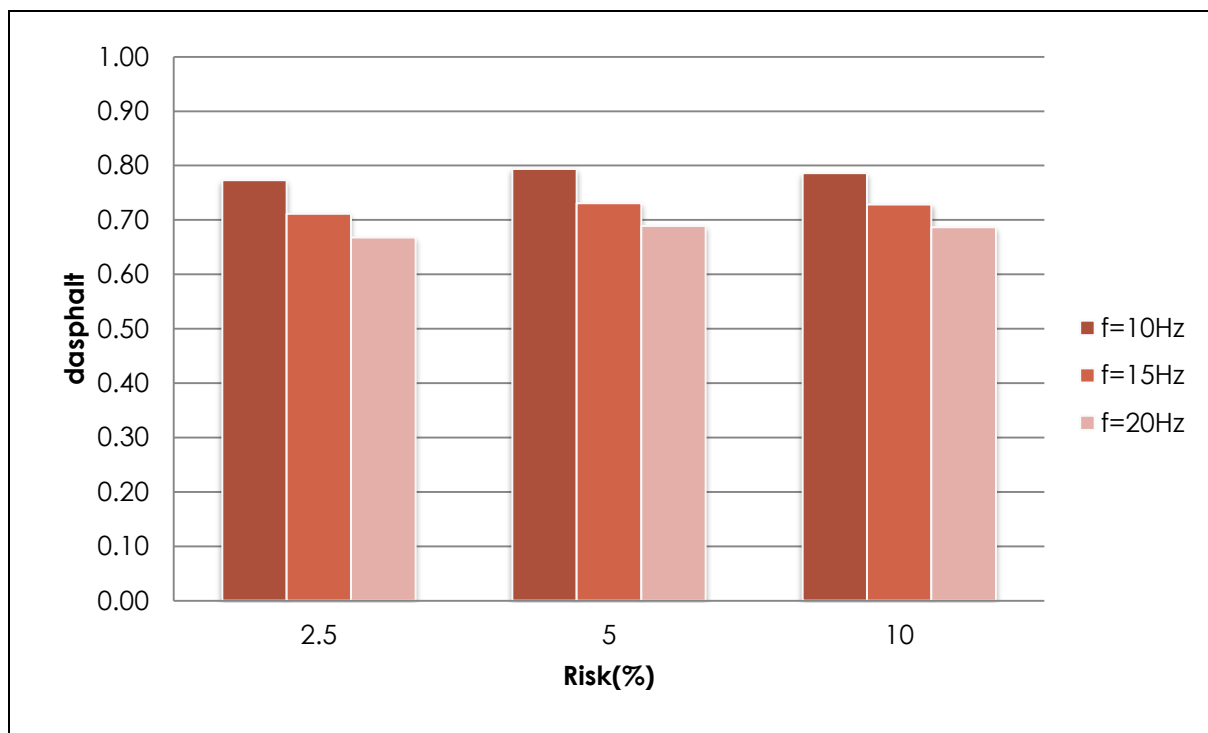
Παρατηρείται ότι η αύξηση της συχνότητας δεν έχει κάποια επιρροή στο απαιτούμενο πάχος της ασφαλτικής στρώσης για το ίδιο ποσοστό διακύβευσης. Το πάχος μεταβάλλεται με τη μεταβολή του ποσοστού διακύβευσης. Συγκεκριμένα, το πάχος της ασφαλτικής

στρώσης μειώνεται κατά 1cm με την αύξηση του ποσοστού διακύβευσης από 2.5% σε 5%, κι ομοίως κατά 1cm με την αύξηση του ποσοστού διακύβευσης από 5% σε 10%. Συνολικά, η αύξηση του ποσοστού διακύβευσης από 2.5% σε 10% έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του απαιτούμενου πάχους της ασφατικής στρώσης κατά 2cm. Όσον αφορά στη φθορά της ασφατικής στρώσης, παρατηρείται μείωση με την αύξηση της συχνότητας για το ίδιο ποσοστό διακύβευσης. Η φθορά της ασφατικής στρώσης αυξάνεται για το μικρότερο απαιτούμενο πάχος ασφατικής στρώσης και λαμβάνει μέγιστη τιμή για ποσοστό διακύβευσης 10% και συχνότητα 10Hz. Η φθορά της έδρασης ακολουθεί τη φθίνουσα πορεία της φθοράς της ασφατικής στρώσης για κάθε ποσοστό διακύβευσης. Όμοια με τη φθορά της ασφατικής στρώσης, λαμβάνει μέγιστη τιμή στη συχνότητα των 10Hz και για ποσοστό διακύβευσης 10%, όπου το απαιτούμενο πάχος της ασφατικής στρώσης είναι το ελάχιστο.

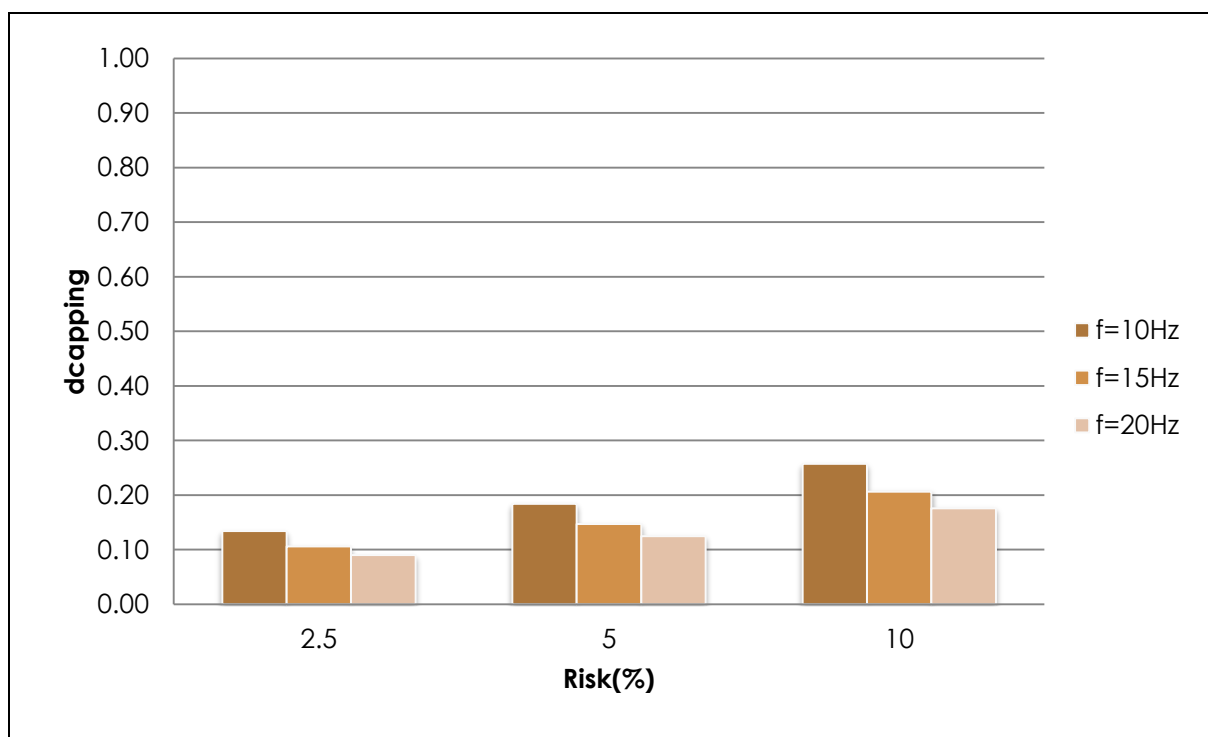
Στις Εικόνες 6.12÷6.14 παρουσιάζεται η μεταβολή του πάχους της ασφατικής στρώσης, η φθορά της ασφατικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer), αντίστοιχα, για το υλικό GB4, συναρτήσει της συχνότητας και της διακύβευσης για θερμοκρασία 20°C.



Εικόνα 6.12: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφατικής στρώσης (GB4, T=20°C)



Εικόνα 6.13: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4, T=20°C)

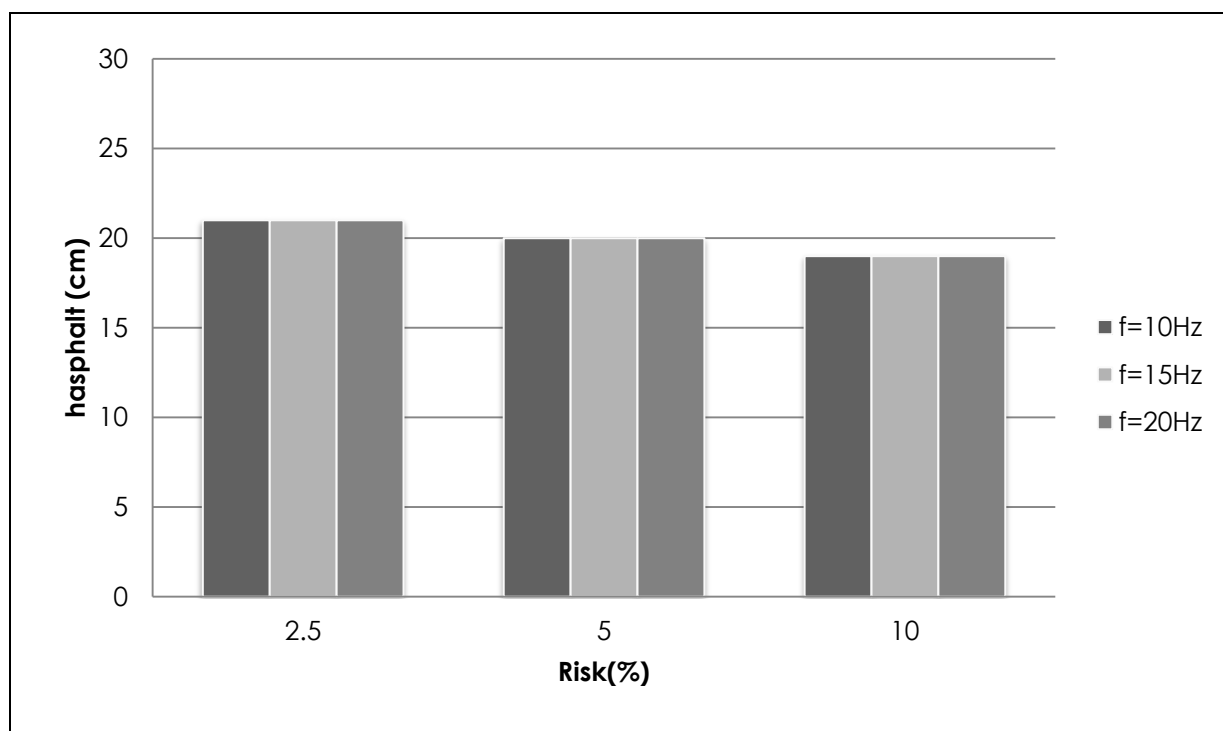


Εικόνα 6.14: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4, T=20°C)

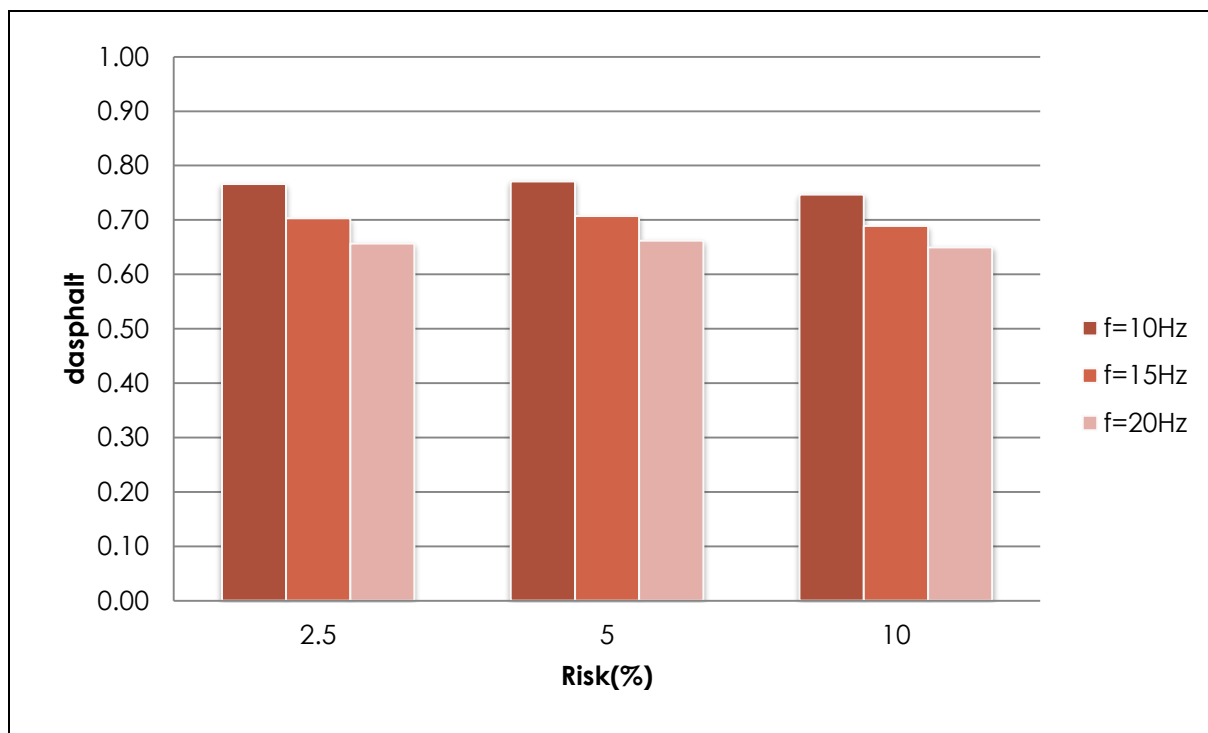
Όσον αφορά στους 20°C, γενικά παρατηρούνται μεγαλύτερα πάχη ασφαλικής στρώσης συγκριτικά με τους 15°C. Όμοια με πριν, παρατηρείται ότι η αύξηση της συχνότητας δεν έχει κάποια επιρροή στο απαιτούμενο πάχος της ασφαλικής στρώσης για το ίδιο ποσοστό

διακύβευσης. Το πάχος μεταβάλλεται με τη μεταβολή του ποσοστού διακύβευσης. Συγκεκριμένα, το πάχος της ασφαλικής στρώσης μειώνεται κατά 1cm με την αύξηση του ποσοστού διακύβευσης από 2.5% σε 5%, κι ομοίως κατά 1cm με την αύξηση του ποσοστού διακύβευσης από 5% σε 10%. Η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερες τιμές φθοράς τόσο της ασφαλικής στρώσης όσο και της έδρασης. Όσον αφορά στη φθορά της ασφαλικής στρώσης, παρατηρείται μείωση με την αύξηση της συχνότητας για το ίδιο ποσοστό διακύβευσης. Στη θερμοκρασία των 20°C, η φθορά της ασφαλικής στρώσης λαμβάνει μέγιστη τιμή επίσης στη συχνότητα των 10Hz αλλά για μικρότερο ποσοστό διακύβευσης (5%). Η έδραση και στην προκειμένη περίπτωση καταπονείται σε μεγαλύτερο βαθμό στη μικρότερη συχνότητα (10Hz), για το μεγαλύτερο ποσοστό διακύβευσης (10%).

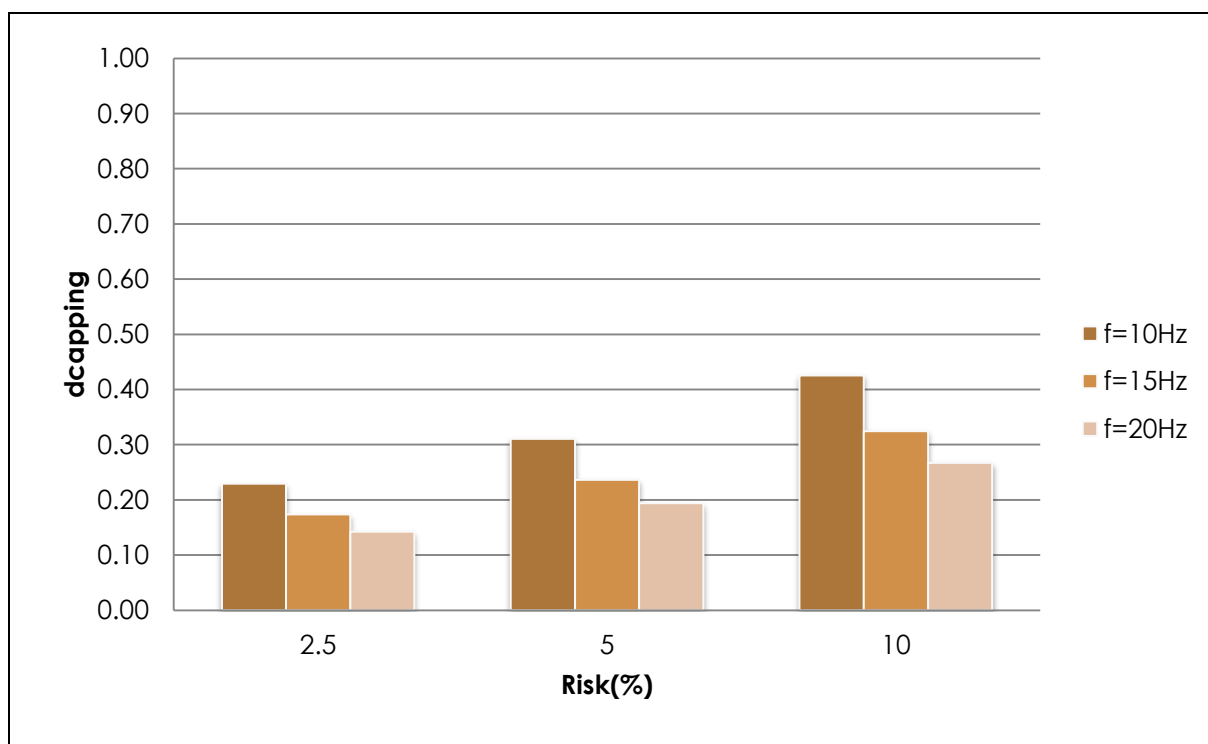
Στις Εικόνες 6.15÷6.17 παρουσιάζεται η μεταβολή του πάχους της ασφαλικής στρώσης, η φθορά της ασφαλικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer) , αντίστοιχα, για το υλικό GB4, συναρτήσει της συχνότητας και της διακύβευσης για θερμοκρασία 25°C.



Εικόνα 6.15 : Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB4, T=25°C)



Εικόνα 6.16: Διάγραμμα φθοράς ασφαλτικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4, T=25°C)

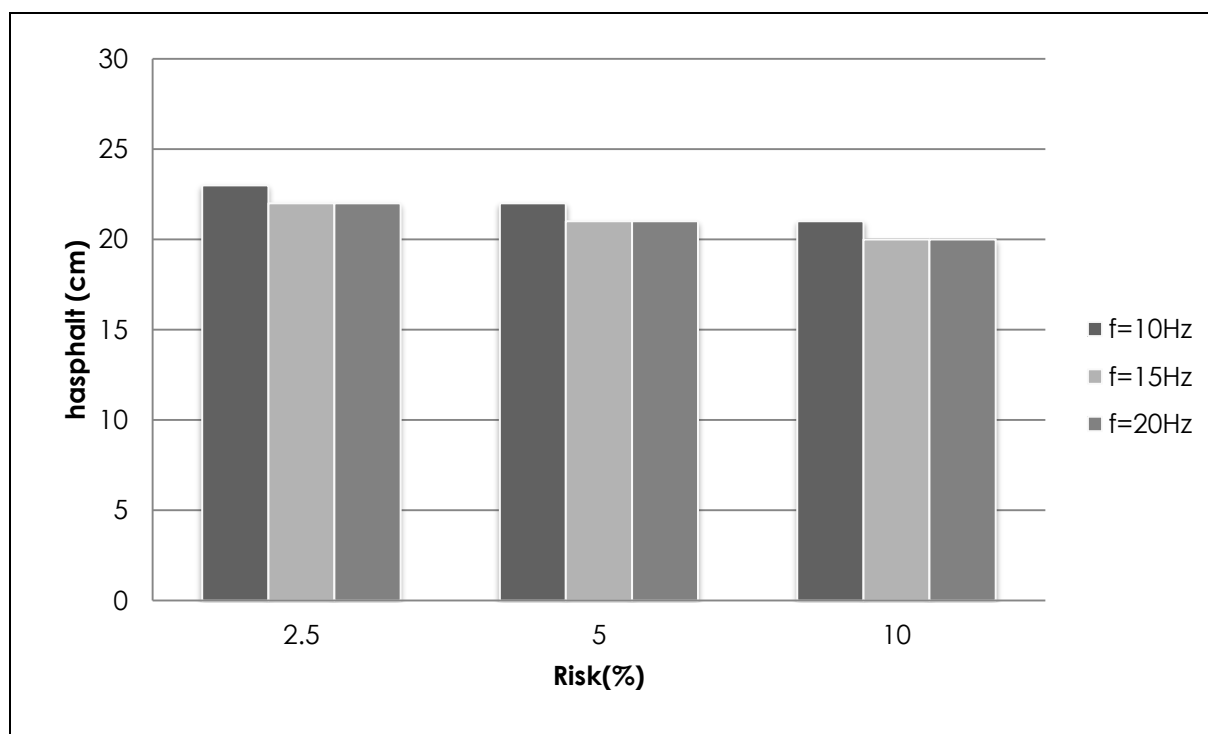


Εικόνα 6.17: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4, T=25°C)

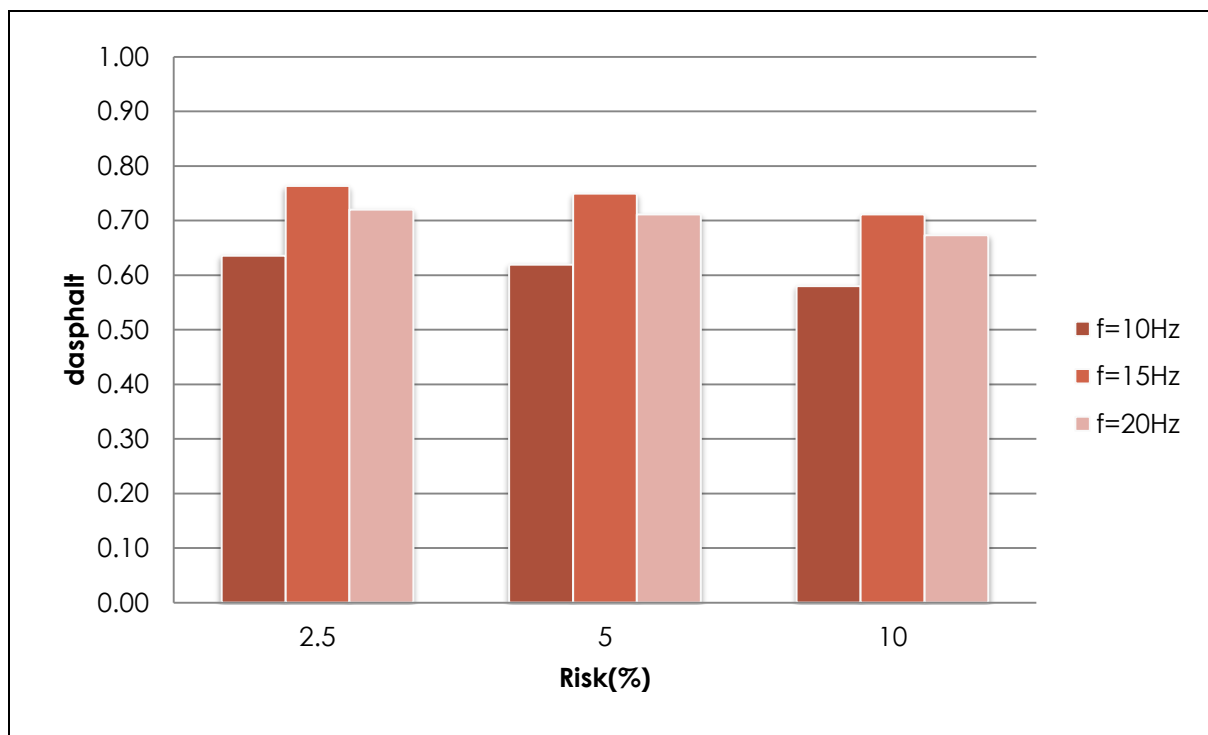
Όσον αφορά στους 25°C, γενικά παρατηρούνται μεγαλύτερα πάχη ασφαλτικής στρώσης συγκριτικά με τους 20°C. Όμοια, παρατηρείται ότι η αύξηση της συχνότητας δεν έχει κάποια

επιρροή στο απαιτούμενο πάχος της ασφαλικής στρώσης για το ίδιο ποσοστό διακύβευσης. Το πάχος μεταβάλλεται με τη μεταβολή του ποσοστού διακύβευσης (μείωση απαιτούμενου πάχους ασφαλικής στρώσης κατά 1cm με την αύξηση του ποσοστού διακύβευσης από 2.5% σε 5%, και περαιτέρω μείωση κατά 1cm με την αύξηση του ποσοστού διακύβευσης από 5% σε 10%). Όσον αφορά στη φθορά της ασφαλικής στρώσης, παρατηρείται μείωση με την αύξηση της συχνότητας για το ίδιο ποσοστό διακύβευσης. Στη θερμοκρασία των 25°C, η φθορά της ασφαλικής στρώσης λαμβάνει μέγιστη τιμή επίσης στη συχνότητα των 10Hz αλλά εξίσου για ποσοστά διακύβευσης 2.5% και 5%. Η έδραση και στην προκειμένη περίπτωση καταπονείται σε μεγαλύτερο βαθμό στη μικρότερη συχνότητα (10Hz), για το μεγαλύτερο ποσοστό διακύβευσης (10%).

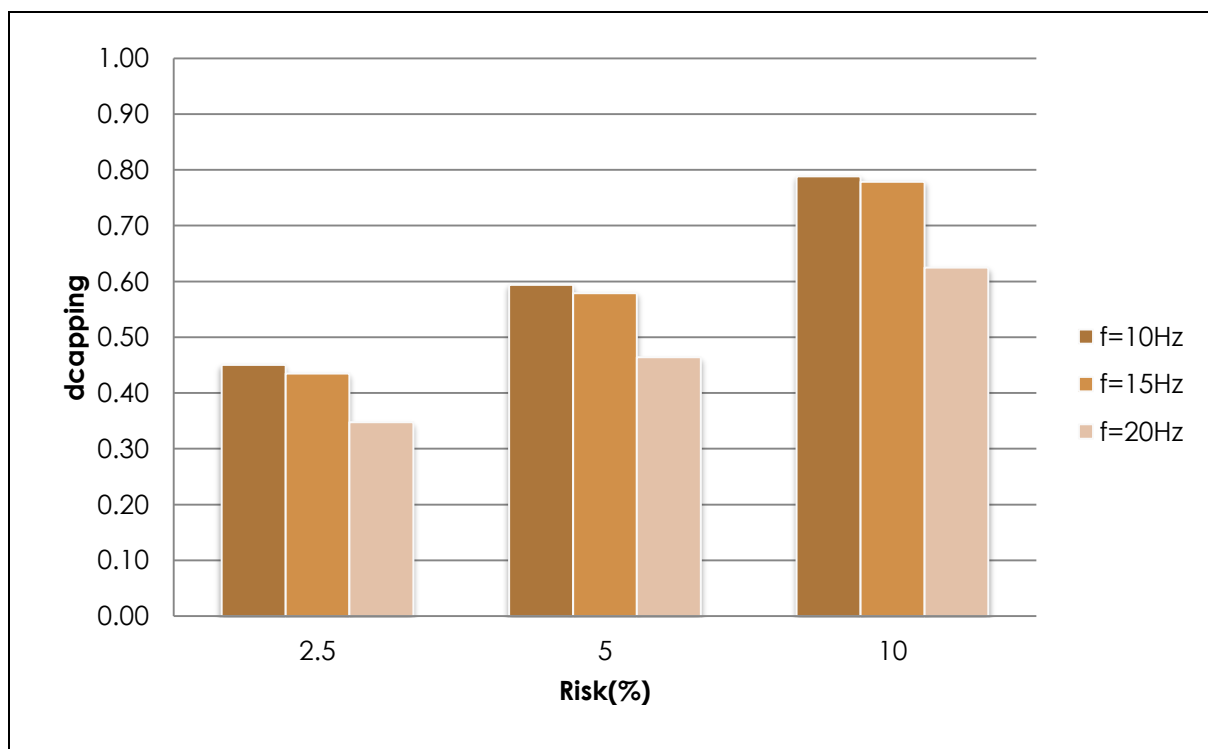
Στις Εικόνες 6.18÷6.20 παρουσιάζεται η μεταβολή του πάχους της ασφαλικής στρώσης, η φθορά της ασφαλικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer), αντίστοιχα, για το υλικό GB4, συναρτήσει της συχνότητας και της διακύβευσης για θερμοκρασία 30°C.



Εικόνα 6.18: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB4, T=30°C)



Εικόνα 6.19: Διάγραμμα φθοράς ασφαλτικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4, T=30°C)



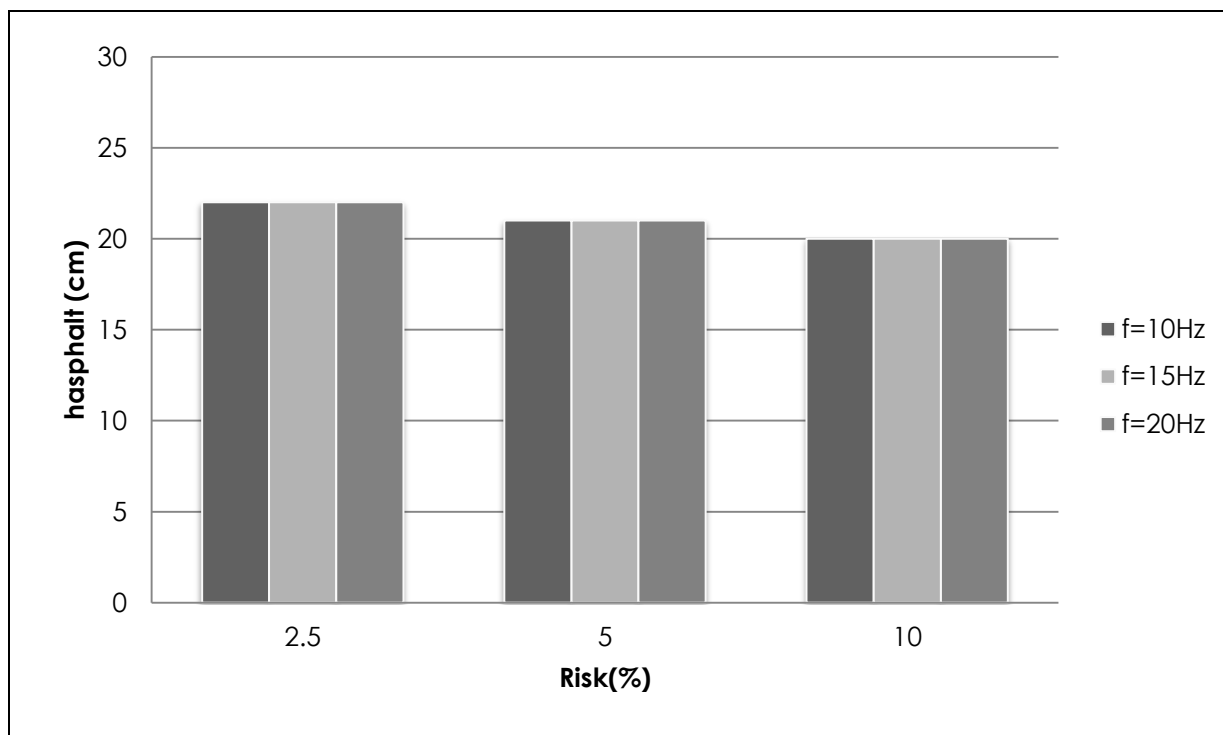
Εικόνα 6.20: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB4, T=30°C)

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες θερμοκρασίες, η διατομή αποτελούμενη από ασφαλτόμιγμα τύπου GB4 παρουσιάζει διαφορετική συμπεριφορά στους 30°C. Αρχικά,

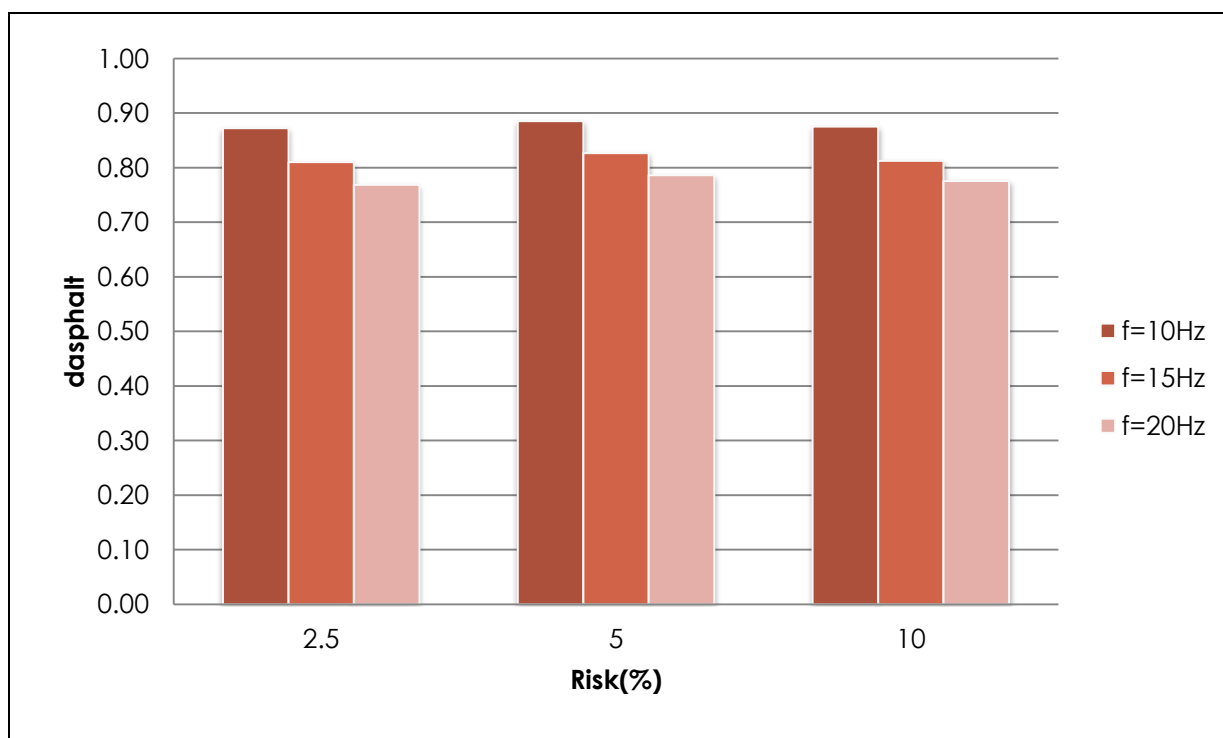
διαπιστώνεται ότι η αύξηση της συχνότητας πλέον επιδρά στο απαιτούμενο πάχος της ασφαλικής στρώσης. Συγκεκριμένα, η αύξηση σε μικρό φάσμα συχνοτήτων (από 10Hz σε 15Hz) οδηγεί στη μείωση του πάχους της ασφαλικής στρώσης κατά 1cm, το οποίο ωστόσο σταθεροποιείται κατά τη μετάβαση σε υψηλότερο φάσμα συχνοτήτων (από 15Hz σε 20Hz). Η αρχική μείωση του πάχους έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της φθοράς της ασφαλικής στρώσης και η ακόλουθη σταθεροποίησή του, τη μείωση της φθοράς της ασφαλικής στρώσης για μεγαλύτερη συχνότητα. Μάλιστα, σε κάθε περίπτωση, η φθορά της ασφαλικής στρώσης είναι μεγαλύτερη στη συχνότητα των 20Hz από ότι σε εκείνη των 10Hz. Τη μέγιστη τιμή της λαμβάνει στη συχνότητα των 15Hz, ανεξάρτητα από το ποσοστό διακύβευσης. Τέλος, η έδραση καταπονείται σε μεγαλύτερο βαθμό στις μικρότερες συχνότητες σε κάθε ποσοστό διακύβευσης, και η φθορά της λαμβάνει μέγιστη τιμή για ποσοστό 10% και συχνότητα 10Hz.

Τονίζεται ότι, για το υλικό GB4, η φθορά της έδρασης προκύπτει μεγαλύτερη από τη φθορά της ασφαλικής στρώσης στους 30°C για ποσοστό διακύβευσης 10% και συχνότητες 10Hz και 15Hz. Γίνεται δοκιμή μείωσης του ασφαλικού πάχους προκειμένου να αυξηθεί η φθορά του, ωστόσο σε αυτή την περίπτωση η φθορά παίρνει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας και απορρίπτεται. Έτσι, διατηρείται η αρχική επιλογή του πάχους εφόσον και οι δύο στρώσεις ικανοποιούν το κριτήριο φθοράς ($d < 1$). Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της μικρής τιμής του μέτρου δυσκαμψίας της ασφαλικής στρώσης, στην θερμοκρασία των 30°C, οι τάσεις δεν απομειώνονται επαρκώς και προκαλείται μεγαλύτερη καταπόνηση της έδρασης.

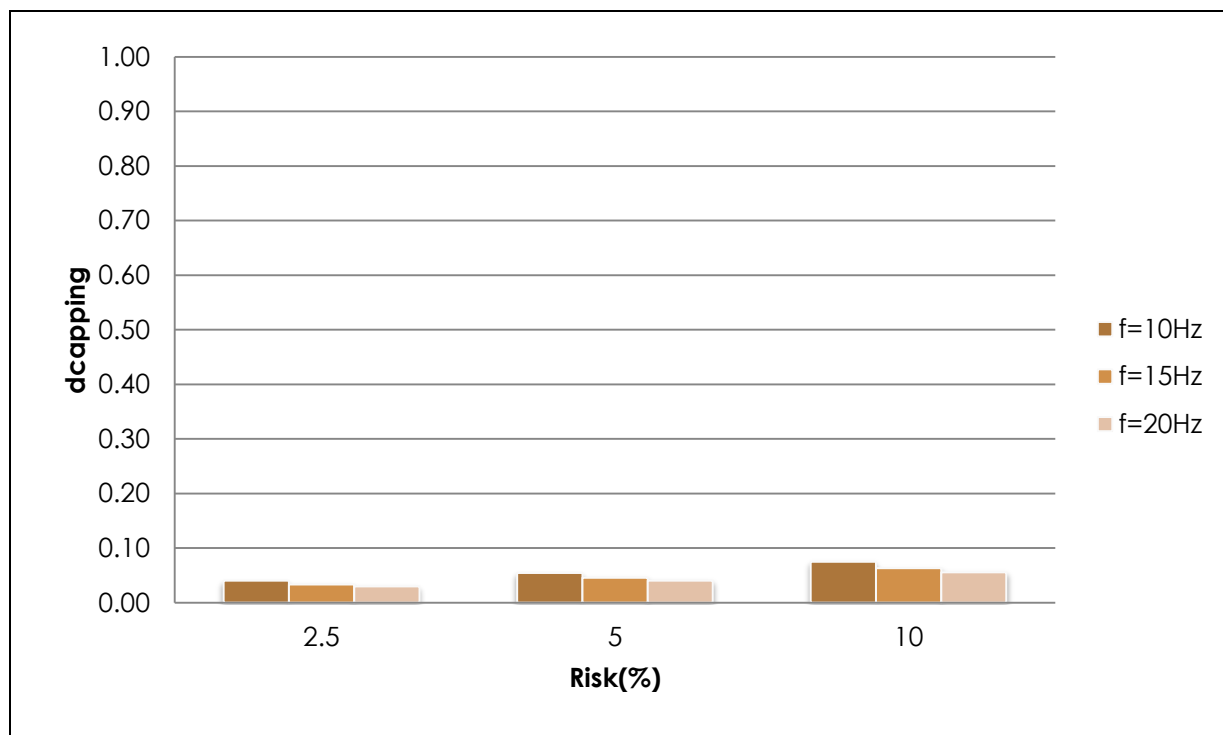
Στις Εικόνες 6.21÷6.23 παρουσιάζεται η μεταβολή του πάχους της ασφαλικής στρώσης, η φθορά της ασφαλικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer), αντίστοιχα, για το υλικό GB3, συναρτήσει της συχνότητας και της διακύβευσης για θερμοκρασία 15°C.



Εικόνα 6.21: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB3, $T=15^{\circ}\text{C}$)



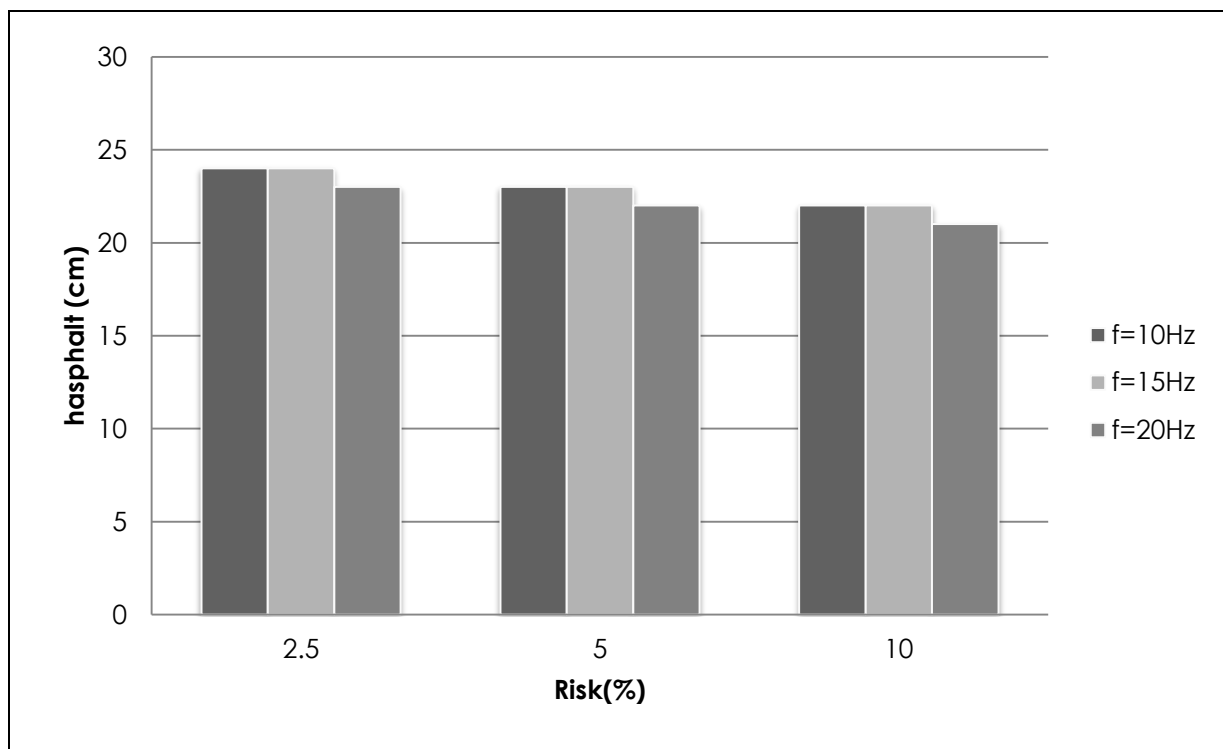
Εικόνα 6.22: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3, $T=15^{\circ}\text{C}$)



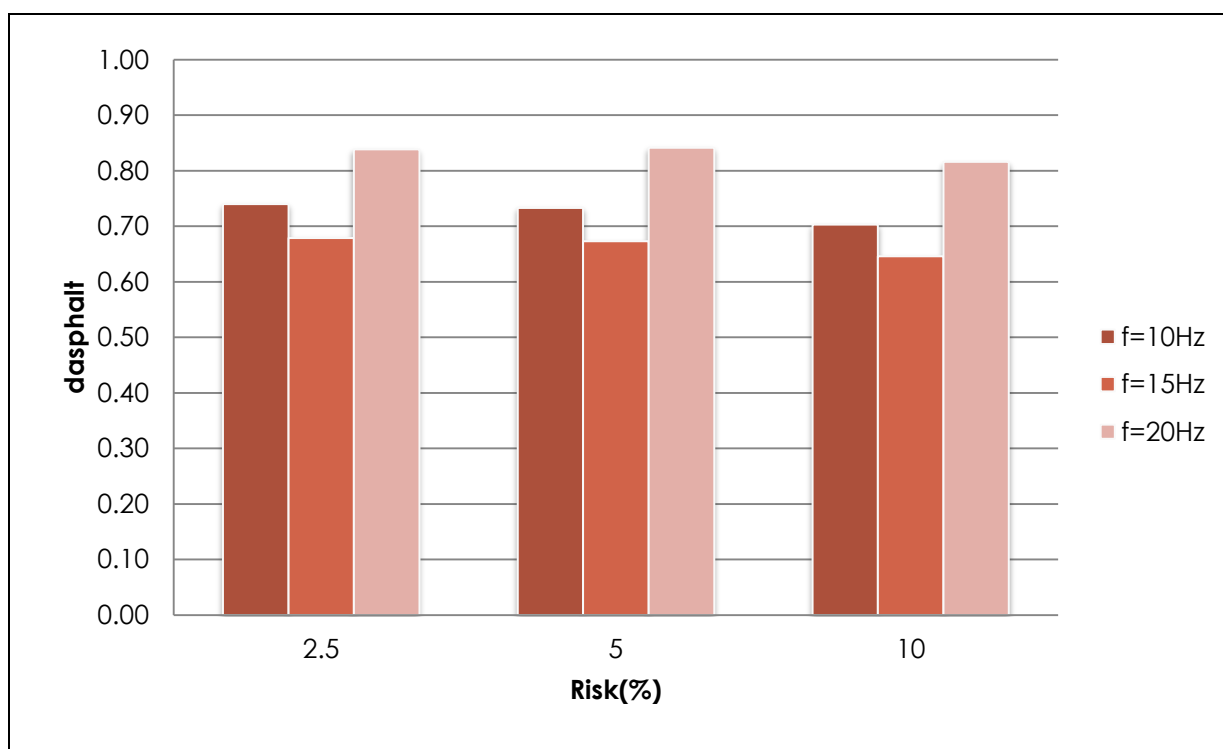
Εικόνα 6.23: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3, T=15°C)

Αντίστοιχα με το υλικό GB4, όσον αφορά στο υλικό GB3, η μεταβολή της συχνότητας δεν επηρεάζει το απαιτούμενο πάχος για το ίδιο ποσοστό διακύβευσης. Το πάχος μεταβάλλεται στους 15°C με τη μεταβολή του ποσοστού διακύβευσης. Ειδικότερα, η αύξηση του ποσοστού διακύβευσης οδηγεί στη μείωση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλικής στρώσης κατά 1cm τόσο κατά τη μετάβαση από 2.5% σε 5%, όσο και κατά τη μετάβαση από 5% σε 10%. Παρά το γεγονός ότι το πάχος μένει αμετάβλητο για το ίδιο ποσοστό διακύβευσης, η φθορά της ασφαλικής στρώσης διαρκώς μειώνεται όσο η συχνότητα φόρτισης αυξάνεται. Λαμβάνει μέγιστη τιμή στη συχνότητα των 10Hz κι ελάχιστη στη συχνότητα των 20Hz ανεξαρτήτως του ποσοστού διακύβευσης. Η φθορά της έδρασης ακολουθεί φθίνουσα πορεία με την αύξηση της συχνότητας, για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης, με τιμές που μεγιστοποιούνται στη συχνότητα των 10Hz σε κάθε ποσοστό διακύβευσης.

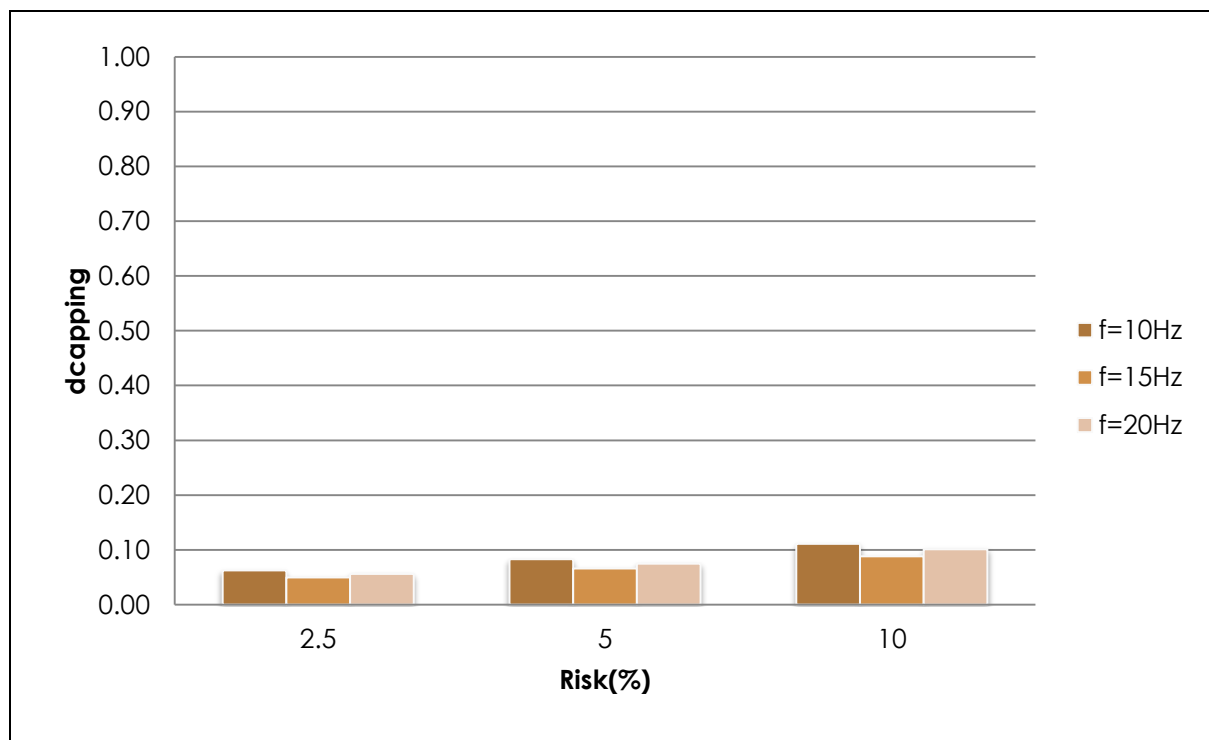
Στις Εικόνες 6.24÷6.26 παρουσιάζεται η μεταβολή του πάχους της ασφαλικής στρώσης, η φθορά της ασφαλικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer), αντίστοιχα, για το υλικό GB3, συναρτήσει της συχνότητας και της διακύβευσης για θερμοκρασία 20°C.



Εικόνα 6.24: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (GB3, T=20°C)



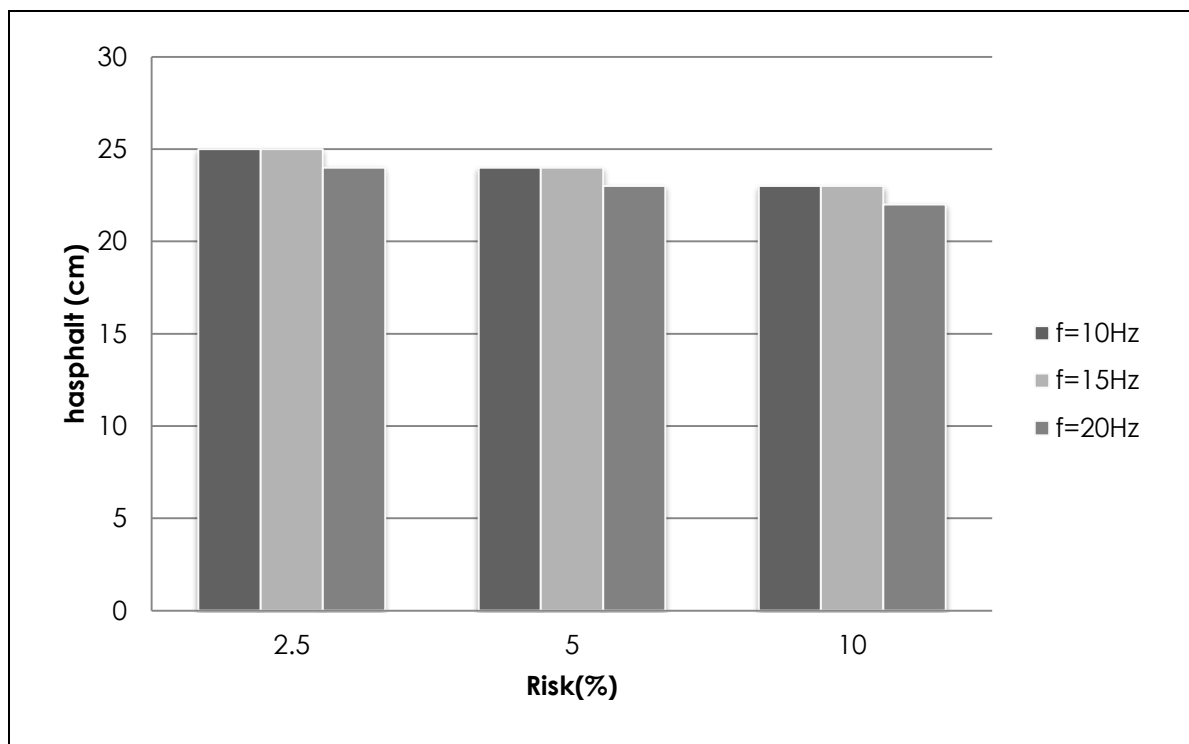
Εικόνα 6.25: Διάγραμμα φθοράς ασφαλτικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3, T=20°C)



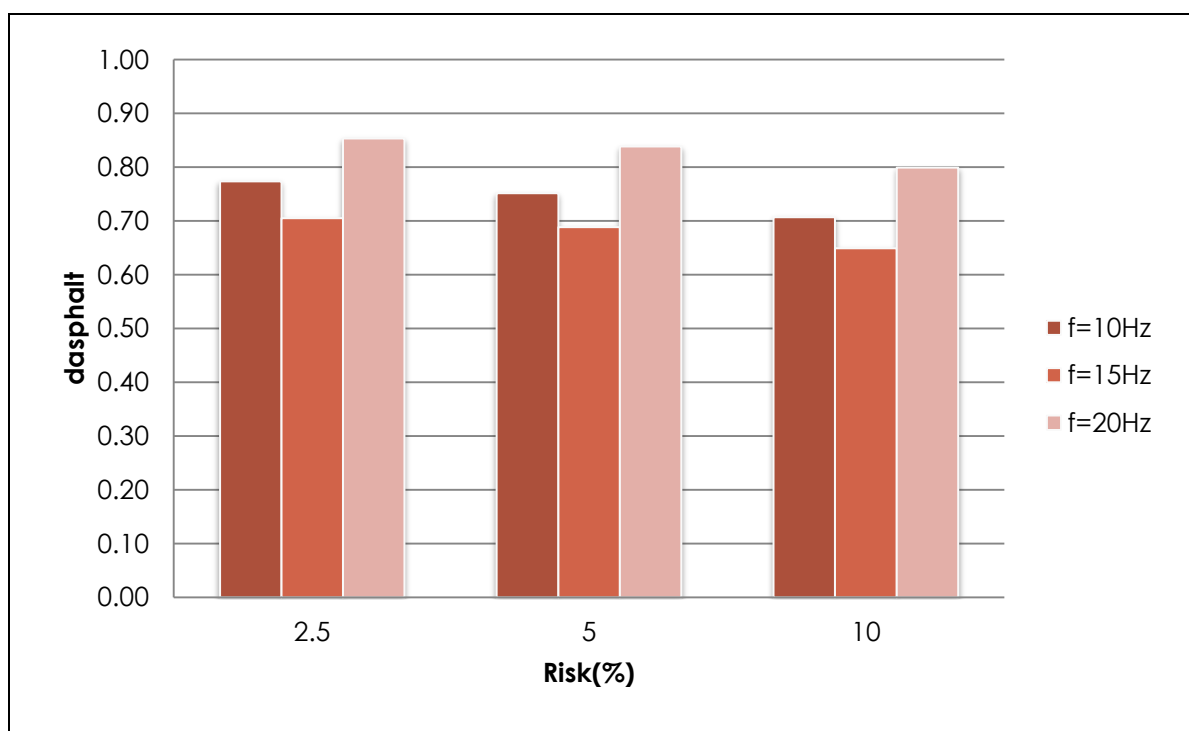
Εικόνα 6.26: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3, T=20°C)

Όσον αφορά στη συχνότητα, παρατηρείται ότι για αύξηση από τα 10Hz στα 15Hz δε μεταβάλλεται η τιμή του απαιτούμενου πάχους της ασφαλικής στρώσης της διατομής για το ίδιο ποσοστό διακύβευσης. Ωστόσο, η αύξηση της συχνότητας από τα 15Hz στα 20Hz οδηγεί στη μείωση του απαιτούμενου πάχους κατά 1cm σε κάθε ποσοστό διακύβευσης. Για σταθερή συχνότητα, με την αύξηση του ποσοστού διακύβευσης μειώνεται το πάχος της ασφαλικής στρώσης κατά 1cm. Όσον αφορά στη φθορά της ασφαλικής στρώσης (και της έδρασης), στις περιπτώσεις όπου το πάχος είναι σταθερό, αυτή μειώνεται. Όταν όμως το πάχος μειώνεται, η φθορά τους αυξάνεται ανομοιόμορφα σε σχέση με τη συχνότητα. Συγκεκριμένα, η ασφαλική στρώση καταπονείται στο μέγιστο βαθμό στη συχνότητα των 20Hz, για ποσοστά διακύβευσης 2.5% και 5% εξίσου, ενώ η φθορά της έδρασης μεγιστοποιείται στις συχνότητες των 10Hz και στη θερμοκρασία των 20 °C.

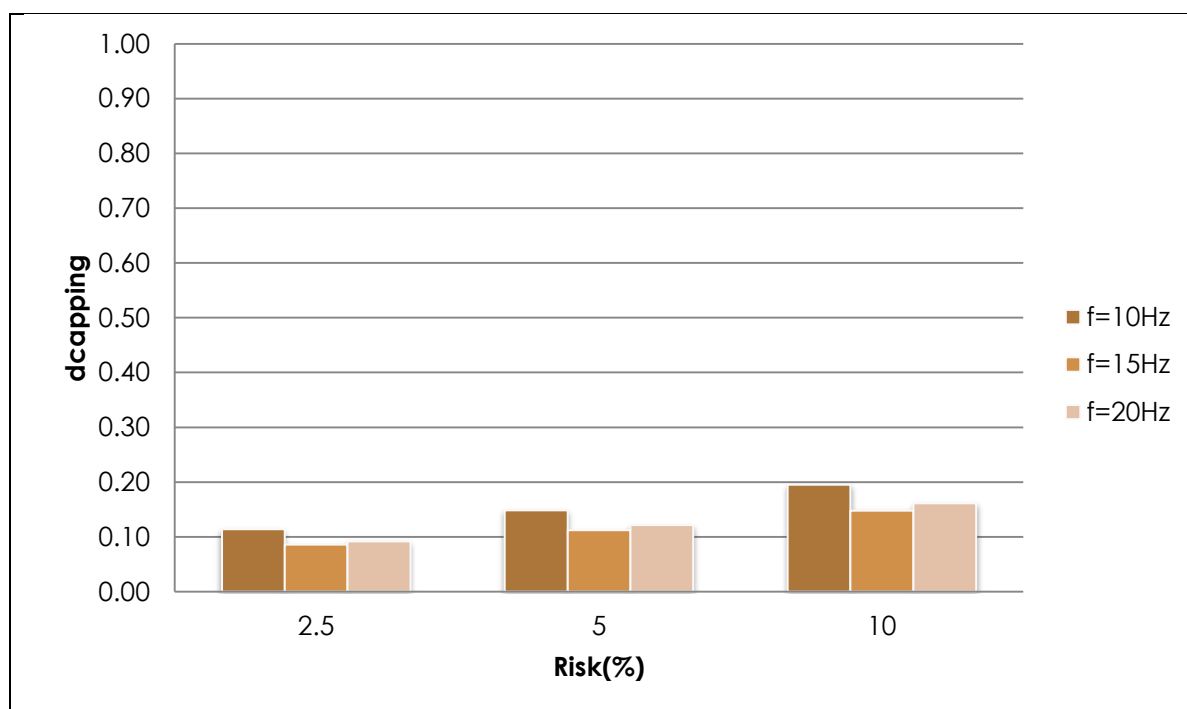
Στις Εικόνες 6.27÷6.29 παρουσιάζεται η μεταβολή του πάχους της ασφαλικής στρώσης, η φθορά της ασφαλικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer), αντίστοιχα, για το υλικό GB3, συναρτήσει της συχνότητας και της διακύβευσης για θερμοκρασία 25°C.



Εικόνα 6.27: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλτικής στρώσης (GB3, T=25°C)



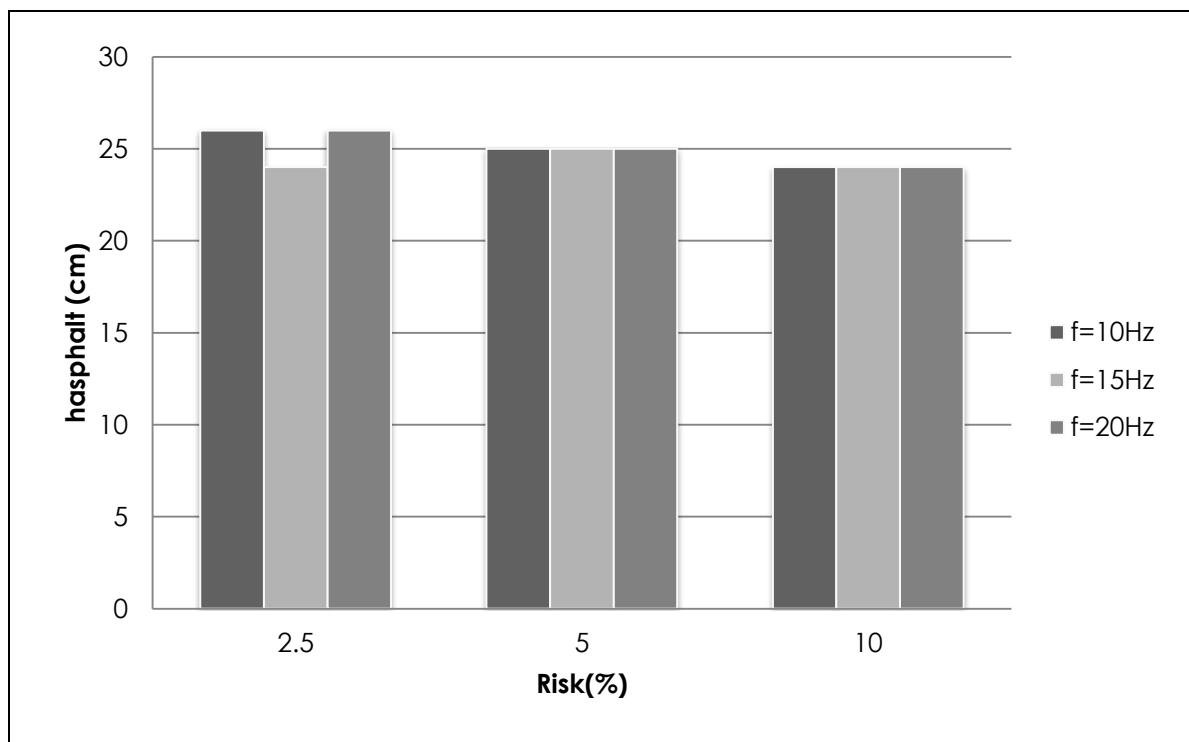
Εικόνα 6.28: Διάγραμμα φθοράς ασφαλτικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3, T=25°C)



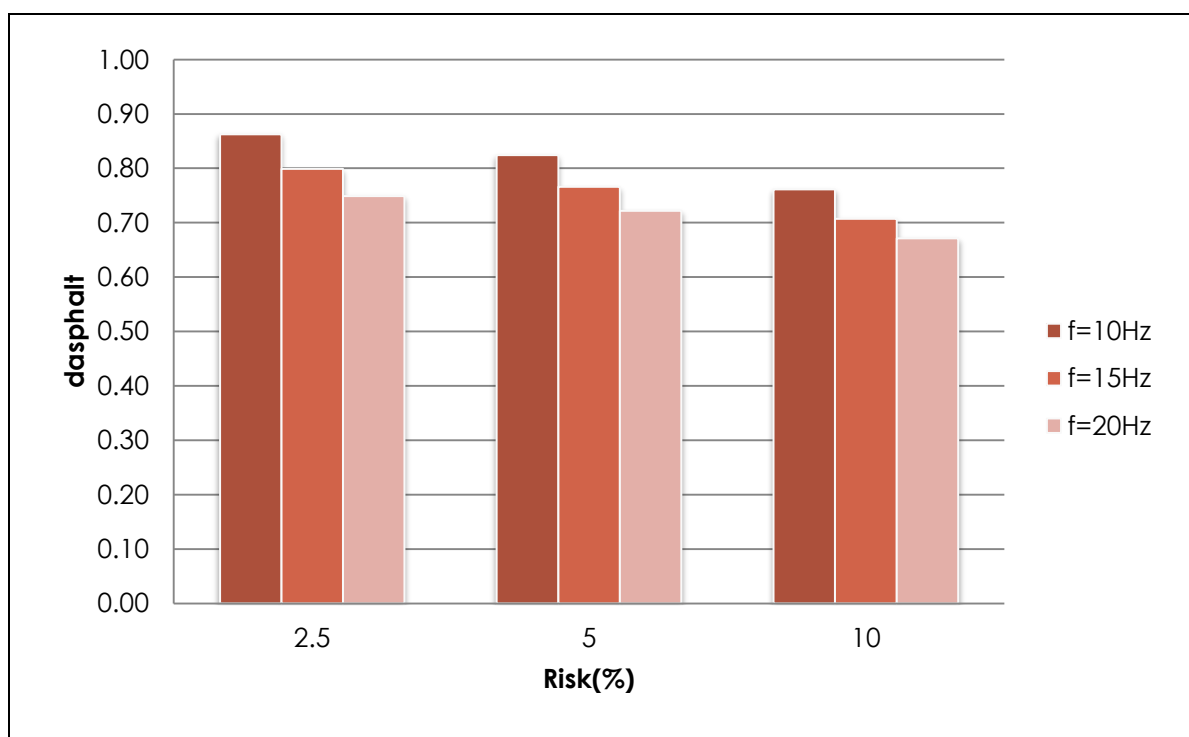
Εικόνα 6.29: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3, T=25°C)

Όπως παρατηρήθηκε και στη θερμοκρασία των 20°C, η μεταβολή της συχνότητας επιδρά στο απαιτούμενο πάχος της ασφαλικής στρώσης μόνο κατά την αύξησή της από τα 15Hz στα 20Hz για κάθε ποσοστό διακύβευσης, μειώνοντάς το κατά 1cm. Η αύξησή της από τα 10Hz στα 15Hz δεν επηρεάζει το απαιτούμενο πάχος της ασφαλικής στρώσης. Όσον αφορά στη φθορά της ασφαλικής στρώσης (και της έδρασης), στις περιπτώσεις όπου το πάχος είναι σταθερό, αυτή μειώνεται. Όταν όμως το πάχος μειώνεται, η φθορά τους αυξάνεται ανομοιόμορφα σε σχέση με τη συχνότητα. Συγκεκριμένα, η ασφαλική στρώση καταπονείται στο μέγιστο βαθμό στη συχνότητα των 20Hz και για ποσοστό διακύβευσης 2.5%, ενώ η φθορά της έδρασης μεγιστοποιείται στις συχνότητες των 10Hz και στη θερμοκρασία των 25 °C.

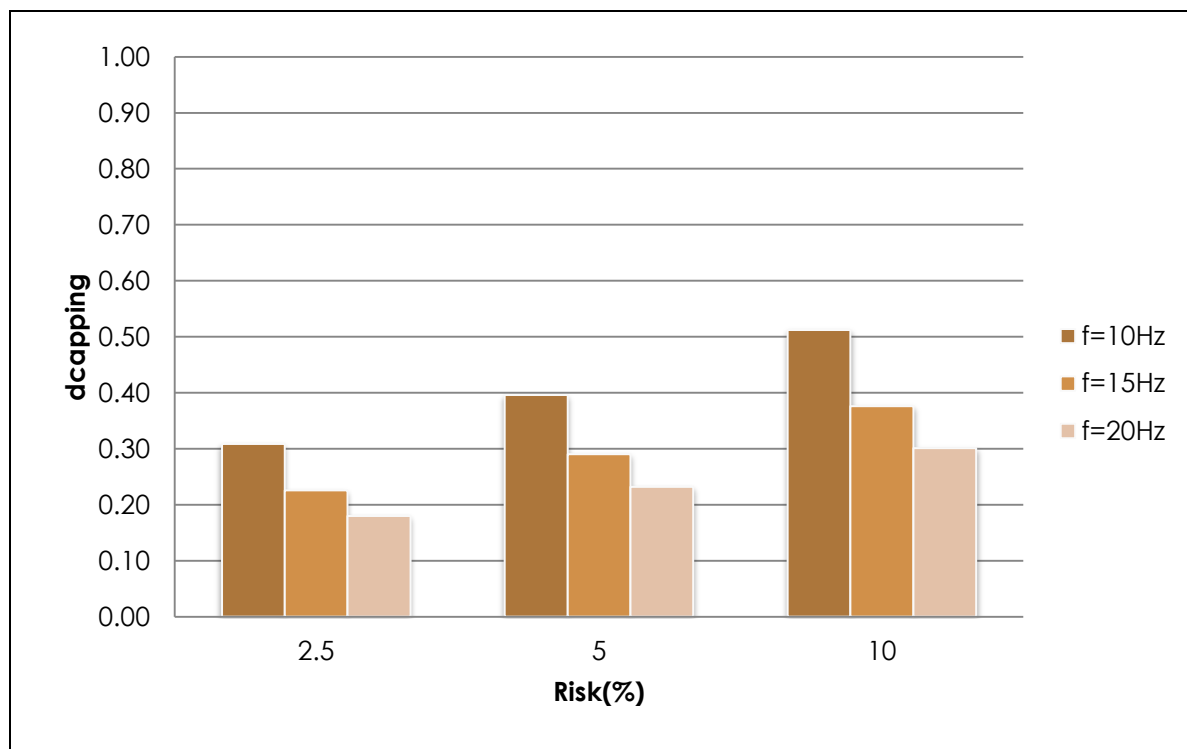
Στις Εικόνες 6.30÷6.32 παρουσιάζεται η μεταβολή του πάχους της ασφαλικής στρώσης, η φθορά της ασφαλικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer), αντίστοιχα, για το υλικό GB3, συναρτήσει της συχνότητας και της διακύβευσης για θερμοκρασία 30°C.



Εικόνα 6.30: Διάγραμμα μεταβολής πάχους ασφαλικής στρώσης (GB3, T=30°C)



Εικόνα 6.31: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3, T=30°C)



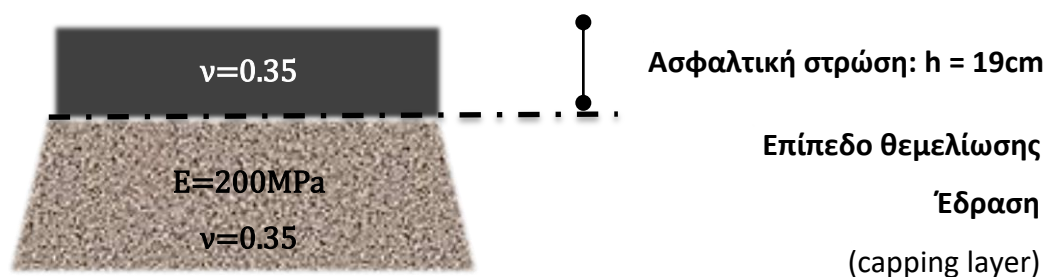
Εικόνα 6.32: Διάγραμμα φθοράς έδρασης σε διατομή μεταβλητού πάχους (GB3, T=30°C)

Κατά τη μελέτη του υλικού GB3 εντοπίζεται μία ιδιαιτερότητα στους 30°C όπου για ποσοστό διακύβευσης 2.5% προκύπτει μία αυξομείωση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλικής στρώσης κατά 1cm. Κατά τη μετάβαση από τα 15Hz στα 20Hz κρίθηκε απαραίτητη η αύξηση του ασφαλικού πάχους κατά 1cm έτσι ώστε η διατομή να είναι δομικά επαρκής. Ωστόσο, το πάχος της ασφαλικής στρώσης δεν παρουσιάζει την ίδια μεταβολή συναρτήσει της συχνότητας για μεγαλύτερα ποσοστά διακύβευσης (5% και 10%). Σημειώνεται ότι η αρχική μείωση του πάχους (από τα 10Hz στα 15Hz) δεν είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της φθοράς της ασφαλικής στρώσης (και της έδρασης). Και στις δύο περιπτώσεις, οι φθορές ακολουθούν φθίνουσα πορεία με την αύξηση της συχνότητας, λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή τους στη συχνότητα των 10Hz σε κάθε ποσοστό διακύβευσης. Ειδικότερα, η φθορά της ασφαλικής στρώσης αποτελούμενης από υλικό GB3, είναι μέγιστη για συχνότητα 10Hz και ποσοστό διακύβευσης 2.5%, ενώ η φθορά της έδρασης εξακολουθεί να μεγιστοποιείται σε χαμηλές συχνότητες (10Hz).

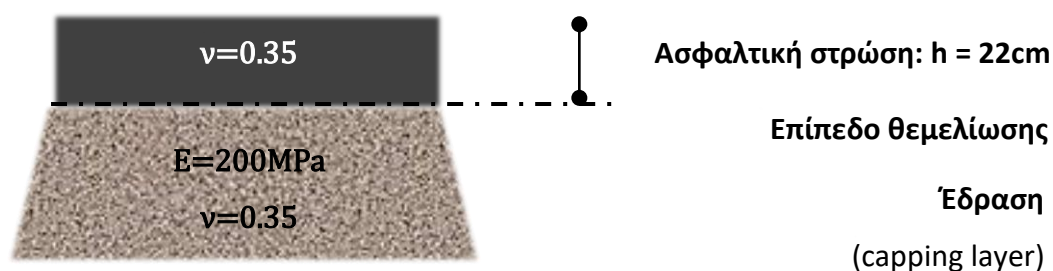
6.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΦΘΟΡΑΣ

6.4.1 ΔΙΑΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑΣ

Για την παρούσα διερεύνηση, λαμβάνεται υπόψη η διατομή αναφοράς με σταθερό πάχος ασφαλτικής στρώσης. Η τιμή του πάχους διαφοροποιείται στα δύο υλικά και προσδιορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τη δομική επάρκεια της διατομής αναφοράς για τις προκαθορισμένες συνθήκες φόρτισης της Γαλλικής Μεθόδου σχεδιασμού: $T=15^{\circ}\text{C}$, $f=10\text{Hz}$, $R=2.5\%$. Το μέτρο ελαστικότητας της έδρασης παραμένει σταθερό και ίσο με 200MPa ενώ ο λόγος Poisson και για τις δύο στρώσεις λαμβάνεται ίσος με 0.35 (Εικόνες 6.33 και 6.34).



Εικόνα 6.33: Διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος (GB4, $T=15^{\circ}\text{C}$, $f=10\text{Hz}$, $R=2.5\%$)

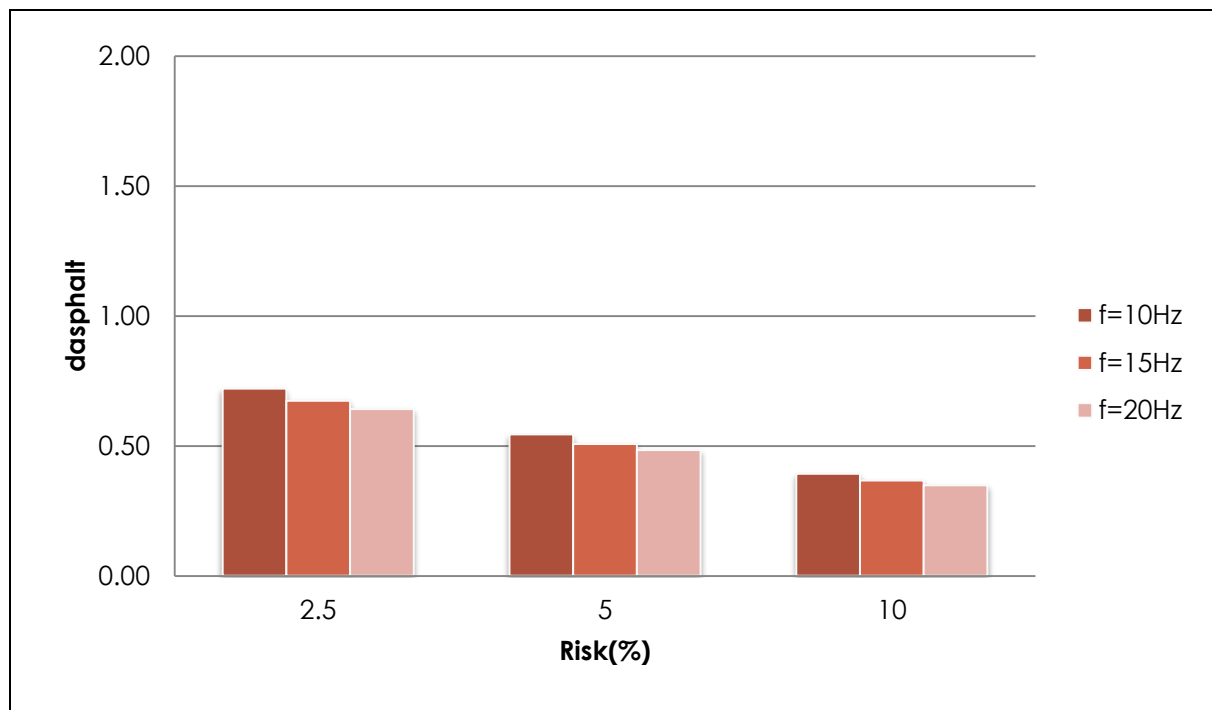


Εικόνα 6.34: Διατομή αναφοράς εύκαμπτου οδοστρώματος (GB3, $T=15^{\circ}\text{C}$, $f=10\text{Hz}$, $R=2.5\%$)

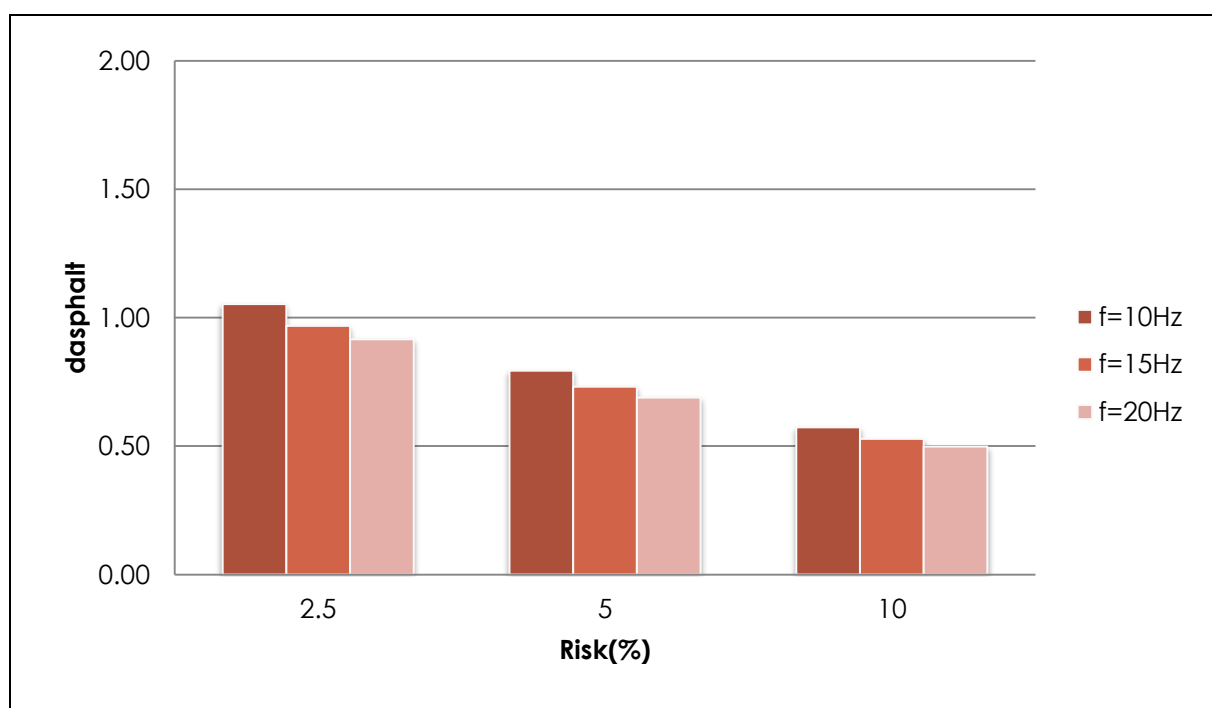
Ακολούθως, μελετάται η εξέλιξη της φθοράς των επιλεγμένων διατομών κατά την μεταβολή των συνθηκών φόρτισης (T, f) και της παραμέτρου ανάλυσης $R(\%)$.

6.4.2 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ

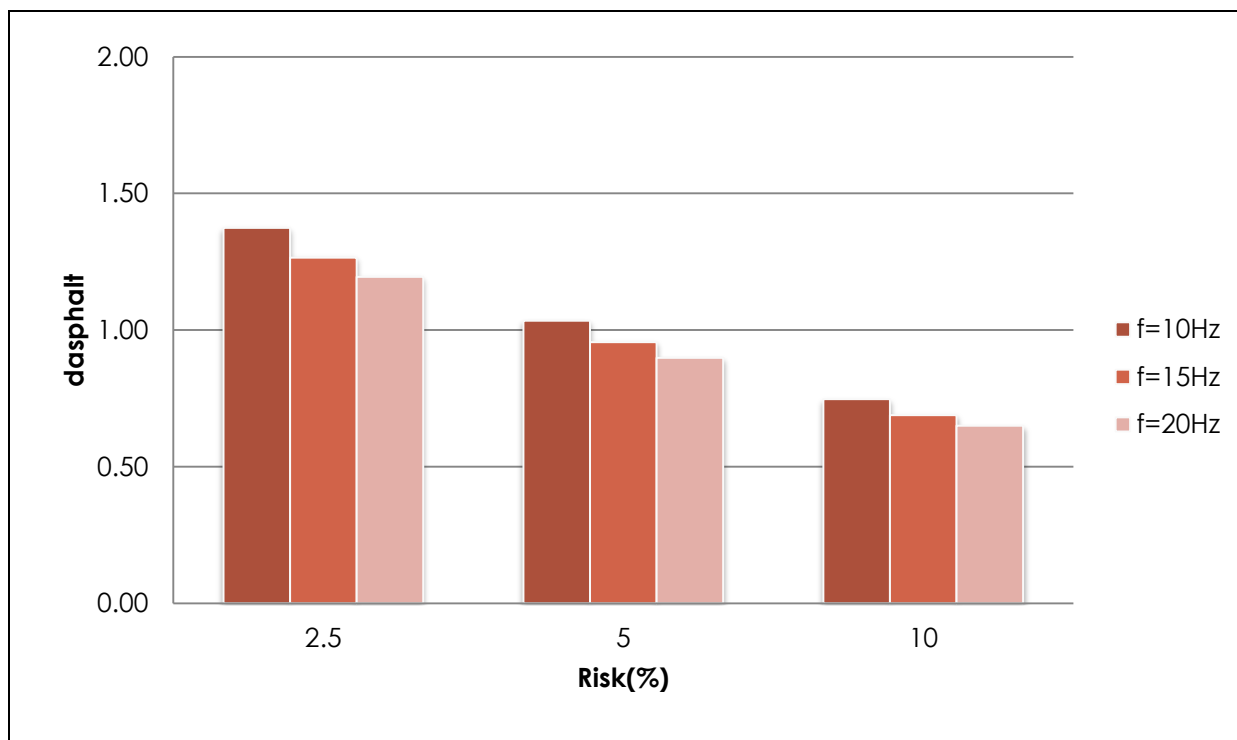
Στις Εικόνες 6.35÷6.38 παρουσιάζεται η μεταβολή της φθοράς της ασφαλικής στρώσης σταθερού πάχους (19cm) αποτελούμενης από ασφαλτόμιγμα τύπου GB4 συναρτήσει της συχνότητας και του ποσοστού διακύβευσης για θερμοκρασίες 15°C, 20°C, 25°C και 30°C, αντίστοιχα.



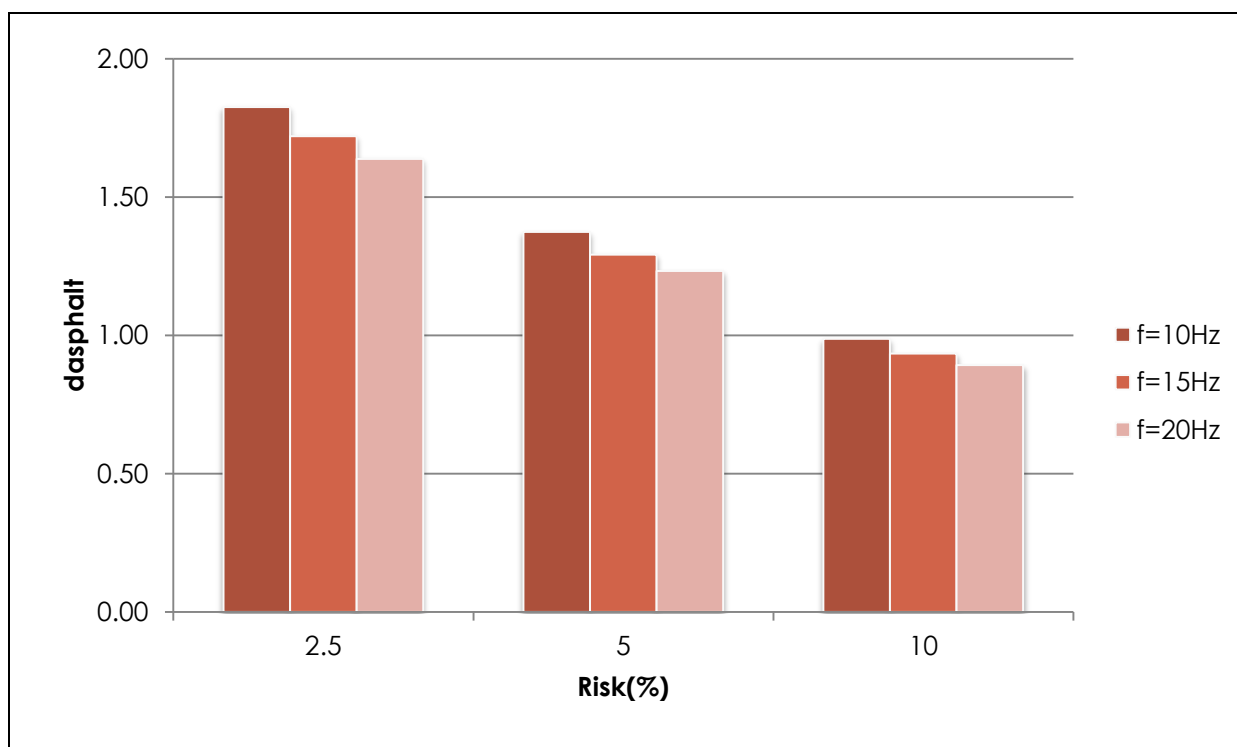
Εικόνα 6.35: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4, h=19cm, T=15°C)



Εικόνα 6.36: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4, h=19cm, T=20°C)



Εικόνα 6.37: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4, h=19cm, T=25°C)



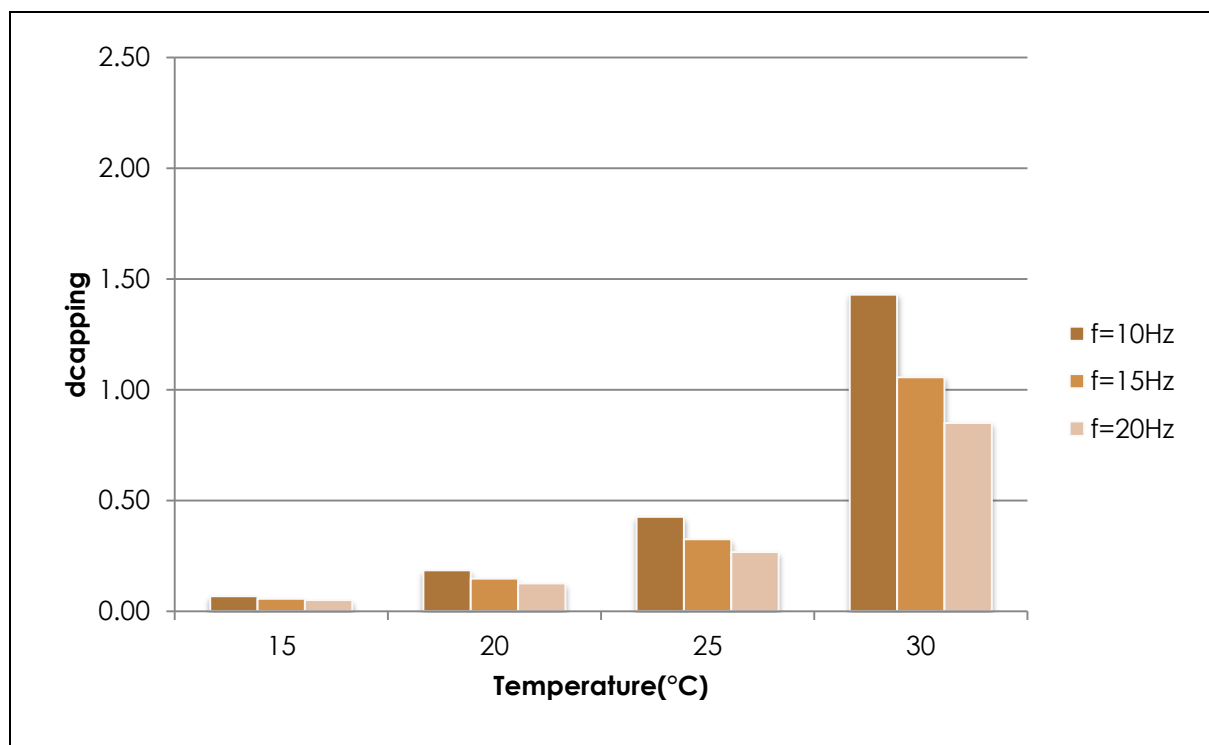
Εικόνα 6.38: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4, h=19cm, T=30°C)

Στους 15°C η διατομή αναφοράς προφανώς ικανοποιεί το κριτήριο κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων. Στους 20°C, η φθορά της ασφαλικής στρώσης είναι μεγαλύτερη της μονάδας μόνο για συχνότητα 10Hz και ποσοστό διακύβευσης 2.5%. Για κάθε άλλη

συχνότητα και ποσοστό διακύβευσης, η διατομή ικανοποιεί το κριτήριο κόπωσης της ασφαλικής στρώσης στους 20°C. Στους 25°C, η φθορά της ασφαλικής στρώσης είναι μεγαλύτερη της μονάδας για κάθε συχνότητα όταν το ποσοστό διακύβευσης είναι 2.5% και για τη συχνότητα των 10Hz όταν το ποσοστό διακύβευσης είναι 5%. Σε κάθε άλλη περίπτωση, η διατομή είναι επαρκής στους 25°C. Τέλος, στους 30°C, η διατομή δεν ικανοποιεί το κριτήριο κόπωσης της ασφαλικής στρώσης για ποσοστά διακύβευσης 2.5% και 5% για κάθε συχνότητα. Ωστόσο, η διατομή κρίνεται επαρκής (οριακά) για ποσοστό διακύβευσης 10% και για κάθε συχνότητα στους 30°C.

Σε κάθε θερμοκρασία, παρατηρείται ότι η αύξηση της συχνότητας για σταθερό ποσοστό διακύβευσης, οδηγεί σε μείωση της φθοράς της ασφαλικής στρώσης της τάξης του 6%. Επίσης, για σταθερή συχνότητα, η αύξηση του ποσοστού διακύβευσης οδηγεί σε μείωση της φθοράς της ασφαλικής στρώσης κατά 25% περίπου. Έτσι, η φθορά της ασφαλικής στρώσης ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη για συχνότητα 10Hz και για ποσοστό διακύβευσης 2.5%.

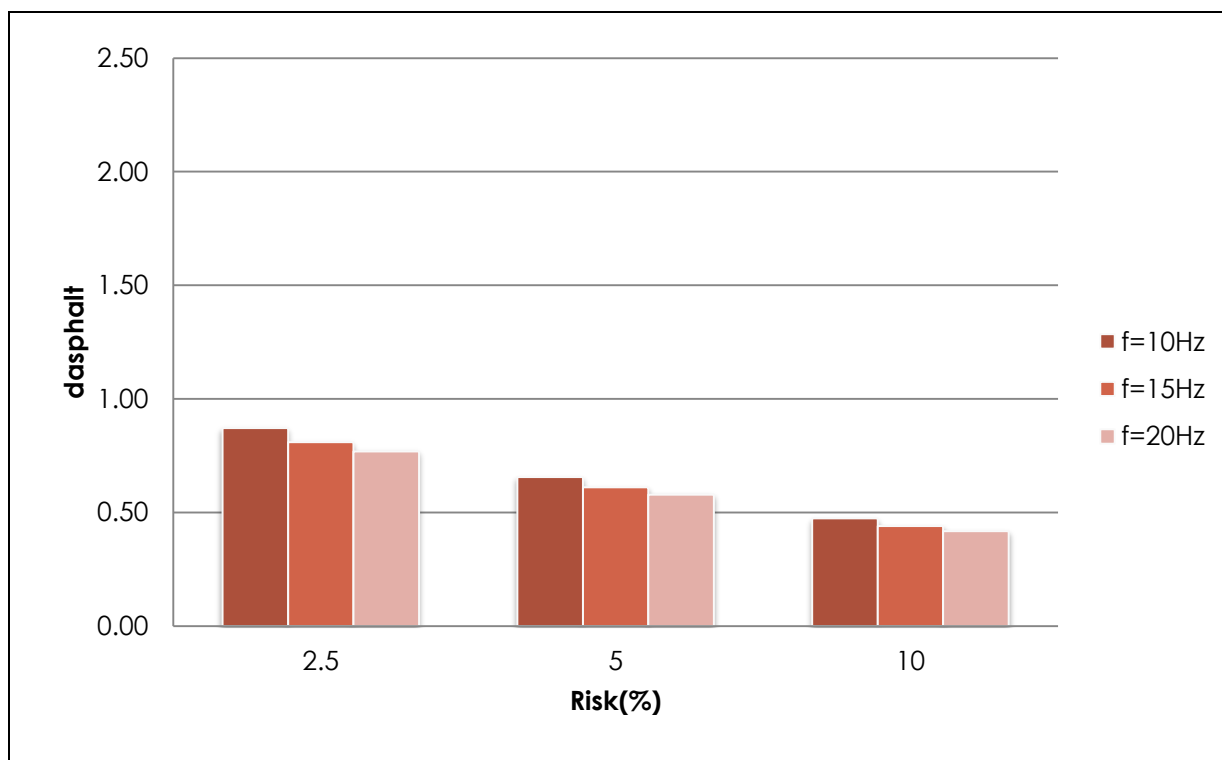
Στην Εικόνα 6.39 παρουσιάζεται η μεταβολή της φθοράς της έδρασης (capping layer) για την προεπιλεγμένη διατομή σταθερού ασφαλικού πάχους (19cm) συναρτήσει της συχνότητας και της θερμοκρασίας.



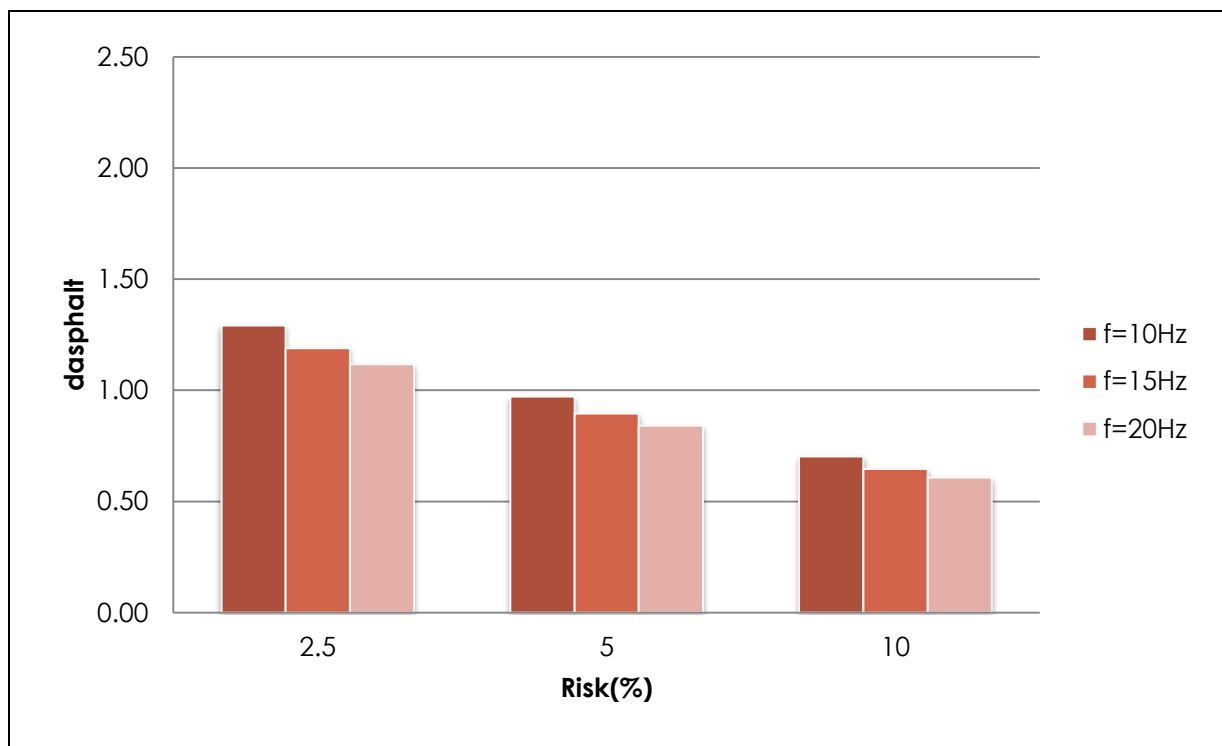
Εικόνα 6.39: Διάγραμμα φθοράς έδρασης (GB4, h=19cm)

Γενικά παρατηρείται ότι η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αισθητή αύξηση της φθοράς της έδρασης για σταθερή συχνότητα. Ειδικότερα, η τιμή της φθοράς της έδρασης διπλασιάζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας από τους 15°C στους 20°C και από τους 20°C στους 25°C εξίσου. Ωστόσο, στις συγκεκριμένες θερμοκρασίες, η διατομή ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας για κάθε συχνότητα. Η διατομή αναφοράς δεν ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας μόνο στη θερμοκρασία των 30°C και για συχνότητες 10Hz και 15Hz. Για σταθερή θερμοκρασία, η αύξηση της συχνότητας οδηγεί σε μείωση της φθοράς της έδρασης. Έτσι, σε κάθε θερμοκρασία, η φθορά της έδρασης είναι μέγιστη για συχνότητα 10Hz.

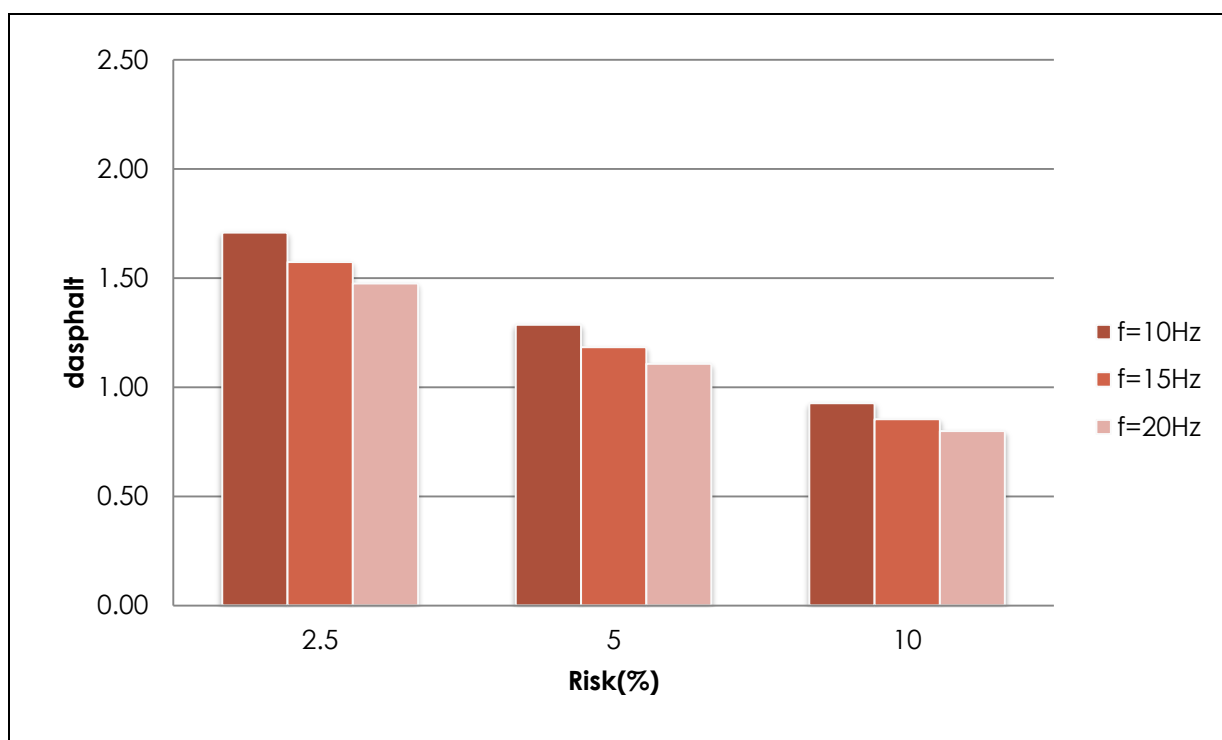
Στις Εικόνες 6.40÷6.43 παρουσιάζεται η μεταβολή της φθοράς της ασφαλικής στρώσης σταθερού πάχους (22cm) αποτελούμενης από ασφαλτόμιγμα τύπου GB3 συναρτήσει της συχνότητας και του ποσοστού διακύβευσης για θερμοκρασίες 15°C, 20°C, 25°C και 30°C, αντίστοιχα.



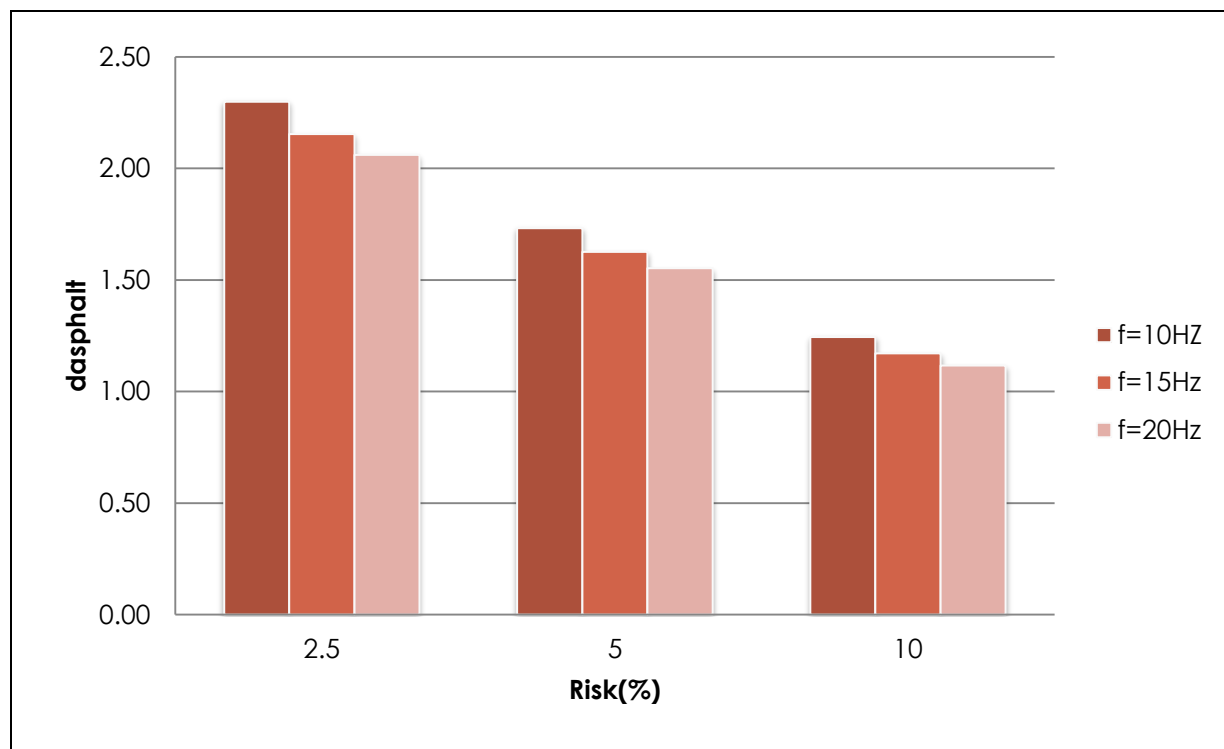
Εικόνα 6.40: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB3, h=22cm, T=15°C)



Εικόνα 6.41: Διάγραμμα φθοράς ασφατικής στρώσης (GB3, $h=22\text{cm}$, $T=20^\circ\text{C}$)



Εικόνα 6.42: Διάγραμμα φθοράς ασφατικής στρώσης (GB3, $h=22\text{cm}$, $T=25^\circ\text{C}$)

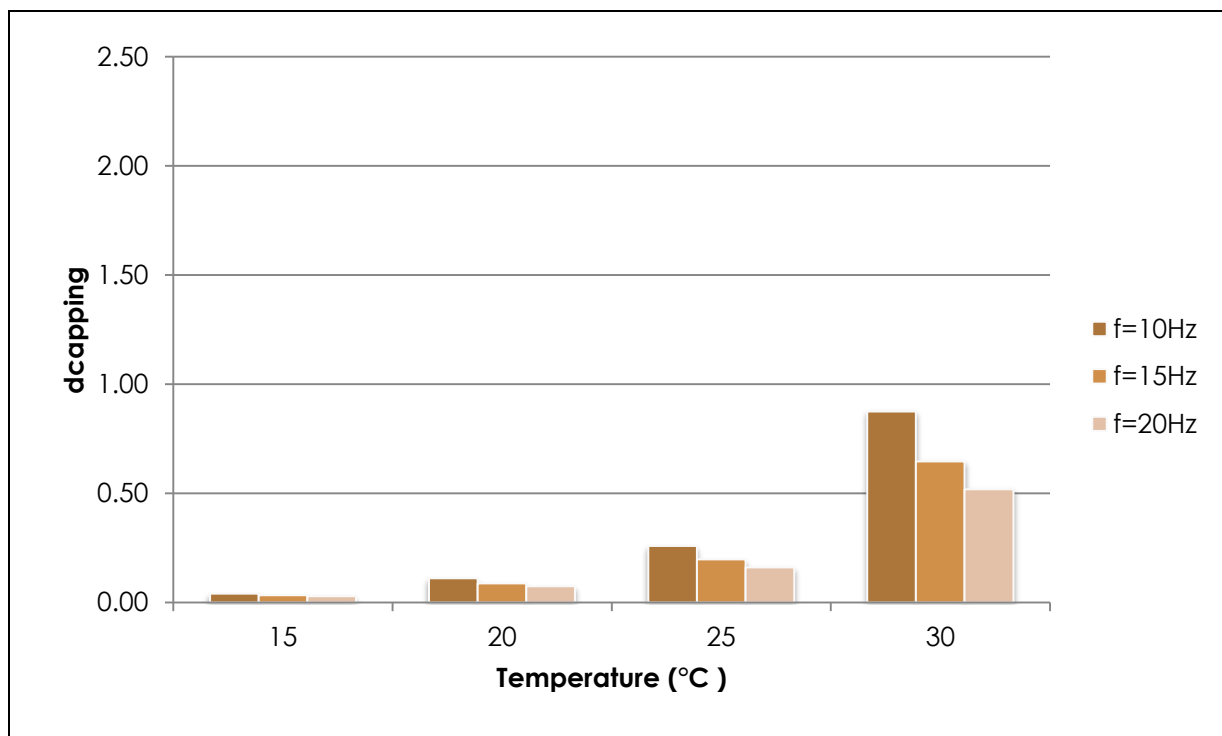


Εικόνα 6.43: Διάγραμμα φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB3, $h=22\text{cm}$, $T=30^\circ\text{C}$)

Στους 15°C η διατομή αναφοράς προφανώς ικανοποιεί το κριτήριο κόπωσης των ασφαλικών στρώσεων. Στους 20°C , η φθορά της ασφαλικής στρώσης είναι μεγαλύτερη της μονάδας σε ποσοστό διακύβευσης 2.5% για κάθε συχνότητα. Για ποσοστά διακύβευσης 5% και 10%, η διατομή ικανοποιεί το κριτήριο κόπωσης της ασφαλικής στρώσης στους 20°C . Στους 25°C , η φθορά της ασφαλικής στρώσης είναι μεγαλύτερη της μονάδας για ποσοστά διακύβευσης 2.5% και 5%, σε κάθε συχνότητα. Για ποσοστό διακύβευσης 10%, η διατομή είναι επαρκής στη θερμοκρασία των 25°C για κάθε συχνότητα. Τέλος, στους 30°C , η διατομή δεν ικανοποιεί το κριτήριο κόπωσης της ασφαλικής στρώσης για κάθε συχνότητα και ποσοστό διακύβευσης.

Σε κάθε θερμοκρασία, παρατηρείται ότι η αύξηση της συχνότητας για σταθερό ποσοστό διακύβευσης, οδηγεί σε μείωση της φθοράς της ασφαλικής στρώσης της τάξης του 6%, όμοια με τη διατομή αναφοράς αποτελούμενης από το υλικό GB4. Επίσης, για σταθερή συχνότητα, η αύξηση του ποσοστού διακύβευσης οδηγεί σε μείωση της φθοράς της ασφαλικής στρώσης κατά 25% περίπου. Έτσι, η φθορά της ασφαλικής στρώσης ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη για συχνότητα 10Hz και για ποσοστό διακύβευσης 2.5%.

Στην Εικόνα 6.44 παρουσιάζεται η μεταβολή της φθοράς της έδρασης (capping layer) για την προεπιλεγμένη διατομή σταθερού ασφαλτικού πάχους (22cm) συναρτήσει της συχνότητας και της θερμοκρασίας.



Εικόνα 6.44: Διάγραμμα φθοράς έδρασης (GB3, h=22cm)

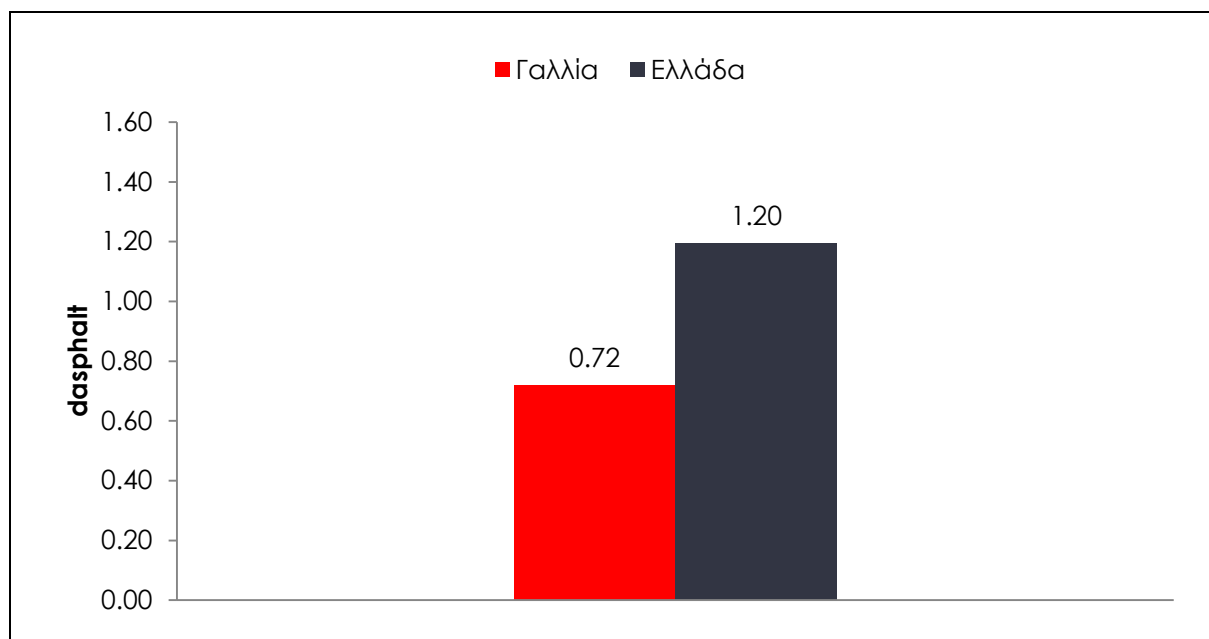
Σε αντίθεση με τη διατομή αναφοράς του GB4, η διατομή αναφοράς αποτελούμενη από ασφαλτόμιγμα τύπου GB3 ικανοποιεί το κριτήριο αστοχίας της στρώσης έδρασης (στην προκειμένη της έδρασης), για κάθε θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης. Για σταθερή συχνότητα, η τιμή φθοράς της έδρασης τριπλασιάζεται, σχεδόν, με την αύξηση της θερμοκρασίας, αλλά παραμένει εντός επιτρεπτού ορίου ($d < 1$). Για σταθερή θερμοκρασία, η αύξηση της συχνότητας οδηγεί σε μείωση της φθοράς της έδρασης. Έτσι, σε κάθε θερμοκρασία, η φθορά της έδρασης είναι μέγιστη για συχνότητα 10Hz.

6.5 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

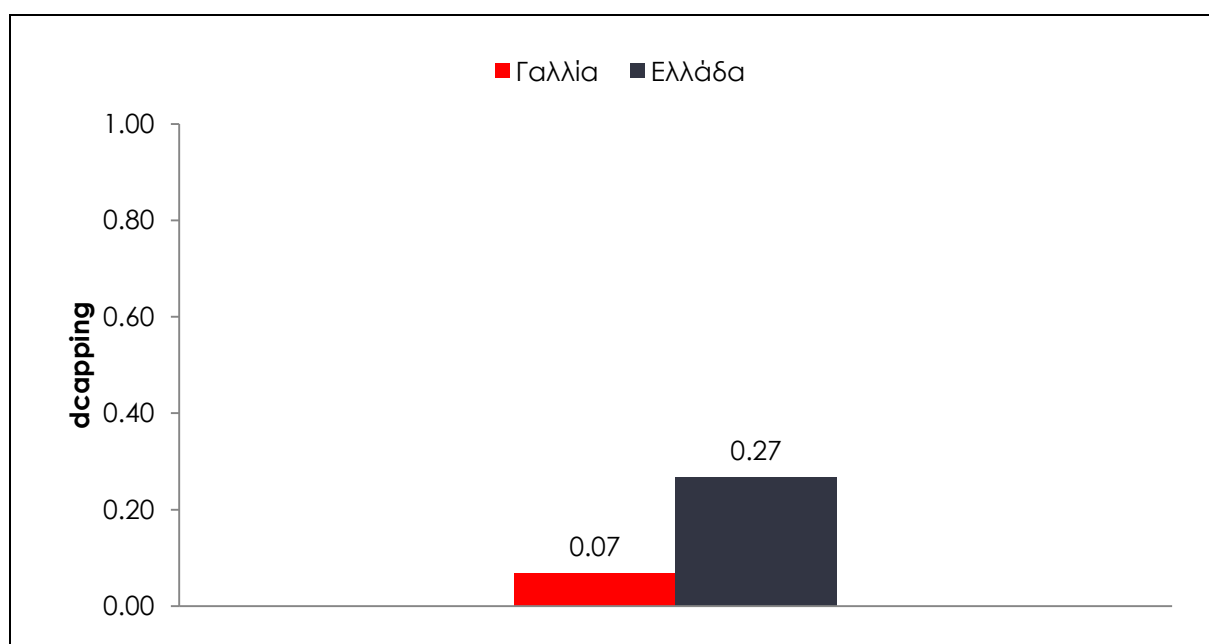
Οι προκαθορισμένες συνθήκες φόρτισης στη Γαλλία είναι, όπως αναφέρθηκε, η θερμοκρασία των 15°C, η συχνότητα των 10Hz και το ποσοστό διακύβευσης ίσο με 2.5%. Οι συνθήκες αυτές εξασφαλίζουν τη δομική επάρκεια των διατομών στη Γαλλία, καθορίζοντας ασφαλικά πάχη τιμής 19cm (υλικό GB4) και 22cm (υλικό GB3). Στην περίπτωση που οι εν λόγω διατομές αναφοράς, με τα δεδομένα πάχη, ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός

αυτοκινητοδρόμου στην Ελλάδα, όπου οι συνθήκες φόρτισης είναι διαφορετικές (θερμοκρασία 25°C, συχνότητα 20Hz, ποσοστό διακύβευσης 2.5%), θα είχε ενδιαφέρον η σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Στις Εικόνες 6.45÷6.46 συγκρίνεται η φθορά της ασφαλικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer), αντίστοιχα, για τις προεπιλεγμένες συνθήκες φόρτισης των δύο χωρών, όσον αφορά στο υλικό GB4.



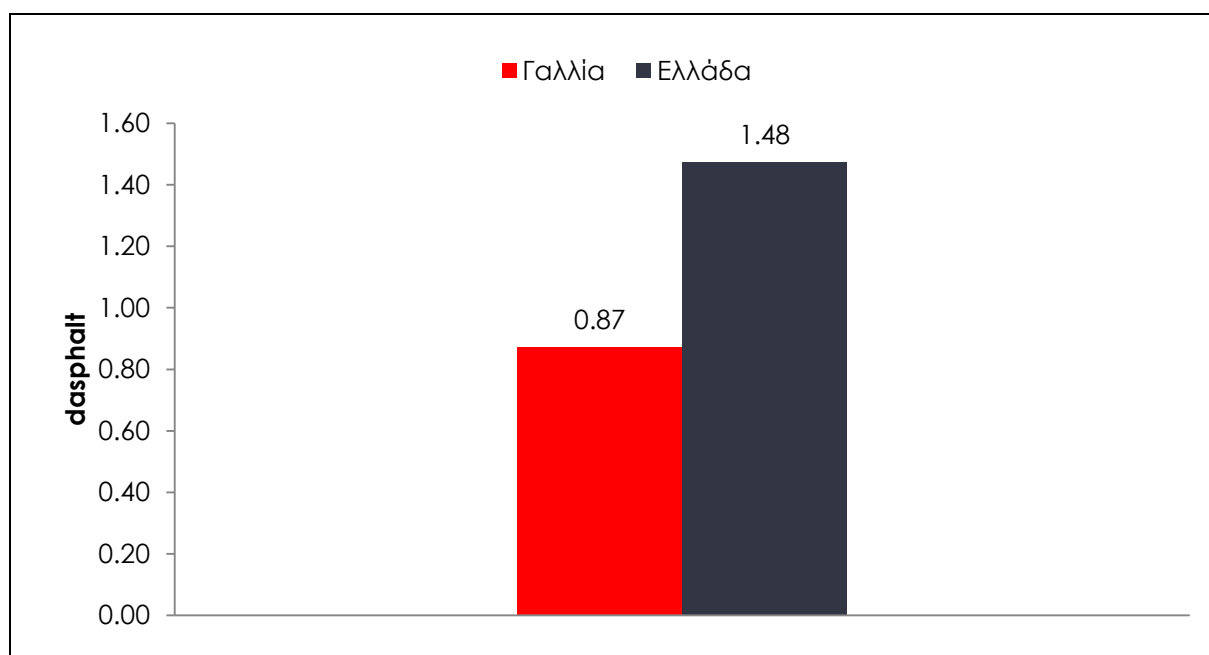
Εικόνα 6.45: Σύγκριση φθοράς ασφαλικής στρώσης (GB4)



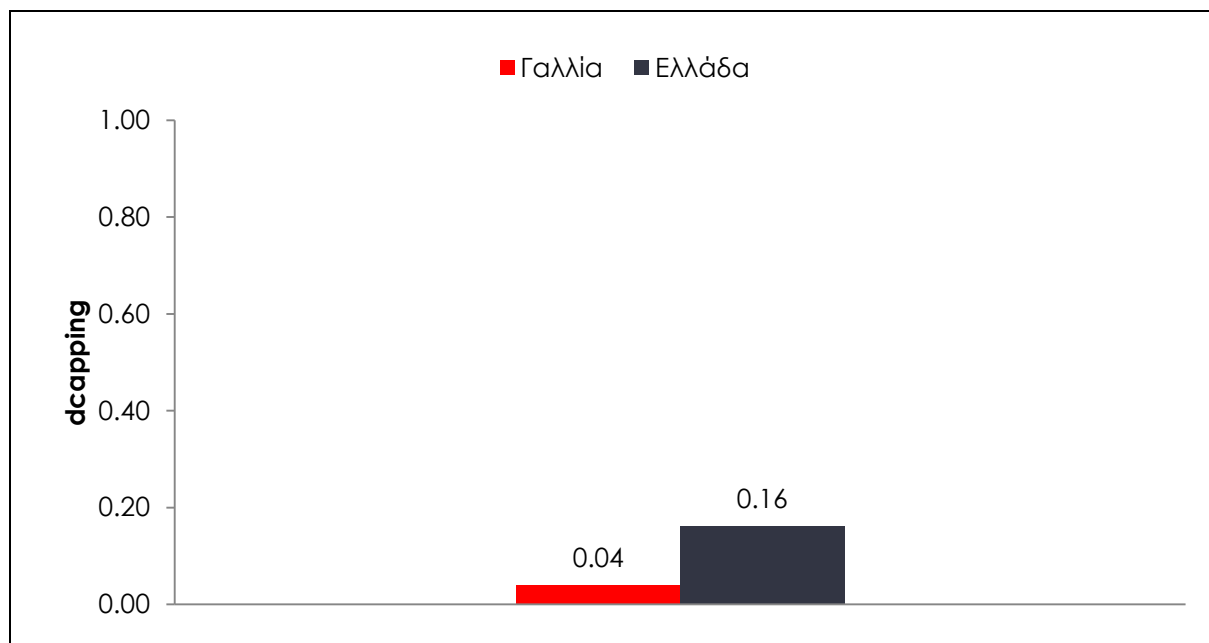
Εικόνα 6.46: Σύγκριση φθοράς έδρασης (GB4)

Παρατηρείται ότι, στην Ελλάδα, δεν εξασφαλίζεται η δομική επάρκεια της δεδομένης διατομής αναφοράς ασφατικού πάχους 19cm. Συγκεκριμένα, η φθορά της ασφατικής στρώσης αυξάνεται κατά 40% και λαμβάνει τιμή εκτός επιτρεπτού ορίου (1.20). Επιπλέον, η έδραση καταπονείται σε σχεδόν τετραπλάσιο βαθμό στον ελλαδικό χώρο. Ωστόσο, η τιμή της φθοράς της παραμένει χαμηλή και εντός επιτρεπτών ορίων.

Στις Εικόνες 6.47÷6.48 συγκρίνεται η φθορά της ασφατικής στρώσης και η φθορά της έδρασης (capping layer), αντίστοιχα, για τις προεπιλεγμένες συνθήκες φόρτισης των δύο χωρών, όσον αφορά στο υλικό GB3.



Εικόνα 6.47: Σύγκριση φθοράς ασφατικής στρώσης (GB3)



Εικόνα 6.48: Σύγκριση φθοράς έδρασης (GB3)

Παρατηρείται ότι και στην περίπτωση που η ασφαλική στρώση αποτελείται από ασφαλτόμιγμα τύπου GB3, η δομική επάρκεια της διατομής αναφοράς δεν εξασφαλίζεται στην Ελλάδα. Συγκεκριμένα, η φθορά της ασφαλικής στρώσης αυξάνεται κατά 41% και λαμβάνει τιμή εκτός επιτρεπτού ορίου (1.48). Σημειώνεται ότι η φθορά της ασφαλικής στρώσης είναι ιδιαίτερα αυξημένη και για τα δεδομένα της Γαλλίας. Όμοια, η έδραση καταπονείται σε σχεδόν τετραπλάσιο βαθμό στον ελλαδικό χώρο. Ωστόσο, η τιμή της φθοράς της παραμένει χαμηλή και εντός επιτρεπτών ορίων. Συγκριτικά με το υλικό GB4, η έδραση δεν επιβαρύνεται στον ίδιο βαθμό.

7. ΣΧΟΛΙΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η επίδραση των παραμέτρων σχεδιασμού στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων. Οι παράμετροι διερευνώνται στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης εύκαμπτου οδοστρώματος με βάση τη Γαλλική Μέθοδο σχεδιασμού. Οι βασικές παράμετροι οι οποίες λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό είναι η θερμοκρασία, η συχνότητα φόρτισης, τα υλικά πλήρωσης των ασφαλικών στρώσεων και η πιθανότητα αστοχίας του οδοστρώματος (διακύβευση). Για τη διερεύνηση του βαθμού επίδρασης των εν λόγω παραμέτρων στο σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων, προσδιορίστηκε μία διατομή αναφοράς η οποία είναι δομικά επαρκής για δεδομένη κυκλοφορία σύμφωνα με τις πρότυπες συνθήκες σχεδιασμού της Γαλλικής Μεθόδου. Στη διατομή αναφοράς πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις ευαισθησίας, λαμβάνοντας υπόψη δύο θεωρήσεις: α) μεταβολή του πάχους της ασφαλικής στρώσης με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, της συχνότητας και του ποσοστού διακύβευσης και β) μεταβολή της φθοράς, για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης ίσο με το πάχος της διατομής αναφοράς, με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, της συχνότητας και του ποσοστού διακύβευσης.

Από την επεξεργασία των στοιχείων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων εξάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα.

Ως προς τη θερμοκρασία, παρατηρείται ότι ανεξάρτητα από το υλικό και το ποσοστό διακύβευσης, και για την ίδια συχνότητα φόρτισης, η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μεγαλύτερα απαιτούμενα πάχη οδοστρώματος. Αυτό είναι λογικό, καθώς τα ασφατικά υλικά, λόγω της ιξώδους συμπεριφοράς τους, παρουσιάζουν ευαισθησία στις θερμοκρασιακές διακυμάνσεις, τόσο σε επίπεδο αντοχής, όσο και παραμορφωσιμότητας. Δείκτης της φέρουσας ικανότητας των ασφαλικών στρώσεων των οδοστρωμάτων είναι το μέτρο δυσκαμψίας E , το οποίο μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στις αναλύσεις διαπιστώνεται ότι με σταθερή αύξηση της θερμοκρασίας ανά 5°C (από τους 15°C στους 30°C) η αύξηση των απαιτούμενων παχών της ασφαλικής στρώσης έχει ένα εύρος τιμών 1cm-2cm περίπου. Αν και η τελική τιμή της φθοράς της ασφαλικής στρώσης είναι αποτέλεσμα συνεκτίμησης κι άλλων παραμέτρων πέρα από τη θερμοκρασία, παρατηρείται

ότι και για τα δύο υλικά πλήρωσης των ασφαλικών στρώσεων (GB3 και GB4), η αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε αισθητή αύξηση της φθοράς της έδρασης. Ειδικότερα, η τιμή της φθοράς της έδρασης σχεδόν διπλασιάζεται με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά 5°C και λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στους 30°C σε κάθε περίπτωση.

Ως προς τη διακύβευση, η μεταβολή του ποσοστού της επηρεάζει τον επιτρεπόμενο αριθμό διελεύσεων του φορτίου αναφοράς και κατ'επέκταση επιδρά σε σημαντικό βαθμό στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων. Σε κάθε θερμοκρασία και για την ίδια συχνότητα, η αύξηση του ποσοστού διακύβευσης έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του απαιτούμενου πάχους της ασφαλικής στρώσης κατά 1cm και στα δύο υλικά. Δεδομένου ότι το ποσοστό διακύβευσης υπεισέρχεται στο νόμο κόπωσης της ασφαλικής στρώσης, επηρεάζει άμεσα την φθορά της, παραταύτα χωρίς σταθερό τρόπο. Ωστόσο, γενικά παρατηρείται ότι κατά την αύξηση της θερμοκρασίας, οι ασφαλικές στρώσεις καταπονούνται περισσότερο σε ολόένα και μικρότερα ποσοστά διακύβευσης και στα δύο υλικά. Τέλος, η διακύβευση επιδρά έμμεσα και στην φθορά της έδρασης, η τιμή της οποίας αυξάνεται για σταθερή συχνότητα με την αύξηση του ποσοστού διακύβευσης.

Ως προς τη συχνότητα, παρατηρείται ότι η επίδρασή της στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων διαφοροποιείται ανάλογα με το ασφαλικό υλικό. Συγκεκριμένα, το απαιτούμενο πάχος της ασφαλικής στρώσης αποτελούμενης από ασφαλτόμιγμα τύπου GB4, μειώνεται κατά 1cm με την αύξηση της συχνότητας από τα 10Hz στα 15Hz μόνο στους 30°C και για κάθε ποσοστό διακύβευσης. Αναφορικά με το υλικό GB3, η συχνότητα επιδρά στο ασφαλικό πάχος σε μεγαλύτερο φάσμα τιμών (από 15Hz σε 20Hz) και σε μικρότερες συγκριτικά θερμοκρασίες (20°C και 25°C), μειώνοντάς το επίσης κατά 1cm. Σε κάθε άλλη φόρτιση, το πάχος διατηρείται σταθερό με τη μεταβολή της συχνότητας και στα δύο υλικά. Στις περιπτώσεις που το πάχος διατηρείται σταθερό, η φθορά της ασφαλικής στρώσης μειώνεται, ενώ στις περιπτώσεις που το πάχος της ασφαλικής στρώσης μειωθεί, η φθορά της ασφαλικής στρώσης αυξάνεται. Τέλος, τονίζεται ότι και στα δύο υλικά, ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία, η φθορά της έδρασης είναι μέγιστη για τη χαμηλότερη συχνότητα των 10Hz. Επομένως, η γεωτεχνική υποδομή καταπονείται στο μέγιστο βαθμό σε χαμηλές ταχύτητες κίνησης. Σε κάθε περίπτωση όμως, η αύξηση της συχνότητας για σταθερή θερμοκρασία, συνεπάγεται αύξηση του μέτρου δυσκαμψίας E, άρα και της φέρουσας ικανότητας των διατομών.

Ως προς τα υλικά, το μέτρο δυσκαμψίας του υλικού GB3 είναι μικρότερο από το μέτρο δυσκαμψίας του υλικού GB4 για τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Ως αποτέλεσμα, στο υλικό GB3 ανακύπτει η ανάγκη μεγαλύτερου πάχους ασφαλικής στρώσης ώστε να εξασφαλισθεί η δομική επάρκεια της διατομής. Από το σύνολο των αναλύσεων, η φθορά της ασφαλικής στρώσης προκύπτει μεγαλύτερη στο υλικό GB3, απ'ότι στο υλικό GB4. Αντιθέτως, η φθορά της έδρασης είναι μεγαλύτερη για το υλικό GB4, απ'ότι για το υλικό GB3. Η φθορά της ασφαλικής στρώσης λαμβάνει μεν τη μέγιστη τιμή της σε διαφορετικές θερμοκρασίες στα δύο υλικά (20°C για το υλικό GB4 και 15°C για το υλικό GB3), αλλά για την ίδια συχνότητα (10Hz) και ποσοστό διακύβευσης (5%). Για τον λόγο αυτό, θεωρείται ότι η θερμοκρασία αποτελεί καθοριστικότερο παράγοντα στο σχεδιασμό των εύκαμπτων οδοστρωμάτων σε σχέση με τη συχνότητα φόρτισης και το ποσοστό διακύβευσης, τα οποία λαμβάνουν κοινή τιμή και στα δύο υλικά όταν η φθορά της ασφαλικής στρώσης μεγιστοποιείται.

Για σταθερό πάχος ασφαλικής στρώσης (19cm και 22cm για τα υλικά GB4 και GB3, αντίστοιχα), παρατηρείται ότι η διατομή αναφοράς κρίνεται επαρκής υπό προϋποθέσεις. Ειδικότερα, για το υλικό GB4, η διατομή ικανοποιεί το κριτήριο κόπωσης της ασφαλικής στρώσης για κάθε θερμοκρασία και συχνότητα, όταν το ποσοστό διακύβευσης είναι αυξημένο (10%). Για το εν λόγω υλικό, το κριτήριο αστοχίας δεν ικανοποιείται μόνο σε υψηλές θερμοκρασίες (30°C) για συχνότητες 10Hz και 15Hz. Για το υλικό GB3, η διατομή δεν ικανοποιεί το κριτήριο κόπωσης στους 30°C για κάθε ποσοστό διακύβευσης και συχνότητα φόρτισης. Ωστόσο, στη συγκεκριμένη θερμοκρασία (όπως και σε χαμηλότερες) η γεωτεχνική υποδομή προστατεύεται ικανοποιητικά και η φθορά της έδρασης λαμβάνει τιμές εντός επιτρεπτού ορίου για κάθε συχνότητα φόρτισης.

Αναφορικά με το υλικό GB4, παρατηρείται, τόσο στη διατομή μεταβλητού πάχους όσο και στη διατομή σταθερού πάχους (19cm), ότι η φθορά της έδρασης προκύπτει μεγαλύτερη από τη φθορά της ασφαλικής στρώσης στους 30°C, για ποσοστό διακύβευσης 10% και για συχνότητες 10Hz και 15Hz (21cm και 22cm, αντίστοιχα). Με αφορμή αυτή την ιδιαιτερότητα στη θερμοκρασία των 30°C, πραγματοποιήθηκαν εκ νέου αναλύσεις ώστε να ελεγχθεί αν οι νόμοι κόπωσης και αστοχίας λειτουργούν σωστά σε υψηλές θερμοκρασίες. Κρατώντας σταθερό το πάχος και τη συχνότητα φόρτισης, παράλληλα με την αύξηση της θερμοκρασίας και της διακύβευσης (και τη μείωση του μέτρου δυσκαμψίας), διαπιστώνεται ότι οι νόμοι κόπωσης και αστοχίας αποκρίνονται με όμοιο τρόπο σε οποιαδήποτε θερμοκρασία.

Μάλιστα, επισημαίνεται ότι σε υψηλές θερμοκρασίες καθώς το ποσοστό διακύβευσης αυξάνεται, η διαφορά ανάμεσα στην τιμή της φθοράς των ασφαλικών στρώσεων και στη φθορά της έδρασης μειώνεται και στα δύο υλικά. Αναφορικά με το υλικό GB4, όσο η διακύβευση αυξάνεται σε υψηλές θερμοκρασίες και ταχύτητες κίνησης, η έδραση είναι κρισιμότερη από την υπερκείμενη δομικά ασφαλική στρώση. Από το γεγονός ότι τα μεγαλύτερα πάχη (στη διατομή μεταβλητού πάχους) δεν είχαν ως αποτέλεσμα την ικανοποιητική απομείωση των τάσεων, διαπιστώνεται ότι η αύξηση του ασφαλικού πάχους δεν εξασφαλίζει πάντα τη δομική επάρκεια της διατομής, τουλάχιστον σε υψηλές θερμοκρασίες.

Στο πλαίσιο των σχεδιαστικών απαιτήσεων, η πειραματική διαδικασία προσανατολίζεται στην προστασία του εδάφους. Σε επίπεδο ανάλυσης, αυτό εξασφαλίζεται στις περιπτώσεις όπου η φθορά των ασφαλικών στρώσεων λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή από εκείνη της έδρασης ($d_{asp} > d_{cap}$). Τότε η διατομή θεωρείται κατάλληλη καθώς τυχόν ενέργειες ενίσχυσης ή επιδιόρθωσης του οδοστρώματος δεν θα απαιτήσουν την ολική αποξήλωσή του. Σημειώνεται ότι κατά τις αναλύσεις παρουσιάζονται σημεία όπου η φθορά της ασφαλικής στρώσης να μην λαμβάνει αποδεκτές τιμές (< 1), ωστόσο είναι ιδιαίτερα αυξημένη (> 0.9). Στις περιπτώσεις αυτές επιδιώκεται, όπου είναι δυνατό, η μείωση της φθοράς της ασφαλικής στρώσης μέσω της αύξησης του πάχους της, στοχεύοντας στην επέκταση της διάρκειας ζωής της.

Συμπερασματικά, το υλικό GB3 θα μπορούσε ενδεχομένως να θεωρηθεί προτιμότερο ως υλικό πλήρωσης της ασφαλικής στρώσης, από τη στιγμή που καταπονεί την έδραση σε μικρότερο βαθμό από το υλικό GB4. Βέβαια, η απαίτηση μεγαλύτερων παχών που συνοδεύει την επιλογή του, ως απόρροια των μικρότερων μέτρων δυσκαμψίας που το χαρακτηρίζουν, καθιστά επιτακτική τη θεώρηση οικονομικοτεχνικών κριτηρίων από την πλευρά του μελετητή πριν τη λήψη της τελικής απόφασης σχεδιασμού.

Τέλος, η δομική επάρκεια των διατομών αναφοράς δεδομένου πάχους φαίνεται ότι δεν εξασφαλίζεται με εφαρμογή των πρότυπων συνθηκών σχεδιασμού οδοστρωμάτων της Γαλλικής Μεθόδου για συνθήκες που επικρατούν, για παράδειγμα, σε έναν ελληνικό αυτοκινητόδρομο. Παρά την ίδια τιμή του ποσοστού διακύβευσης, η αυξημένη συγκριτικά θερμοκρασία και συχνότητα φόρτισης στο παράδειγμα του ελληνικού αυτοκινητοδρόμου, έχει ως αποτέλεσμα την κόπωση των ασφαλικών στρώσεων. Τόσο για το υλικό GB4, όσο

και για το υλικό GB3, η φθορά της ασφαλικής στρώσης αυξάνεται κατά 40%, λαμβάνοντας τιμή εκτός επιτρεπτού ορίου. Επίσης, η έδραση καταπονείται σε τετραπλάσιο βαθμό και για τα δύο υλικά, ωστόσο με φθορά που διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα και δε λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας. Προκειμένου οι διατομές αναφοράς να επαρκούν και για τις ελληνικές συνθήκες προκύπτει ότι απαιτείται αύξηση του πάχους των ασφαλικών στρώσεων κατά 2cm. Με αυτό τον τρόπο, η φθορά των ασφαλικών στρώσεων θα μειωθεί, οι αναπτυσσόμενες τάσεις θα απομειώνονται περαιτέρω και κατ'επέκταση, η έδραση θα προστατεύεται με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Στο σημείο αυτό, άξιο αναφοράς είναι, ότι ναι μεν η Γαλλική Μέθοδος, μέσω του λογισμικού της, μας δίνει τη δυνατότητα να μεταβάλλουμε τη θερμοκρασία ώστε να υπάρχει συμβατότητα με τις εκάστοτε τοπικές συνθήκες, ωστόσο οι σταθερές και τα χαρακτηριστικά των υλικών που λαμβάνονται υπόψη, έχουν οριστεί σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες και συχνότητες. Προς την κατεύθυνση αυτή, ανακύπτει η ανάγκη βαθμονόμησης της Γαλλικής Μεθόδου κι εμμέσως του νόμου κόπωσης που αυτή εμπερικλείει.

Αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης θα μπορούσαν να αποτελέσουν τα ακόλουθα:

- Αναλύσεις ευαισθησίας τόσο σε δύσκαμπτες όσο και σε ημι-εύκαμπτες διατομές οδοστρωμάτων, με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με τον τρόπο επίδρασης των μεταβλητών παραμέτρων στην δομική τους επάρκεια.
- Αναλύσεις ευαισθησίας σε εύκαμπτες διατομές οδοστρωμάτων υπό μικρότερες συχνότητες φόρτισης, ώστε να διαπιστωθεί η συμβατότητα οδών χαμηλότερου κυκλοφοριακού φόρτου, όπου η ταχύτητα κίνησης των οχημάτων είναι μικρότερη σε σχέση με έναν αυτοκινητόδρομο.
- Αναλύσεις ευαισθησίας σε κάθε τύπο οδοστρώματος λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική ολίσθηση της διεπιφάνειας των δύο στρώσεων. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αποδεσμεύεται από τα όρια του σχεδιασμού και αντανακλά με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική συμπεριφορά ενός οδοστρώματος σε λειτουργία.

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βαρδουλάκης Ι.Γ. (2004): *Τα Φυσικά Χαρακτηριστικά των Εδαφών*, Σημειώσεις Εδαφομηχανικής Ι, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Λοίζος Α., Πλατή Χ. (2015): *Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Λοίζος Α., Πλατή Χ. (2015): *Σημειώσεις για το μάθημα Οδοστρώματα Οδών και Αεροδρομίων - Συστήματα Παρακολούθησης και Διαχείρισης Οδοστρωμάτων*, Τεύχος Β, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Λοίζος Α., Πλατή Χ. (2015): *Σημειώσεις για το μάθημα Ειδικά Θέματα Οδοστρωμάτων*, Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα.

Νικολαΐδης Α.Φ. (2011): *Οδοποιία: Οδοστρώματα – Υλικά – Έλεγχος Ποιότητας*, 3^η Έκδοση, Θεσσαλονίκη.

Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων & Υπουργείο Οικονομίας και Οικονομικών (2002): *Οδηγός Επίβλεψης Μελετών και Κατασκευών*, Ελλάδα.

AASHTO (1986): *Guide for design of Pavement Structures*, Vol.2, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington.

Adorjányi K. (2011): *Effect of capping layers on the improvement of subgrade bearing capacity*, 11th International Scientific Conference MOBILITA'11, Bratislava.

ALIZE-LCPC Software (2011): version 1.3, User manual.

Anupoj S. (2016): *Factors Influencing Pavement Design*, Retrieved from <<<https://theconstructor.org/transportation/factors-affecting-pavement-design/12849/>>>.

Balay J.M., Brosseaud Y., Bara B., Castaneda E. (2012): *Adaptation of the French pavement design to countries in South America*, Congrès 8eme jornadas international des Asfalto, France.

Balay J.M., Caron C., Lerat P. (2010): *Adaption of the French rational road design procedure to airfield pavement: the Alize-Airfield software*, FAA Technology Transfer Conference - Paper proposal P10085.

Chabot A., Chupin O., Deloffre L., Duhamel D. (2010): *Viscoroute 2.0: a tool for the simulation of moving load effects on asphalt pavement*, Road Materials and Pavement Design, Volume X, No X/2009, pp. 227-250.

Corte J.F. (1997): *French Design Manual for Pavement Structures*, Laboratoire Central des Ponts et Chausees (LCPC), Paris, p.248.

Duong N.S., Blanc J., Horny P. (2017): *Analysis of the behavior of pavement layers interfaces from in situ measurements*, 10th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRRA, Athens, Greece.

Erlingsson S. (2018): *Mechanistic Pavement Design Methods – A Road to Better Understanding of Pavement Performance*, Article, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Iceland, pp. 1-7.

Ghanizadeh A.R., Fakhri M. (2014): *Prediction of Frequency for Stimulation of Asphalt Mix Fatigue Tests Using MARS and ANN*, Research Article, The Scientific World Journal, Volume 2014, Department of Civil Engineering, K.N. Toosi University of Technology, No.1346, Tehran 19967-15433, Iran, pp. 1-16.

Hajj E.Y., Ulloa A., Sebaaly P.E., Siddharthan R.V. (2011): *Equivalent Loading Frequencies to Simulate Asphalt Layer Pavement Responses Under Dynamic Traffic Loading*, TRB, AFD80, Committee Meeting, University of Nevada Reno, Washington. Retrieved from <<
http://www.arc.unr.edu/%5C/Presentations/EYHajj_Eq_Loading_Freq_AFD80_Jan25-2011.pdf>>.

Hornych P., Balay J.M., Mauduit C., Bodin D. (2013): *Evaluation of the concept of equivalent temperature for pavement design*, 9th International Conference on the Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, BCRRRA, Trondheim, Norway, pp. 1-11.

Kamarudin A.: *Flexible ATJ 5-85(1985), Road Note 31(1), Chapter 4: Structural Desing of Flexible Pavement*, pp.1-16. Retrieved from <<
<https://www.scribd.com/doc/267513165/Flexible-ATJ-5-85-1985-Road-Note-31-1>>>.

Khanna S.K. (2015): *Types of Failure of Flexible Pavement*, Retrieved from <<
<https://civilblog.org/2015/09/18/10-different-types-of-failures-of-flexible-pavement/>>>.

Mack J.W., Sullivan R.L. (2013): *Using Remaining Service Life as the National Performance Measure of Pavement Assets*, Paper Prepared for Publication and Presentation at the 2014 Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, pp.1-16.

Mathew T.V., Rao K. (2007): *Factors affecting Pavement design, Introduction to Transportation Engineering*, Chapter 20, NPTEL, pp. 20.1-20.3.

Newcomb D.E., Buncher M., Huddleston I.J. (2001): *Concepts of Perpetual Pavements*, Transportation Research Board, National Research Center, Washington, pp. 4-11.

Njock P.G.A., Yueguang L. (2015): *Comparative Study of French and Chinese Asphalt Pavement Design Methods*, Research Article, Journal of Applied Sciences, Vol.15, Issue 6, pp. 923-928.

Pereira P., Pais J. (2017): *Main flexible pavement and mix design methods in Europe and challenges for the development of an European method*, Article, Journal of Traffic and Transportation Engineering, Volume 4, Issue 4, pp. 316-346.

Poudel N. (2015): *Failure in Flexible Pavement*, Pavement Engineering and Drainage System, Nepal Engineering College, Retrieved from <<
<https://www.slideshare.net/nabaraj101/flexible-pavement-failure>>>.

Reddy S., Moorthy R. (2005): *Significance of bearing capacity of clayey subgrade in flexible pavement design*, Article, International Journal of Pavement Engineering, Vol.6, pp. 183-189.

Strategic Highway Research Program (1993): *Distress identification manual for the long-term pavement performance project*, Publication No.SHRP-P-338, National Research Council, National Academy of Sciences, Washington.

Yoder E.J., Witczak M.W. (1975): *Principles of pavement design*, Εκδόσεις Γκιούρδα.

Διερεύνηση παραμέτρων για το σχεδιασμό εύκαμπτων οδοστρωμάτων με έμφαση στη Γαλλική Μέθοδο

Papers

Lecture notes in Transportation Systems Engineering, Introduction to pavement design, 3 August 2009.

Sites

<https://www.pavementinteractive.org/>

<https://theconstructor.org/>