



**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο**

**Σχολή Πολιτικών Μηχανικών**

**Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής**

**Εργαστήριο Οδοποιίας**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΙΣΟΔΥΝΑΜΗΣ  
ΚΥΚΛΟΦΟΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ  
ΕΥΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**



**Αναστασία Πατριανάκου**

**Επιβλέπουσα: Χριστίνα Πλατή, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ**

**Αθήνα, Μάρτιος 2022**

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κυκλοφορία, και πιο συγκεκριμένα η αθροιστική κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων για την περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος, αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης του οδοστρώματος, σε σχέση με την καταστρεπτική επίδραση που έχει η διέλευση των αξονικών φορτίων στο οδόστρωμα. Οι βασικές θεωρήσεις που έχουν αναπτυχθεί για τη κυκλοφορία και χρησιμοποιούνται στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων είναι η θεώρηση μίας ενιαίας μονάδας έκφρασης της κυκλοφορίας οριζόμενη ως ισοδύναμη, που υπολογίζεται από τις διελεύσεις των διαφορετικών αξονικών φορτίων και την φθορά που θα επιφέρουν στο οδόστρωμα, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως με πλήθος μεθοδολογιών προσδιορισμού συντελεστών ισοδυναμίας. Η δε δεύτερη θεώρηση αφορά τη λεπτομερή καταγραφή των διαφόρων αξονικών φορτίων και διατάξεων τροχών, της πραγματικής κυκλοφορίας. Η 2<sup>η</sup> χαρακτηρίζεται από την πολυπλοκότητα των δεδομένων εισαγωγής κατά τον σχεδιασμό. Συμπερασματικά οποιαδήποτε αλλαγή στη θεώρησή της κυκλοφορίας, έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων. Δεδομένων τούτων, στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η συγκριτική αξιολόγηση των δύο θεωρήσεων της κυκλοφορίας σχεδιασμού (ισοδύναμοι τυπικοί άξονες και πραγματική κυκλοφορία) και η διερεύνηση της επίδρασής τους στις παραμένουσες παραμορφώσεις που παρουσιάζονται στις επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιείται πειραματική ανάλυση σε δεδομένη διατομή οδοστρώματος και με δεδομένες διελεύσεις αξόνων βαρέων οχημάτων, για την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων που αφορούν την ορθότερη θεώρηση της κυκλοφορίας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων.

Λέξεις κλειδιά: ισοδύναμη κυκλοφορία, πραγματική κυκλοφορία, ισοδύναμο τυπικό αξονικό φορτίο, συντελεστής ισοδυναμίας, παραμένουσα παραμόρφωση

## **ABSTRACT**

Traffic, and more specifically the cumulative traffic of heavy vehicles for the road design period, is one of the key parameters in the context of road dimensioning, in relation to the destructive effect of the passage of axial loads on the road. The basic considerations developed for traffic and applied in pavement design are the consideration of a single unit of traffic expression defined as equivalent, calculated from the crossings of different axle loads and the damage they will cause during the use of pavement; it is widely used in pavement designing process with a big number of equivalence coefficient methodologies also. The second view concerns the detailed recording of the various axle loads and wheel arrangements, the actual traffic. The latter is characterized by the complexity of the input data during the process of designing pavements. In conclusion, any change in the concept of traffic has a significant effect on the behavior of the pavements. This taken in mind, the aim of this dissertation is the comparative evaluation of the two views of design traffic (equivalent Single Axle Loads and actual traffic) and the investigation of their effect on the remaining deformations that occur in the individual layers of the road. In the context of the present work, it is also performed an experimental analysis on a given road section and with given crossings of heavy vehicle axles, in order to draw generalized conclusions regarding the more correct view of the traffic that must be taken into account in the dimensioning of the roads.

Key words: equivalent traffic, actual traffic, Equivalent Single Axle Load, load equivalence factor, residual deformation

# Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή .....	1
1.1	Αντικείμενο .....	1
1.2	Στόχος Διπλωματικής .....	2
1.3	Δομή Εργασίας .....	2
2	Ανάλυση Κυκλοφορίας για τον Σχεδιασμό Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων .....	4
2.1	Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες .....	4
2.1.1	Γενικά στοιχεία .....	4
2.1.2	Κανόνας 4 <sup>ης</sup> Δύναμης.....	9
2.1.3	COST 334 .....	11
2.1.4	Γενικευμένος Συντελεστής Ισοδυναμίας .....	14
2.1.5	Γαλλική Μέθοδος.....	16
2.2	Πραγματική (μικτή) κυκλοφορία .....	18
3	Στοιχεία Πειραματικής Ανάλυσης. ....	21
3.1	Πειραματική διατομή οδοστρώματος .....	21
3.2	Πρωτογενή δεδομένα κυκλοφορίας .....	22
3.3	Διάταξη αξονικών φορτίων .....	23
3.4	Υπολογισμός Διελεύσεων Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων .....	26
3.5	Συμπεριφορά οδοστρώματος .....	30
4	Ανάλυση δεδομένων .....	33
4.1	Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης με θεώρηση πραγματικής κυκλοφορίας .....	33
4.2	Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης με θεώρηση ισοδύναμης κυκλοφορίας με σύγκριση ως προς την πραγματική .....	35
4.2.1	Ασφαλτική στρώση .....	35
4.2.2	Στρώση βάσης.....	40
4.2.3	Στρώση έδρασης.....	45
5	Συμπεράσματα .....	52
6	Βιβλιογραφία.....	57

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο

Η διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων συνίσταται στο καθορισμό των υλικών και των παχών των επιμέρους στρώσεων, για συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες και κυκλοφοριακό φόρτο. Η κυκλοφορία, και πιο συγκεκριμένα η αθροιστική κυκλοφορία των βαρέων οχημάτων για την περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος, αποτελεί μια από τις βασικότερες παραμέτρους στο πλαίσιο της διαστασιολόγησης του οδοστρώματος. Η κυκλοφορία λαμβάνεται υπόψη ως προς την καταστρεπτική επίδραση που έχει η διέλευση των αξονικών φορτίων στο οδόστρωμα. Επομένως, η κυκλοφορία σχεδιασμού του οδοστρώματος δεν αφορά στο πλήθος των βαρέων οχημάτων αλλά στο πλήθος των αξονικών φορτίων. Λαμβάνοντας υπόψη ότι υπάρχουν διάφοροι τύποι βαρέων οχημάτων με διαφορετικά αξονικά φορτία, διάφορες διατάξεις τροχών και πλήθος αξόνων, αντιλαμβάνεται κανείς ότι ο προσδιορισμός της κυκλοφορίας σχεδιασμού αποτελεί μια πολυπαραμετρική διαδικασία.

Στο πλαίσιο της εμπειρικής μεθόδου διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) η κυκλοφορία σχεδιασμού εκφράζεται σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες (Equivalent Single Axle Loads: ESALs). Ο τυπικός άξονας ορίστηκε κατά το οδικό πείραμα AASHO ως ένας μονός άξονας με δίδυμους τροχούς και αξονικό φορτίο 80 kN (ή 8.16 t) και θεωρείται ότι δημιουργεί στο οδόστρωμα φθορά ίση με τη μονάδα. Η πραγματική (μικτή) κυκλοφορία μετατρέπεται σε ισοδύναμη μέσω ενός συντελεστή ισοδυναμίας, υπό την έννοια ότι η ισοδύναμη κυκλοφορία θα επιφέρει την ίδια φθορά στο οδόστρωμα με την πραγματική (AASHTO, 1993). Έκτοτε η έννοια της ισοδύναμης κυκλοφορίας έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως τόσο στο πλαίσιο εμπειρικών όσο και μηχανιστικών-εμπειρικών μεθόδων διαστασιολόγησης, ενώ έχουν αναπτυχθεί πλήθος μεθοδολογιών για τον προσδιορισμό του συντελεστή ισοδυναμίας (Hajek, 1995) (European Commission Directorate General Transport, 2001).

Εξέλιξη της εμπειρικής μεθόδου AASHTO η οποία έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως διεθνώς για τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων, αποτελεί η μηχανιστική-εμπειρική μέθοδος MEPDG (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide), η οποία ολοκληρώθηκε το 2004 και χρησιμοποιείται κυρίως στην Αμερική από το 2008 (AASHTO, 2008). Σύμφωνα με την υπόψη μέθοδο, η θεώρηση της κυκλοφορίας σχεδιασμού βασίζεται σε λεπτομερή καταγραφή των διαφόρων αξονικών φορτίων και διατάξεων τροχών. Επομένως, λαμβάνεται υπόψη η πραγματική κυκλοφορία και δεν πραγματοποιείται η μετατροπή της σε ισοδύναμη. Στόχος είναι η βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων εισάγοντας πολλαπλές παραμέτρους για τον προσδιορισμό της κυκλοφορίας σχεδιασμού. Παράλληλα, αυξάνεται και η πολυπλοκότητα των δεδομένων εισαγωγής.

Δεδομένου ότι η κυκλοφορία σχεδιασμού αποτελεί μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατά το σχεδιασμό ενός οδοστρώματος, γίνεται αντιληπτό ότι οποιαδήποτε

αλλαγή στη θεώρησή της μπορεί να έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά των οδοστρωμάτων.

## 1.2 Στόχος Διπλωματικής

Υπό το πρίσμα των ανωτέρω, στόχο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η συγκριτική αξιολόγηση των δύο θεωρήσεων της κυκλοφορίας σχεδιασμού (ισοδύναμοι τυπικοί άξονες και πραγματική κυκλοφορία) και η διερεύνηση της επίδρασής τους στην συμπεριφορά του οδοστρώματος. Ως δείκτης συμπεριφοράς του οδοστρώματος λαμβάνεται η παραμένουσα παραμόρφωση που ορίζεται ως το βάθος αυλάκωσης.

Για την επίτευξη του στόχου πραγματοποιείται ανασκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας για την καταγραφή των διαφόρων μεθοδολογιών προσδιορισμού του συντελεστή ισοδυναμίας, καθώς και για την αξιολόγηση των σχετικών παραμέτρων που υπεισέρχονται στις μεθόδους AASHTO και MEPDG. Εν συνεχεία, πραγματοποιείται πειραματική ανάλυση σε δεδομένη διατομή οδοστρώματος και με δεδομένες διελεύσεις αξόνων βαρέων οχημάτων.

Για την πειραματική ανάλυση, αρχικά λαμβάνεται υπόψη η πραγματική κυκλοφορία, η οποία περιλαμβάνει πέντε διαφορετικές διατάξεις αξόνων, τροχών και αξονικών φορτίων. Κατόπιν οι διελεύσεις της κάθε διάταξης μετατρέπονται σε ισοδύναμες διελεύσεις, με διαφορετικές μεθόδους μετατροπής της κυκλοφορίας. Βάσει των δύο αυτών θεωρήσεων πραγματοποιείται ανάλυση σύμφωνα με τις βασικές αρχές της μηχανιστικής-εμπειρικής μεθόδου MEPDG, για την συμπεριφορά του οδοστρώματος ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση. Η συγκριτική αξιολόγηση που ακολουθεί, έχει ως κύριο σκοπό την εξαγωγή γενικευμένων συμπερασμάτων που αφορούν την ορθότερη θεώρηση της κυκλοφορίας που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων.

## 1.3 Δομή Εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια, συμπεριλαμβανομένου του παρόντος εισαγωγικού κεφαλαίου.

Στο **κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται η διεθνής βιβλιογραφία που αφορά τη θεώρηση της ισοδύναμης κυκλοφορίας στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων και τις επιμέρους μεθόδους υπολογισμούς της δίνοντας έμφαση στο πως αυτή εισήχθη κατά την ανάπτυξη της εμπειρικής μεθόδου AASHTO. Επίσης μέσα από τη διεθνή βιβλιογραφία, αναλύονται οι αρχές θεώρησης της πραγματικής κυκλοφορίας στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, όπως αυτές καθορίστηκαν κατά την ανάπτυξη της αναλυτικής μεθόδου MEPDG.

Στο **κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται τα δεδομένα της πειραματικής ανάλυσης: διατομή οδοστρώματος, πάχη και μηχανικά χαρακτηριστικά επιμέρους στρώσεων και σύνθεση πραγματικής κυκλοφορίας. Γίνεται η μετατροπή της κυκλοφορίας σε ισοδύναμη με την χρήση διαφορετικών μεθόδων. Επιπλέον, αναλύεται η παραμένουσα παραμόρφωση ως

δείκτης συμπεριφοράς των οδοστρωμάτων σύμφωνα με τις βασικές αρχές της μεθόδου MEPDG και ορίζονται οι βασικές παράμετροι σχεδιασμού που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί η πειραματική ανάλυση.

Στο **κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα της πειραματικής ανάλυσης και παρατίθενται σχόλια και παρατηρήσεις επί αυτών.

Στο **κεφάλαιο 5** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, στο **κεφάλαιο 6** παρατίθεται το σύνολο της βιβλιογραφίας που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας.

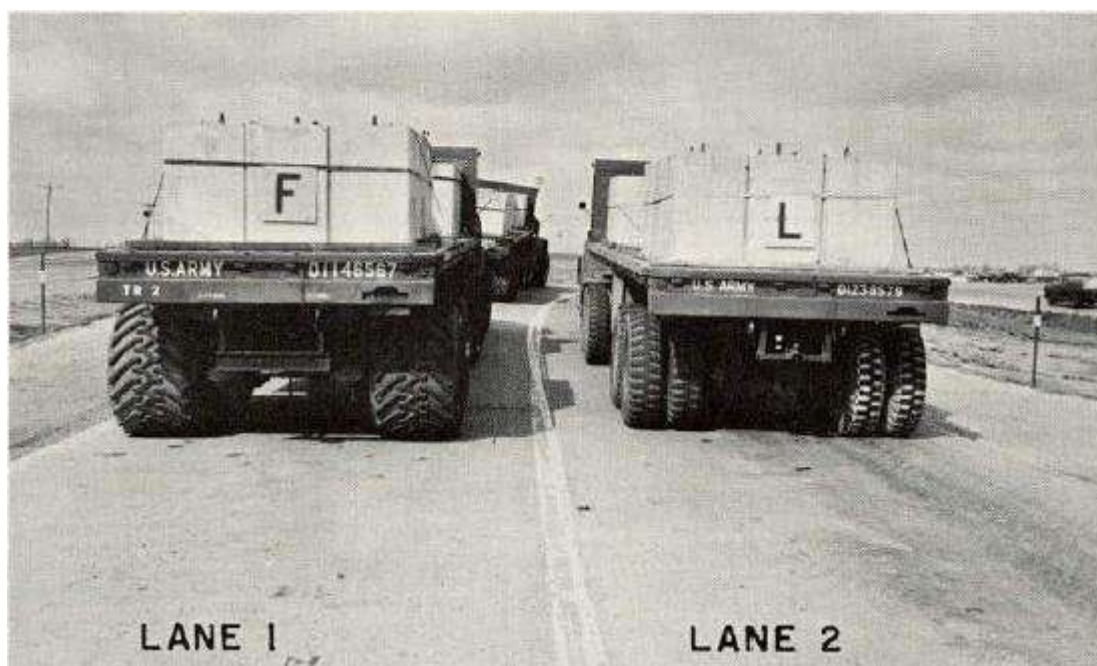
## 2 Ανάλυση Κυκλοφορίας για τον Σχεδιασμό Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων

### 2.1 Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες

#### 2.1.1 Γενικά στοιχεία

Στις αρχές της δεκαετίας του 1950, η Αμερικανική Ένωση Κρατικών Αυτοκινητοδρόμων (American Association of State Highway Officials, AASHO για συντομία) ασχολήθηκε με την επίλυση του προβλήματος για το πώς το μέγεθος του αξονικού φορτίου επηρεάζει τη φθορά που αναπτύσσεται σε ένα οδόστρωμα και κατά συνέπεια τη διάρκεια ζωής του. Για το σκοπό αυτό, κατασκευάστηκε μια δοκιμαστική πίστα στην Οττάβα (Ιλινόις) εντός μιας περιόδου αρκετών ετών, η οποία αποτελούνταν από έξι επαναλαμβανόμενους βρόχους με δύο λωρίδες κυκλοφορίας ο καθένας. Οι δρόμοι, που περιλαμβάνονταν στη συγκεκριμένη πίστα, στρώθηκαν κάποιοι με άσφαλτο και κάποιοι άλλοι με μπετόν, με σκοπό να ληφθούν υπόψιν εύκαμπτα και δύσκαμπτα οδοστρώματα στις δοκιμές, καθώς και σε διαφορετικά πάχη.

Κατά τη διάρκεια δύο ετών που πραγματοποιούνταν οι δοκιμές, δηλαδή κατά τη διάρκεια του Οδικού Πειράματος AASHO όπως είναι γνωστό, βαρέα οχήματα με διαφορετικά αξονικά φορτία διέρχονταν από αυτά τα δοκιμαστικά οδοστρώματα σχεδόν συνεχόμενα. Πιο συγκεκριμένα, διαφορετικά βαρέα οχήματα με φορτία μονού άξονα που κυμαίνονταν μεταξύ 0,9 και 13,9 τόνων καθώς και βαρέα οχήματα με διπλούς άξονες τα φορτία των οποίων κυμαίνονταν μεταξύ 10,9 και 21,8 τόνων, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1, κινήθηκαν πάνω από τα οδικά τμήματα σε μια συνεχή ροή, ενώ κάθε οδόστρωμα είχε σχεδιαστεί για να φιλοξενεί οχήματα μονού άξονα μόνο (AASHO, 1961-1962).



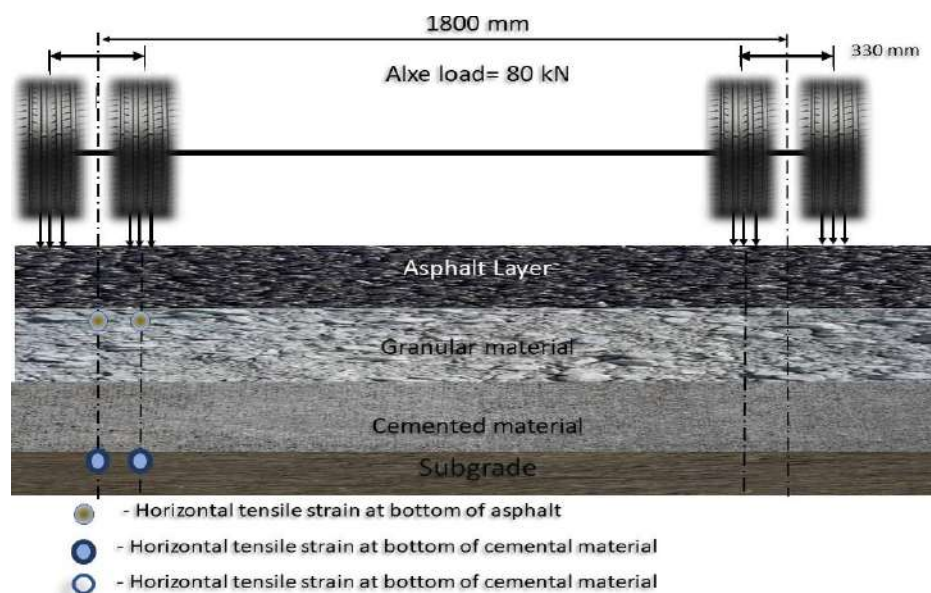
Εικόνα 2.1 : Διελεύσεις βαρέων οχημάτων κατά τις δοκιμές του Οδικού Πειράματος AASHO



Κύριος στόχος του Οδικού Πειράματος AASHO ήταν η ανάπτυξη ενός συστήματος για την αξιολόγηση της λειτουργικότητας ενός οδοστρώματος, η οποία σχετίζεται με την ποιότητα κύλισης, την ασφάλεια της κυκλοφορίας και γενικά το κόστος που επιβαρύνει τους χρήστες μιας οδού. Το Οδικό Πείραμα AASHO αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των οδοστρωμάτων, ενώ εισήγαγε σε αυτόν την έννοια της λειτουργικότητας και της οικονομίας (AASHO, 1962).

Οι έρευνες και οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια του Οδικού Πειράματος AASHO δημιούργησαν την ανάγκη για τη θεώρηση ενός ενιαίου συστήματος μονάδων έκφρασης του κυκλοφοριακού φόρτου. Αν και είναι σχετικά απλό να προσδιοριστεί το φορτίο του τροχού ή του άξονα για ένα μεμονωμένο όχημα, η πολυπλοκότητα αυξάνεται με το πλήθος των οχημάτων που διέρχονται από ένα συγκεκριμένο οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού αλλά και της διάταξης και του αξονικού φορτίου που φέρει το καθένα από αυτά. Επιπλέον, πρωταρχικό μέλημα των μελετητών δεν ήταν να προσδιοριστεί το φορτίο του τροχού ή του άξονα των διερχόμενων οχημάτων, αλλά η φθορά στο οδόστρωμα που προκαλείται από το φορτίο αυτό.

Η πλέον κοινή προσέγγιση, με σκοπό την επίλυση του προβλήματος αυτού, είναι η μετατροπή του συνόλου των φθορών που προκαλείται από αξονικά φορτία διαφορετικών μεγεθών και διελεύσεων, ή αλλιώς η πραγματική κυκλοφορία όπως έχει οριστεί, σε φθορά που έχει προκληθεί από διελεύσεις «τυποποιημένων» ή «ισοδύναμων» αξονικών φορτίων. Επομένως, με σκοπό την ομογενοποίηση της κυκλοφορίας και την έκφραση της σε μία ενιαία μονάδα φορτίου, αποδείχθηκε ότι η καταστροφική επίδραση στο οδόστρωμα της διέλευσης ενός άξονα με οποιαδήποτε διάταξη και αξονικό φορτίο, μπορεί να αντιπροσωπευτεί καλύτερα από έναν αριθμό ισοδύναμων διελεύσεων μονού άξονα με φορτίο 18 kip (ή 80 kN). Το φορτίο αυτό έχει οριστεί ως Ισοδύναμο Τυπικό Αξονικό φορτίο (ESAL: Equivalent Single Axle Load). Θεωρήθηκε ότι μια διέλευση του τυπικού αξονικού φορτίου επιφέρει καταστροφή στο οδόστρωμα ίση με τη μονάδα. Η διάταξη του, όπως παρουσιάζεται και στην εικόνα 2.2, πέραν από το μονό άξονα με τους δίδυμους τροχούς, θεωρείται ότι εφαρμόζεται στο οδόστρωμα σε δύο κυκλικές περιοχές με τα κέντρα τους σε απόσταση 330 mm και με ομοιόμορφη πίεση επαφής των ελαστικών  $p=550$  kPa. Επίσης, ένα ακόμη χαρακτηριστικό του Ισοδύναμου Τυπικού Αξονικού Φορτίου που δεν αναφέρεται συχνά είναι η ακτίνα των τροχών του η οποία λαμβάνεται ίση με  $R=0,105$ m και το μήκος του μονού άξονα που είναι ίσο με 1800 mm (Sountharajah et al, 2015).



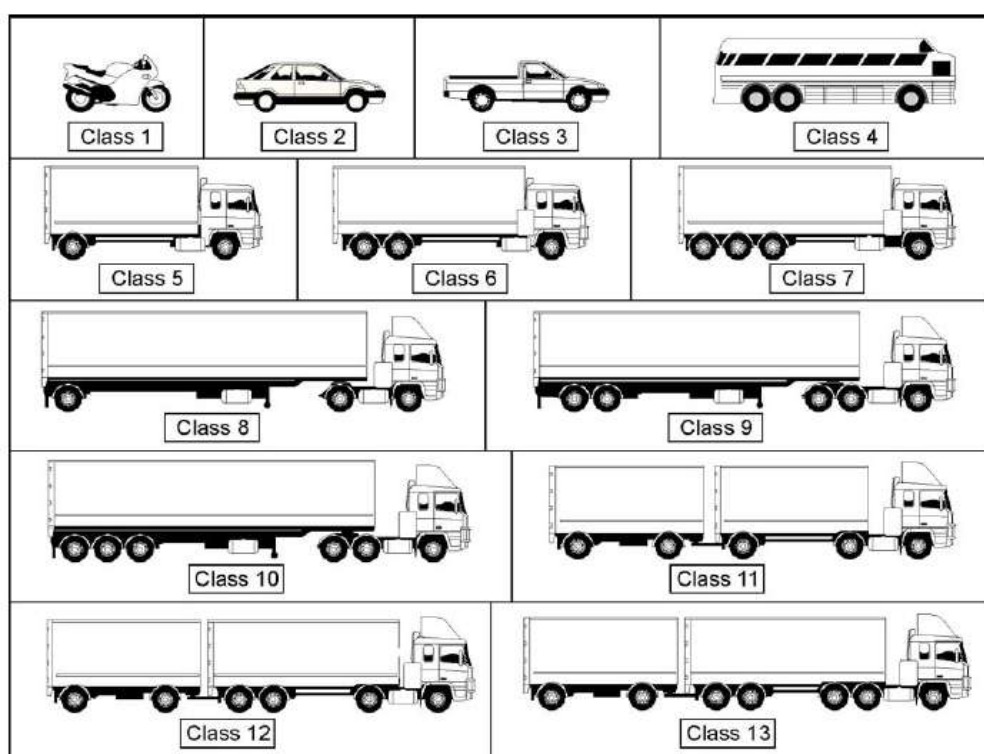
Εικόνα 2.2. Διάταξη ισοδύναμου τυπικού αξονικού φορτίου.

Η εμπειρική μέθοδος AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) είναι βασισμένη στα αποτελέσματα της ανάλυσης των πειραματικών οδοστρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στο Οδικό Πείραμα AASHO και αναλύεται διεξοδικά στον οδηγό που εκδόθηκε το 1993 από το συγκεκριμένο οργανισμό σχετικά με το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων (AASHTO, 1993). Πρόκειται για μια μέθοδο που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό εύκαμπτων αλλά και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων και είναι διεθνώς αναγνωρισμένη για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που εξάγονται από αυτή και επιπλέον είναι αρκετά φιλική προς το μελετητή. Για την χρήση της μεθόδου απαιτείται η εκτίμηση πέντε βασικών παραμέτρων, όπως η αξιοπιστία (Reliability), η Τυπική Απόκλιση (Overall standard deviation  $S_o$ ), η απώλεια εξυπηρετικότητας οδοστρώματος (Serviceability Loss  $\Delta PSI$ ), το ενεργό μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης (Effective roadbed soil resilient modulus  $M_R$ ) και οι Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες ( $W_{18}$ ) (Λοϊζος & Πλατή, 2018).

Στα πλαίσια της μεθόδου, για να υπολογιστεί η ισοδύναμη κυκλοφορία, που ορίζεται ως διελεύσεις Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων, χρησιμοποιείται το Ισοδύναμο Τυπικό Αξονικό Φορτίο (ESAL) και προσδιορίζεται ο Συντελεστής Ισοδυναμίας (LEF: Load Equivalency Factor). Ο συντελεστής αυτός συσχετίζει όλους τους διαφορετικούς συνδυασμούς αξονικού φορτίου που διέρχονται από το οδόστρωμα που μελετάται με το Ισοδύναμο Τυπικό Μονοαξονικό Φορτίο των 80kN (ή 8,16 τόνοι). Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της πολυπλοκότητας των εμπειρικών σχέσεων που περιλαμβάνονται στην μέθοδο AASHTO ήταν πολύ πιο πρακτικό να χρησιμοποιηθεί μια ενιαία μορφή έκφρασης της κυκλοφορίας για να αναπαραστήσει όλο το φορτίο της πραγματικής κυκλοφορίας (NZ Forest Owners Association Inc, 2020).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, με σκοπό τη βέλτιστη διαστασιολόγηση του οδοστρώματος, είναι απαραίτητη μια τυπική διαδικασία κυκλοφοριακής μελέτης, η οποία περιλαμβάνει τα εξής:

- Εκτίμηση της κυκλοφορίας: Οι περισσότερες αστικές περιοχές διαθέτουν ορισμένα ιστορικά αρχεία καταμέτρησης της κυκλοφορίας. Εάν δεν διατίθεται κάτι τέτοιο ο μελετητής μπορεί να χρειαστεί να χρησιμοποιήσει κατά προσέγγιση άλλες εκτιμήσεις κυκλοφορίας.
- Εκτίμηση του αριθμού των βαρέων οχημάτων: Αυτό συνήθως απαιτεί κάποιο είδος ταξινόμησης των οχημάτων σε ομάδες κατά τη διάρκεια της καταμέτρησης της κυκλοφορίας. Μία από τις απλούστερες ταξινομήσεις είναι ο διαχωρισμός των οχημάτων σε δύο κατηγορίες: (1) βαρέα φορτηγά και (2) όλα τα υπόλοιπα, καθώς υπάρχουν και πιο περίπλοκες μέθοδοι ταξινόμησης των οχημάτων. Μια από αυτές τις ταξινομήσεις παρουσιάζεται στην εικόνα 2.3 παρακάτω όπως έχει οριστεί από την Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αυτοκινητοδρόμων (FHWA: Federal Highway Administration). Παραμένει στη κρίση του μελετητή ποια ταξινόμηση οχημάτων θα χρησιμοποιήσει. (Smith & Diefenderfer, 2009)



Εικόνα 2.3: Οι 13 κατηγορίες οχημάτων σύμφωνα με την FHWA που χρησιμοποιούνται για τη συλλογή και καταμέτρηση δεδομένων κυκλοφορίας (μετά το FHWA, 2001)

- Εκτιμώμενος ρυθμός αύξησης της κυκλοφορίας (και των βαρέων οχημάτων) κατά τη διάρκεια ζωής του οδοστρώματος: Απαιτείται μια εκτίμηση του ρυθμού αύξησης της κυκλοφορίας για τη μετατροπή της καταμετρημένης κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια ενός έτους στη συνολική κυκλοφορία που πρόκειται να διέλθει κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού του οδοστρώματος. Μια συνήθης προσέγγιση είναι ο πολλαπλασιασμός της αρχικής καταμέτρησης της κυκλοφορίας επί τη περίοδο σχεδιασμού του οδοστρώματος (σε χρόνια), η οποία όμως φαίνεται να υποτιμάει σε μεγάλο βαθμό το σύνολο των ΙΤΑ.

- Επιλογή κατάλληλων Συντελεστών Ισοδυναμίας (LEF) για τη μετατροπή της πραγματικής κυκλοφορίας σε ισοδύναμη (ESALs): Το βήμα αυτό είναι αρκετά σημαντικό καθώς διαφορετικές περιοχές μπορεί να αντιμετωπίσουν διαφορετικούς διατάξεις τροχών και αξόνων αλλά και διαφορετικούς τύπους αξονικών φορτίων. Στην εικόνα 2.4 φαίνονται οι επιπτώσεις που μπορεί να έχει στο οδόστρωμα η λανθασμένη εκτίμηση των Συντελεστών Ισοδυναμίας και κατ' επέκταση, της ισοδύναμης κυκλοφορίας (Pavement Tools Consortium, 2022).



Εικόνα 2.4: Προκύπτουσα φθορά από σημαντική αύξηση των Ισοδύναμων Τυπικών αξόνων, λόγω αύξησης της κυκλοφορίας των λεωφορείων

- Εκτίμηση της ισοδύναμης κυκλοφορίας: Με κατάλληλη θεώρηση, τα επιμέρους φορτία και οι διελεύσεις βαρέων οχημάτων μετατρέπονται σε ισοδύναμη κυκλοφορία και αθροίζονται έτσι ώστε να προκύψουν οι συνολικές ισοδύναμες διελεύσεις ή διαφορετικά σε Ισοδύναμους Τυπικούς Άξονες (ITA).
- Κατανομή της κυκλοφορίας στη λωρίδα σχεδιασμού: οι ITA υπολογίζονται για τη λωρίδα μελέτης, ανάλογα με τον αριθμό των λωρίδων ανά κατεύθυνση που διαθέτει η οδός που μελετάται (Pavement Tools Consortium, 2022).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η έννοια του Συντελεστή Ισοδυναμίας μπορεί να πρωτοεμφανίστηκε στα πλαίσια της εμπειρικής μεθόδου AASHTO, με σκοπό τη διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων, όμως με τη πάροδο των χρόνων έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού του, οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι ορισμένοι φορείς που έχουν ως αντικείμενο τον σχεδιασμό και τη συντήρηση οδοστρωμάτων χρησιμοποιούν τους Συντελεστές Ισοδυναμίας που προτείνονται από τη μέθοδο AASHTO ακόμη και όταν έχει διαπιστωθεί ότι οι τιμές αυτές δεν παρέχουν ακριβή αποτελέσματα σε ότι αφορά τη διαστασιολόγηση (Rys et al, 2016).

### 2.1.2 Κανόνας 4<sup>ης</sup> Δύναμης

Στα πλαίσια του Οδικού Πειράματος AASHO στα τέλη της δεκαετίας του 1950 αποδείχθηκε ότι η πίεση σε ένα οδόστρωμα από ένα μηχανοκίνητο όχημα είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το αξονικό φορτίο του εν λόγω οχήματος. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι υπάρχει μια σχέση αλληλεπίδρασης μεταξύ του πάχους του οδοστρώματος, του αριθμού των διελεύσεων των φορτίων και του αξονικού φορτίου, με αποτέλεσμα η αλλαγή στη φθορά του οδοστρώματος να είναι ανάλογη με τη διαφορά στο φορτίο του άξονα του οχήματος υψωμένο στην τέταρτη δύναμη. Επομένως, για τα εύκαμπτα οδοστρώματα η αριθμητική μεταβλητή γ, από τη σχέση 2.1, λαμβάνει τη τιμή 4 και η σχέση αυτή ονομάζεται Κανόνας της 4<sup>ης</sup> Δύναμης. Η ανάπτυξη αυτής της μεθόδου προσδιορισμού του Συντελεστή Ισοδυναμίας ήταν καθοριστικής σημασίας για τον τομέα της οδοποιίας, καθώς συνέβαλλε στην ανάπτυξη της εμπειρικής μεθόδου AASHTO (NZ Forest Owners Association Inc, 2020).

Ο Κανόνας της 4<sup>ης</sup> Δύναμης εκφράζεται:

$$\Sigma I = \left( N_i / N_T \right) = \left( P_i / P_T \right)^4 \quad (2.1)$$

Όπου:

P<sub>i</sub>: Αξονικό φορτίο

P<sub>T</sub>: Ισοδύναμο Τυπικό Αξονικό φορτίο = 80kN

N<sub>T</sub>: ο αριθμός των διελεύσεων του Ισοδύναμου Τυπικού Αξονικού φορτίου

N<sub>i</sub>: ο αριθμός διελεύσεων του αξονικού φορτίου.

Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται μερικοί τυπικοί Συντελεστές Ισοδυναμίας (Load Equivalency Factor LEF) για διάφορους συνδυασμούς αξονικού φορτίου σύμφωνα με το Κανόνα της 4<sup>ης</sup> Δύναμης (Divinsky, Livneh, & Nesichi, 1999).

Πίνακας 2.1: Τυπικές Τιμές Συντελεστή Ισοδυναμίας Φορτίου

Axle Type (lbs)	Axle Load		Load Equivalency Factor (from AASHTO, 1993)	
	(kN)	(lbs)	Flexible	Rigid
Single axle	8.9	2,000	0.0003	0.0002
	44.5	10,000	0.118	0.082
	62.3	14,000	0.399	0.341
	80.0	18,000	1.000	1.000
	89.0	20,000	1.4	1.57
	133.4	30,000	7.9	8.28
Tandem axle	8.9	2,000	0.0001	0.0001
	44.5	10,000	0.011	0.013
	62.3	14,000	0.042	0.048
	80.0	18,000	0.109	0.133
	89.0	20,000	0.162	0.206
	133.4	30,000	0.703	1.14
	151.2	34,000	1.11	1.92
	177.9	40,000	2.06	3.74
	222.4	50,000	5.03	9.07

Αξίζει να αναφερθεί, ότι στην πραγματικότητα ο εκθέτης 4 στον Κανόνα της 4ης Δύναμης δεν ήταν αυστηρά σταθερός αλλά κυμαινόταν από 3,6 έως 4,6. Μεταγενέστερη πειραματική και θεωρητική έρευνα έχει δείξει μεγαλύτερη μεταβλητότητα στον εκθέτη αυτό, αλλά δεν έχει καταλήξει σε κάποιο συγκεκριμένο συμπέρασμα. Επίσης, έχει αποδειχθεί με βάση έρευνες ότι ο εκθέτης εξαρτάται και από την έκταση της καταπόνησης του οδοστρώματος, αφού εμφανίζεται να είναι μικρότερος πριν δημιουργηθεί κάποιας μορφής αστοχία (Uzan & Sidess, 1990).

Ειδικότερα, πρέπει να γίνει κατανοητό ότι ο Κανόνας της 4ης Δύναμης περιλαμβάνει όλες τις μορφές καταπόνησης του οδοστρώματος. Οι πιο σημαντικές καταπονήσεις που λήφθηκαν υπόψη κατά το Οδικό Πείραμα AASHO ήταν οι παραμένουσες παραμορφώσεις-αυλακώσεις (Rutting), και η έλλειψη ομαλότητας (Roughness) του οδοστρώματος. Οι ρωγμές είχαν μικρή επίδραση και έτσι η παραμόρφωση των ασφαλτικών στρώσεων δεν παρουσιάστηκε ως σημαντική στο συγκεκριμένο Οδικό Πείραμα. Ύστερα από έρευνες και δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί προκειμένου να διασαφηνισθεί το συγκεκριμένο ζήτημα, διαπιστώθηκε ότι ο καθορισμός ακριβούς τιμής του εκθέτη δεν είναι πολύ σημαντικός καθώς για τιμές εκθέτη μεταξύ 2 και 6, οι περισσότερες τιμές αξονικού φορτίου της πραγματικής κυκλοφορίας βρέθηκαν να μεταφράζονται σε περίπου τον ίδιο ισοδύναμο αριθμό τυπικών αξόνων. Επομένως, το 4 θεωρήθηκε ως μία σταθμισμένη αποδεκτή τιμή (European Commission Directorate General Transport, 2001).


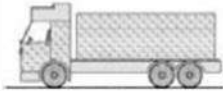

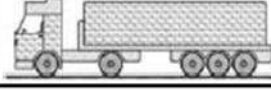
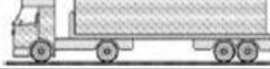
Παρ' όλα αυτά η ακρίβεια του Κανόνα της 4ης δύναμης είναι συχνά-πυκνά αμφισβητούμενη από τους μηχανικούς που ασχολούνται με τον σχεδιασμό νέων οδοστρωμάτων και τη συντήρηση ήδη υπάρχοντων. Το επιχείρημα είναι ότι τα αποτελέσματα των δοκιμών του

Οδικού Πειράματος AASHO εξαρτώνται από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν παραπάνω, αλλά επηρεάζονται και από άλλες μεταβλητές, όπως είναι οι κλιματικές συνθήκες, με αποτέλεσμα να μην είναι βέβαιο ότι μπορεί αν χρησιμοποιηθεί η μέθοδος αυτή ως γενικευμένη (NSW Roads and Transport Directorate, 2017).

### 2.1.3 COST 334

Στη σύγχρονη εποχή παρατηρείται έντονα η εξέλιξη των διατάξεων των αξόνων αλλά και των αξονικών φορτίων που φέρουν τα οχήματα που διέρχονται από μία οδό, συγκριτικά με τα δεδομένα που ίσχυαν τη περίοδο που αναπτύχθηκε το Οδικό Πείραμα AASHO. Η προοδευτική αυτή τάση σε συνδυασμό με την τάση για αυξημένη χρήση φαρδιών μεμονωμένων ελαστικών, ή διαφορετικά super-single όπως είναι γνωστά, αντί για διπλά ελαστικά οδήγησαν σε σημαντική αύξηση των καταπονήσεων που υποβάλλονται οι επιφάνειες των οδοστρωμάτων. Επίσης, σε αυτές τις αυξημένες καταπονήσεις προστίθεται και ο βαθμός υπερφόρτωσης ενός μικρού ποσοστού βαρέων φορτηγών οχημάτων που πραγματοποιείται στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, με αποτέλεσμα η φθορά του οδοστρώματος να λαμβάνει χώρα πιο γρήγορα από το αναμενόμενο. Στο Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται ορισμένες ενδεικτικές τιμές αξονικών φορτίων οι οποίες δεν πρέπει να υπερβαίνονται από τους χρήστες της οδού (European Commission Directorate General Transport, 2001).

Πίνακας 2.2: Διατάξεις βαρέων οχημάτων και μέγιστα επιτρεπόμενα αξονικά φορτία

Class of vehicle		Maximum load per Axle (kN)					
		1 <sup>st</sup> axle	2 <sup>nd</sup> axle	3 <sup>rd</sup> axle	4 <sup>th</sup> axle	5 <sup>th</sup> axle	6 <sup>th</sup> axle
B2		53.94	117.68	-	-	-	-
BH3		53.94	107.87	107.87	-	-	-
S123		53.94	107.87	107.87	101.33	101.33	101.33
S113		53.94	117.68	101.33	101.33	101.33	-
S112		53.94	117.68	107.87	107.87	-	-

Σε αυτό το πλαίσιο, του μη ποσοτικοποιημένου αλλά αντιληπτού μειωμένου κόστους για τους χειριστές των οχημάτων, του αυξημένου κόστους για τους ιδιοκτήτες δρόμων, των

οφελών που δημιουργούνται στην ασφάλεια και του μειωμένου κόστους από τη πλευρά της περιβαλλοντικής ανάπτυξης, η COST Action 334 (European Co-operation in Field of Scientific and Technical Research) έχει πραγματοποιήσει μια έρευνα. Η έρευνα αυτή έχει στόχο να ποσοτικοποιήσει αυτά τα κόστη και τα οφέλη, και να προτείνει τρόπους με σκοπό την εξισορρόπηση τους.

Σύμφωνα με την COST Action 334, τα φαρδιά μεμονωμένα ελαστικά, όπως παρουσιάζονται στην εικόνα 2.5, ως εναλλακτική λύση αντικατάστασης των διπλών ελαστικών, μπορούν να προσφέρουν εξοικονόμηση κόστους στον κλάδο των οδικών εμπορευματικών μεταφορών μέσω του μειωμένου βάρους των τροχών, της κατανάλωσης καυσίμου και της φθοράς των ελαστικών. Ωστόσο, τα φαρδιά μεμονωμένα ελαστικά λέγεται συχνά ότι παράγουν μεγαλύτερη φθορά στο οδόστρωμα από τα διπλά ελαστικά, για το ίδιο αξονικό φορτίο. Η ποσοτικοποίηση αυτής της υποτιθέμενης αυξημένης φθοράς του οδοστρώματος των φαρδιών μεμονωμένων ελαστικών, σε σχέση με τα διπλά ελαστικά, είναι απαραίτητη προκειμένου να επιτευχθεί μια ισορροπία μεταξύ της αυξημένης εξοικονόμησης πόρων για τον κλάδο των μεταφορών και του αυξημένου κόστους για τους φορείς που είναι αρμόδιοι για τη διαστασιολόγηση και συντήρηση των οδοστρωμάτων. Επομένως, αυτή η μελέτη θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για κατάλληλες ρυθμιστικές ή νομικές ενέργειες, όπως για παράδειγμα διαφοροποιημένα όρια φορτίου των βαρέων οχημάτων, διαφοροποιημένη φορολογία των οχημάτων ή ακόμη και όρια πίεσης ελαστικών των τροχών. Είναι σημαντικό να αναφερθεί επίσης ότι οι επιπτώσεις των διαφορετικών ελαστικών στη φθορά του οδοστρώματος προκαλούνται μόνο εν μέρει, αν υπάρχουν, από τις διαφορές στον τύπο του ελαστικού αυτού καθαυτού. Πολλές επιπτώσεις στο οδόστρωμα λόγω των διαφορετικών ελαστικών οφείλονται σε διαφορές μεταξύ αυτών ως προς την ικανότητα φόρτωσης, τη συνιστώμενη πίεση με την οποία πρέπει να είναι φουσκωμένο το ελαστικό καθώς και την περιοχή επαφής ελαστικού – οδοστρώματος (European Commission Directorate General Transport, 2001).



Εικόνα 2.5: Παραδείγματα διπλών ελαστικών και φαρδύ μεμονωμένου ελαστικού



Τα αποτελέσματα της COST Action 334 είναι ιδιαίτερα εφαρμόσιμα για εύκαμπτα οδοστρωμάτων που χρησιμοποιούνται σε αυτοκινητόδρομους και κύριες οδούς στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες. Ωστόσο, οι λεπτότερες διατομές εύκαμπτων οδοστρωμάτων που χρησιμοποιούνται σε πολλές τοπικές οδούς πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη λόγω της σημαντικής κυκλοφορίας βαρέων εμπορευμάτων οχημάτων που διέρχονται από αυτές, αλλά και της πιθανότητας η απόκρισή τους στα εφαρμοζόμενα φορτία λόγω της κυκλοφορίας να είναι διαφορετική από αυτή των διατομών με μεγαλύτερα πάχη στρώσεων. Για αυτούς τους λόγους, στη μελέτη της COST 334 γίνεται εκτεταμένη αναφορά στους τύπους των οδοστρωμάτων αλλά και στους τύπους των οδών που υπάρχουν σε κάθε ευρωπαϊκή χώρα, ενώ παρουσιάζεται και ένας προτεινόμενος σχεδιασμός των διατομών των οδοστρωμάτων που βασίζεται στην σωρευτική κυκλοφορία εκφρασμένη σε msa (million single axles), όπως εμφανίζεται στον Πίνακα 2.3 (European Commission Directorate General Transport, 2001).

Πίνακας 2.3: Συνοπτικά τα προτεινόμενα πάχη για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων (COST 333 Management Committee, 1997)

		Cumulative Traffic		
		1 msa	10 msa	100 msa
Equivalent thickness (mm)	Mean	273	378	436
	Thickest	383	497	527
	Thinnest	183	280	330
Thickness of asphalt (mm)	Mean	119	218	295
	Thickest	300	425	410
	Thinnest	25	150	230
Total thickness of pavement (mm)	Mean	573	689	711
	Thickest	1030	1110	1050
	Thinnest	210	280	330

Στα πλαίσια της COST 334, για τον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων, αλλά και για τον προσδιορισμό της επίδρασης των διαφορετικών ελαστικών, πρέπει να προσδιοριστούν οι επιπτώσεις των διαφορετικών αξονικών φορτίων λόγω της κυκλοφορίας στη φθορά του οδοστρώματος. Γενικά αυτό επιτυγχάνεται με τον προσδιορισμό του Συντελεστή Ισοδυναμίας Φορτίου (ΣΙ ή LEF), όπως αναφέρεται παραπάνω. Σε αντίθεση με τον Κανόνα της 4<sup>ης</sup> Δύναμης, κατά τη μελέτη της COST 334 κρίθηκε απαραίτητο να γίνει ένας διαχωρισμός των καταπονήσεων που εμφανίζονται σε ένα οδόστρωμα με σκοπό τον ορθότερο προσδιορισμό της ισοδύναμης κυκλοφορίας. Έτσι, όταν λαμβάνονται υπόψη μεμονωμένα οι συνθήκες καταπόνησης του οδοστρώματος, εντοπίζονται διαφορετικές τιμές του εκθέτη, της εξίσωσης προσδιορισμού του συντελεστή ισοδυναμίας, οι οποίες αναπτύσσονται εντός της μελέτης αναφορικά με την σχέση φορτίου και παραμόρφωσης. Η εξίσωση που προκύπτει είναι της μορφής:

$$\Sigma I = \left( P_i / P_T \right)^n \quad (2.2)$$

Όπου:

$P_i$ : Αξονικό φορτίο

$P_T$ : Τυπικό Αξονικό Φορτίο = 80kN

n: τιμή εκθέτη, ανάλογα με το τύπο της φθοράς:

- από 4 έως 7 για τη ρηγμάτωση των ασφαλτικών στρώσεων,
- από 3 έως 4 για τη μόνιμη παραμόρφωση των υποκείμενων στρώσεων και
- από 1 έως 2 για τη μόνιμη παραμόρφωση των ασφαλτικών στρώσεων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι προαναφερόμενες τιμές αντιπροσωπεύουν τις «καλύτερες εκτιμήσεις», καθώς εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα διαφορετικές ιδιότητες υλικών.

#### 2.1.4 Γενικευμένος Συντελεστής Ισοδυναμίας

Οι συσσωρευτικές επιπτώσεις της φθοράς στο οδόστρωμα λόγω της διέλευσης των οχημάτων συνήθως ποσοτικοποιούνται χρησιμοποιώντας Συντελεστές Ισοδυναμίας αξονικού φορτίου. Οι υφιστάμενοι Συντελεστές Ισοδυναμίας που προτείνονται από άλλες μεθόδους υπολογισμού εξαρτώνται, μεταξύ άλλων παραγόντων, από τον τύπο του οδοστρώματος και το πάχος των επιμέρους στρώσεων του. Αυτό έχει ως συνέπεια να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα σε όλες τις συνθήκες και να μην εκφράζουν τη γενικότητα του κυκλοφοριακού φόρτου. Σε αυτή τη μέθοδο προτείνονται οι Γενικοί Συντελεστές Ισοδυναμίας αξονικού φορτίου (General Axle load equivalency Factors: GAF) που είναι ανεξάρτητοι από μεταβλητές σχετικές με το οδόστρωμα και τις διατάξεις των αξόνων που διέρχονται από αυτό, ενώ έχουν μέγεθος παρόμοιο με τους Συντελεστές Ισοδυναμίας που προτείνονται από την εμπειρική μέθοδο AASHTO. Οι Γενικοί Συντελεστές Ισοδυναμίας (GAF) μπορούν να απλοποιήσουν τη διαχείριση των δεδομένων κυκλοφορίας του οδοστρώματος και των αξονικών φορτίων που προκύπτουν από αυτά, και είναι κατάλληλοι για τις συνήθεις περιπτώσεις διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων. Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί ότι τα σφάλματα που προκύπτουν από την πρόβλεψη των συνολικών διελεύσεων ισοδύναμου αξονικού φορτίου κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού δεν οφείλονται απαραίτητα δεν οφείλονται απαραίτητα στους Συντελεστές Ισοδυναμίας, αλλά και σε άλλους παράγοντες όπως οι εκτιμήσεις του κυκλοφοριακού φόρτου και τα αξονικά φορτία (Hajek, 1995).

Σκοπός της συγκεκριμένης μεθόδου είναι να αναπτυχθεί μια στατιστική θεώρηση κυκλοφοριακού φόρτου, όπως είναι το Ισοδύναμο Τυπικό Αξονικό Φορτίο, που να είναι ανεξάρτητη από τα χαρακτηριστικά του οδοστρώματος με τον ίδιο τρόπο που είναι η Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ). Μια τέτοια στατιστική θεώρηση θα ήταν πολύ χρήσιμη για τη διαχείριση των προβλημάτων που σχετίζονται με το οδόστρωμα, όπως είναι, για παράδειγμα, η αξιολόγηση και σύγκριση των τάσεων φόρτισης του οδοστρώματος σε ένα οδικό δίκτυο που αποτελείται από διάφορους τύπους οδοστρώματος. Οι προτεινόμενοι Γενικοί Συντελεστές Ισοδυναμίας Αξονικών Φορτίων (GAF) μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό τη λήψη τέτοιων στατιστικών θεωρήσεων με τη μορφή Γενικών Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων (GESALS).

Στις παρακάτω εξισώσεις εμφανίζεται ο τρόπος υπολογισμού του GAF σε kN και σε kip:

$$GAF = (0.011169L + 0.064) \left( 4 + \frac{8.9}{L} \right) \quad (2.3)$$

όπου:

L = το αξονικό φορτίο οποιουδήποτε τύπου ή απόστασης σε kN

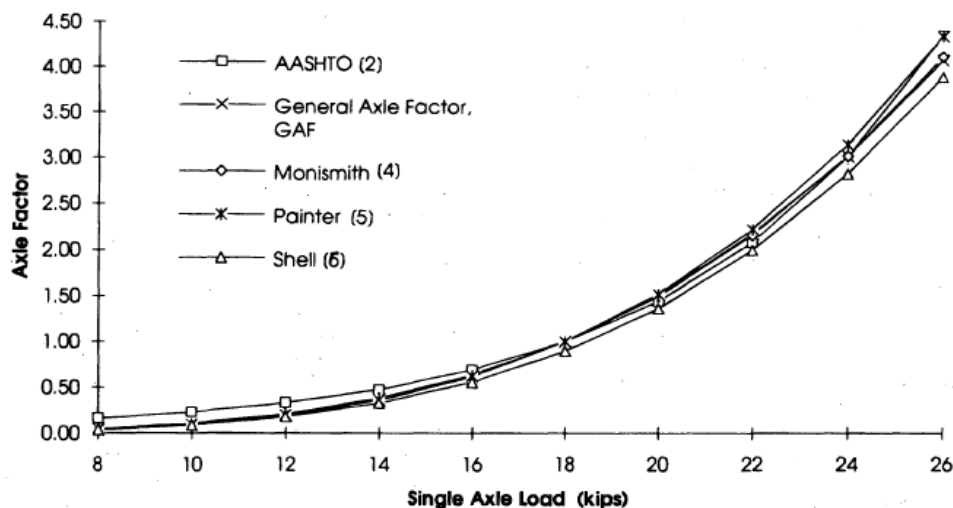
Η εξίσωση για kips γίνεται:

$$GAF = (0.052L + 0.064) \left( 4 + \frac{2}{L} \right) \quad (2.4)$$

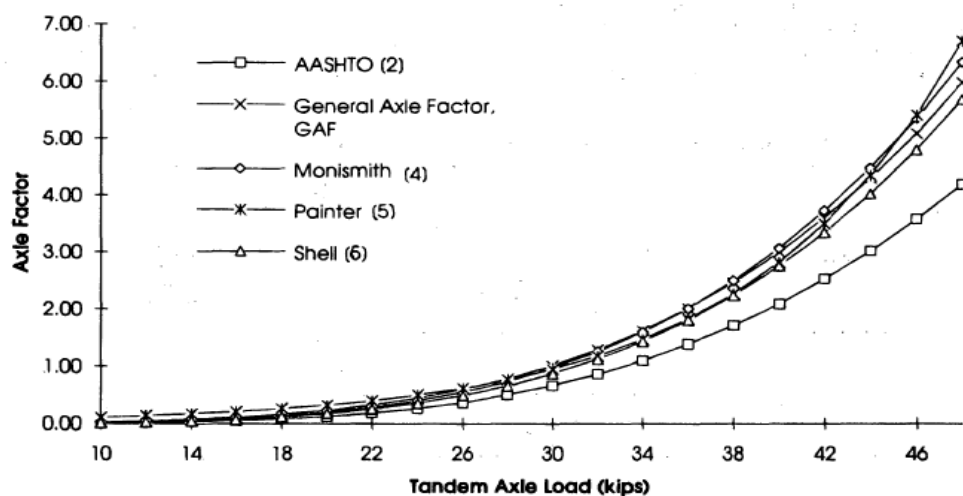
όπου:

L = το αξονικό φορτίο οποιουδήποτε τύπου ή απόστασης σε kip

Στις εικόνες 2.6 και 2.7 παρουσιάζεται ο Συντελεστής GAF, συγκριτικά με άλλες μεθόδους υπολογισμού Συντελεστών Ισοδυναμίας, στις οποίες περιλαμβάνεται και η μέθοδος AASHTO (Hajek, 1995).



Εικόνα 2.6: Σύγκριση των τιμών Συντελεστών Ισοδυναμίας για μονοαξονικό φορτίο (σε kips)



Εικόνα 2.7: Σύγκριση των τιμών Συντελεστών Ισοδυναμίας για φορτίο με δίδυμο άξονα (σε kips)

Αξίζει να σημειωθεί ότι, σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, οι προτεινόμενοι συντελεστές GAF είναι παρόμοιοι με αυτούς που υπολογίζονται με τις άλλες τέσσερις μεθόδους, συμπεριλαμβανομένης και της μεθόδου AASHTO. Η μεγάλη διαφορά των GAF από τις άλλες μεθόδους είναι ότι εμφανίζονται ως ανεξάρτητοι των ιδιοτήτων του οδοστρώματος, δηλαδή του πάχους και του τύπου του, του επιπέδου φθοράς καθώς και των διάφορων διατάξεων των αξόνων που διέρχονται από το διαστασιολογούμενο οδόστρωμα κατά τη διάρκεια της ζωής του. Επίσης, πρέπει να τονιστεί πως οποιαδήποτε αλλαγή στους GAF μπορεί να αποδοθεί άμεσα ως αλλαγή στο κυκλοφοριακό φόρτο.

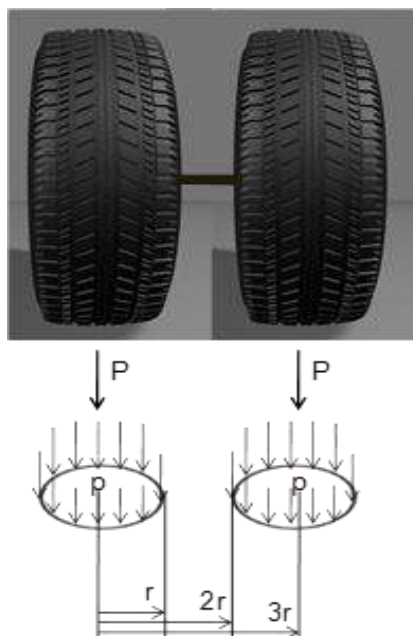
Επιπροσθέτως, σύμφωνα με τη μέθοδο των GAF, μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα πως τα πάχη των στρώσεων της διατομής του οδοστρώματος δεν φαίνεται να είναι υπερβολικά ευαίσθητα στις αλλαγές των φορτίων της κυκλοφορίας. Για παράδειγμα, ο διπλασιασμός των φορτίων που καταπονούν το οδόστρωμα λόγω της κυκλοφορίας (π.χ. των Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων) συνήθως οδηγεί σε αύξηση κατά 25 mm (1 ίντσα) στο πάχος της ασφαλικής στρώσης. Αυτό σημαίνει ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος ως παράγοντας στον σχεδιασμό των οδοστρωμάτων δεν είναι ασήμαντος και ότι οι κατά προσέγγιση συντελεστές GAF είναι επαρκείς. Ο στόχος της μεθόδου με τους συντελεστές GAF είναι να παρέχει έναν απλούστερο και ευκολότερο τρόπο χειρισμού των φορτίων που ασκούνται στο οδόστρωμα λόγω της κυκλοφορίας, η οποία θα πρέπει να οδηγήσει στην καλύτερη διαχείριση και χρήση τους στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων (Hajek, 1995).

### **2.1.5 Γαλλική Μέθοδος**

Στη Γαλλία, το Ινστιτούτο LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées ), το οποίο έχει ονομαστεί πλέον IFSTTAR (Institut Francais Des Sciences Et Technologies Des Transports, De L'amenagement Et Des Reseaux), έχει αναπτύξει μια αναλυτική μέθοδο για τον σχεδιασμό και την κατασκευή οδοστρωμάτων, η οποία ανήκει στην κατηγορία των μηχανιστικών-εμπειρικών μεθόδων. Αυτή η μέθοδος λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες των υλικών των επιμέρους στρώσεων της διατομής του οδοστρώματος και τη φέρουσα ικανότητα που ελέγχεται στο πεδίο. Η απόδοση των υλικών που εμπεριέχονται στη διατομή του οδοστρώματος μετράται στο εργαστήριο, με επαναλαμβανόμενες δοκιμές, οι οποίες προσομοιάζουν την πραγματική συμπεριφορά των υλικών της διατομής του οδοστρώματος που μπορεί να παρατηρηθεί στο πεδίο. Η Γαλλική μέθοδος χρησιμοποιεί την έννοια της κυκλοφορίας ως ισοδύναμη μέσω ενός ισοδύναμου τυπικού αξονικού φορτίου (Balay et al, 2012).

Στα πλαίσια της Γαλλικής μεθόδου, η πραγματική κυκλοφορία που διέρχεται από το οδόστρωμα που μελετάται, μετατρέπεται σε ισοδύναμη, η οποία θεωρεί για Ισοδύναμο Τυπικό Άξονα διαφορετική διάταξη από αυτή που έχει οριστεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Πιο συγκεκριμένα, σε αυτή τη μέθοδο το Ισοδύναμο Τυπικό Αξονικό Φορτίο ισούται με 130 kN και αφορά διάταξη μονού άξονα με διπλούς τροχούς. Η διάταξη του, όπως παρουσιάζεται

και στην εικόνα 2.8, πέραν από το μονό άξονα με τους δίδυμους τροχούς, θεωρείται ότι εφαρμόζεται στο οδόστρωμα σε δύο κυκλικές περιοχές με τα κέντρα τους σε απόσταση 375 mm και με ομοιόμορφη πίεση επαφής των ελαστικών  $p=662 \text{ kPa}$ . Επίσης, ένα ακόμη χαρακτηριστικό του Ισοδύναμου τυπικού αξονικού φορτίου κατά την γαλλική μέθοδο, είναι η ακτίνα των τροχών του η οποία λαμβάνεται ίση με  $R=0,125 \text{ m}$ .



Εικόνα 2.8: Διάταξη Ισοδύναμου Τυπικού Άξονα Γαλλικής μεθόδου

Σύμφωνα με τη Γαλλική μέθοδο σχεδιασμού, εάν χρειάζεται να γίνει ανάλυση σε επίπεδο των επιμέρους αξόνων των βαρέων οχημάτων, και όχι για το όχημα ως σύνολο, θεωρείται ένας συντελεστής Ισοδυναμίας ο οποίος ακολουθεί και αυτός την εκθετική σχέση που έχει αναφερθεί παραπάνω (Balay et al, 2012).

Η εξίσωση υπολογισμού είναι η εξής:

$$\Sigma I = 1.1 \left( \frac{P_i}{P_T} \right)^5 \quad (2.5)$$

Όπου:

$P_i$  : το αξονικό φορτίο του διερχόμενου οχήματος

$P_T$ : το Ισοδύναμο Τυπικό Αξονικό Φορτίο = 130kN

Στη παραπάνω σχέση η σταθερά 1.1 που εμφανίζεται, χρησιμοποιείται με σκοπό να συμπεριληφθεί στο Συντελεστή Ισοδυναμίας η επίδραση που έχουν οι διελεύσεις πολλαπλών αξόνων στο οδόστρωμα που μελετάται.

Η Γαλλική μέθοδος επιτρέπει την προσαρμογή του πάχους της διατομής του οδοστρώματος σύμφωνα με τη φέρουσα ικανότητα της στρώσης έδρασης και της κυκλοφορία, τα υλικά που χρησιμοποιούνται και την πολιτική συντήρησης που υιοθετείται. Σήμερα, οι περισσότεροι γαλλικοί φορείς που έχουν ως αντικείμενο τη διαστασιολόγηση και τη συντήρηση των οδοστρωμάτων επωφελούνται από αυτήν την ομοιόμορφη προσέγγιση και την εφαρμόζουν για τις ανάγκες της κυκλοφορίας που πρέπει να μεταφέρουν τα δικά τους οδικά δίκτυα. Η

διαδικασία της Γαλλικής Μεθόδου για το σχεδιασμό των οδοστρωμάτων περιγράφεται λεπτομερώς στον τεχνικό οδηγό της μεθόδου που ονομάζεται «Γαλλικός Οδηγός Σχεδιασμού για Κατασκευές Οδοστρωμάτων» (French Design Manual for Pavements Structures, 1997).

## 2.2 Πραγματική (μικτή) κυκλοφορία

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η πλέον πρόσφατη και επικυρωμένη μέθοδος σχεδιασμού οδοστρωμάτων είναι η αναλυτική μέθοδος MEPDG, η οποία αποτελεί την εξέλιξη της εμπειρικής μεθόδου AASHTO. Η μέθοδος MEPDG αναλύεται διεξοδικά στον Μηχανιστικό-Εμπειρικό Οδηγό Σχεδιασμού Οδοστρωμάτων (Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide-MEPDG), ο οποίος ολοκληρώθηκε το 2004 και παραδόθηκε στο κοινό με σκοπό να ελεγχθεί και να αξιολογηθεί από αυτό. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό εύκαμπτων αλλά και δύσκαμπτων οδοστρωμάτων, ενώ χρησιμεύει όχι μόνο στη διαστασιολόγηση ενός νέου οδοστρώματος, αλλά και στην αποκατάσταση κάποιου ήδη υφισταμένου. Πρόκειται για μια αναλυτική μέθοδο όπου όλες οι υπολογιστικές διαδικασίες γίνονται μέσω του λογισμικού της. Ο γενικός και κύριος στόχος του οδηγού MEPDG είναι να παράσχει στην κοινότητα των μηχανικών οδοστρωμάτων ένα σύγχρονο εργαλείο για το σχεδιασμό και την ανάλυση νέων και προς ανακατασκευή οδοστρωμάτων, με βάση τις μηχανιστικές-εμπειρικές αρχές. Αυτό σημαίνει ότι η διαδικασία σχεδιασμού και ανάλυσης που χρησιμοποιεί η μέθοδος MEPDG υπολογίζει τις αποκρίσεις του οδοστρώματος, δηλαδή τις εντάσεις και τις παραμορφώσεις που αναμένεται να αναπτυχθούν στο υπό διαστασιολόγηση οδόστρωμα και τις χρησιμοποιεί για τον υπολογισμό της σταδιακής φθοράς του οδοστρώματος που πρόκειται να συμβεί με την πάροδο του χρόνου. Η διαδικασία που πραγματοποιείται στην αναλυτική μέθοδο MEPDG συσχετίζει εμπειρικά τις συνολικές φθορές που υπολογίζονται με τις παρατηρούμενες καταπονήσεις του οδοστρώματος στο πεδίο (AASHTO, 2008).

Στα πλαίσια της μεθόδου αυτής εισάγεται στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων το σύνολο της πραγματικής κυκλοφορίας που διέρχεται από το οδόστρωμα που μελετάται, υπό την έννοια των διαφορετικών διατάξεων αξόνων, τροχών και αξονικών φορτίων. Χρησιμοποιούνται τα πλήρη δεδομένα της διερχόμενης πραγματικής κυκλοφορίας για κάθε τύπο άξονα τόσο για την διαστασιολόγηση νέου οδοστρώματος όσο και για την αποκατάσταση ενός υφιστάμενου. Το εύρος των αξονικών φορτίων της πραγματικής κυκλοφορίας λαμβάνεται με την επεξεργασία δεδομένων από συστήματα Weigh-In-Motion (WIM).

Το εύρος των αξονικών φορτίων της πραγματικής κυκλοφορίας όπως ορίζεται από την μέθοδο MEPDG είναι ένας παράγοντας που χρησιμοποιείται ως δεδομένο εισόδου στο λογισμικό και εκφράζει τη κυκλοφοριακή ροή, που διέρχεται από το προς διαστασιολόγηση οδόστρωμα. Πρόκειται για ένα ιστόγραμμα ή μία κατανομή των αξονικών φορτίων για συγκεκριμένους τύπους αξόνων (μονός, διπλός, τριπλός και τετραπλός). Με άλλα λόγια, είναι ο αριθμός των αξόνων που πέρασαν εντός του καθορισμένου εύρους αξονικού φορτίου.

Στοιχείο υπολογισμού κατά την εφαρμογή της μεθόδου MEPDG είναι το κανονικοποιημένο ιστόγραμμα αξονικών φορτίων που προέρχεται από το εύρος των αξονικών φορτίων της πραγματικής κυκλοφορίας. Ως τέτοιο ορίζεται το κανονικοποιημένο ιστόγραμμα αξονικών φορτίων ενός άξονα συγκεκριμένου τύπου. Για τον προσδιορισμό του διαιρείται ο αριθμός των διελεύσεων αξόνων συγκεκριμένου τύπου και φορτίου, εντός μετρήσεων καθορισμένου εύρους τύπων και φορτίων, με τον συνολικό αριθμό των διελεύσεων αξόνων αυτού του τύπου. Στην συνέχεια το συνολικό άθροισμα όλων των στοιχειωδών τιμών στην κατανομή για έναν συγκεκριμένο τύπου άξονα ανάγεται σε εκατοστιαία σύνθεσή (Σύνολο = 100 %).

Στην μέθοδο MEPDG έχει ληφθεί υπόψη ότι λόγω έλλειψης οικονομικών πόρων ορισμένοι φορείς ενδέχεται να μην έχουν προβεί στις απαιτούμενες μετρήσεις για την συλλογή δεδομένων κυκλοφορίας για ακριβή προσδιορισμό επίπεδων κυκλοφορίας οχημάτων στην περιοχή αρμοδιότητάς τους. Επιπλέον, ορισμένοι φορείς ενδέχεται να έχουν συλλέξει δεδομένα κατανομής φορτίων από περιορισμένες περιοχές της αρμοδιότητάς τους. Για αυτές τις περιπτώσεις, ορίστηκαν οι προεπιλεγμένες τιμές από μια ανάλυση περίπου 200 WIM από περιοχές που περιλαμβάνονται στο πρόγραμμα και απλοποιούν σημαντικά τη χρήση της μεθόδου σχετικά με την κυκλοφορία οχημάτων. Να σημειωθεί ότι αυτές οι προεπιλεγμένες τιμές που εισάγονται στο λογισμικό της μεθόδου MEPDG και καθορίστηκαν από δεδομένα WIM, έχουν συλλεχθεί κυρίως από διακρατικούς και εθνικούς αυτοκινητόδρομους.

Εάν δεν είναι δυνατή η εγκατάσταση συσκευών WIM, προτείνονται από την μέθοδο MEPDG δυο πίνακες (Πίνακας 2.4 & 2.5) για το ελάχιστο μέγεθος που μπορεί να έχει το δείγμα σε μέρες ανά έτος ανάλογα με το σφάλμα και την αξιοπιστία που έχει επιλέξει ο μελετητής για το έργο του (AASHTO, 2008)

Πίνακας 2.4: Ελάχιστο μέγεθος δείγματος (αριθμός ημερών ανά έτος) για την εκτίμηση της πραγματικής κυκλοφορίας - Δεδομένα WIM

Standard Error (±%)	Level of Confidence or Significance, %				
	80	90	95	97.5	99
20	1	1	1	1	1
10	1	1	2	2	3
5	2	3	5	7	10
2	8	19	30	43	61
1	32	74	122	172	242

Πίνακας 2.5: Ελάχιστο μέγεθος δείγματος (αριθμός ημερών ανά έτος) για την εκτίμηση της πραγματικής κυκλοφορίας — Δεδομένα AVC

Standard Error (±%)	Level of Confidence or Significance, %				
	80	90	95	97.5	99
20	1	1	1	2	2
10	1	2	3	5	6
5	3	8	12	17	24
2	20	45	74	105	148
1	78	180	295	Note 1	Note 1

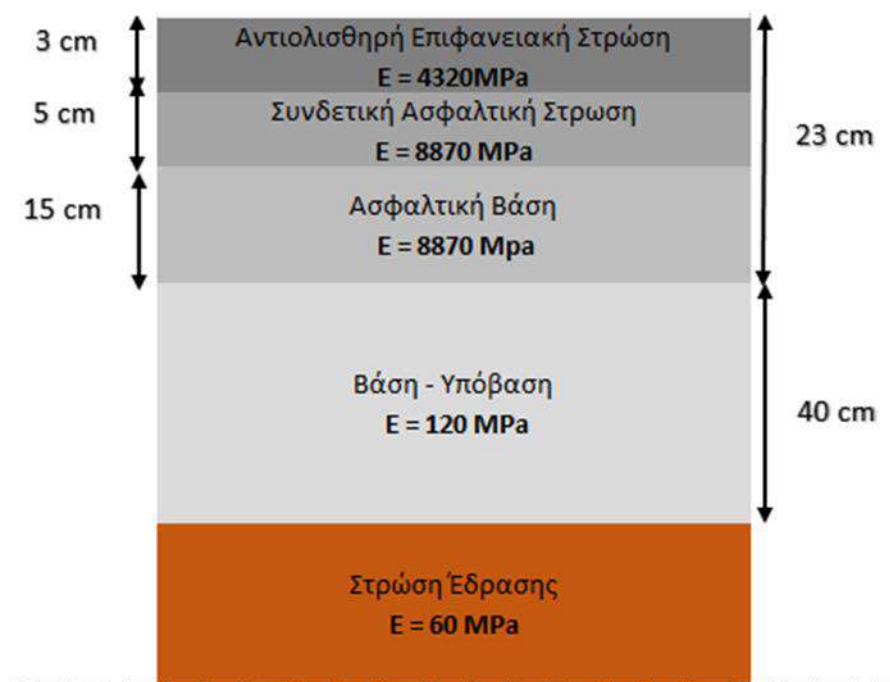
Όπως παρουσιάζεται στα ανωτέρω, ο πίνακας 2.4 είναι για δεδομένα από WIM και ο πίνακας 2.5 για δεδομένα από AVC (Automated Vehicle Classifier).



## 3 Στοιχεία Πειραματικής Ανάλυσης.

### 3.1 Πειραματική διατομή οδοστρώματος

Με σκοπό τη συγκριτική αξιολόγηση της πραγματικής και της ισοδύναμης διερχόμενης κυκλοφορίας και την διερεύνηση της επίδρασής τους στο οδόστρωμα, στη παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκε μία τυπική διατομή εύκαμπτου οδοστρώματος με συγκεκριμένα μηχανικά χαρακτηριστικά και πάχη, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 3.1.



Εικόνα 3.1: Πειραματική Διατομή Ευκάμπτου οδοστρώματος

Η ασφαλτική στρώση αποτελείται από τρεις επιμέρους στρώσεις:

- Την Αντιολισθηρή Επιφανειακή στρώση με πάχος 3 cm και μέτρο ελαστικότητας  $E=4320\text{MPa}$
- Την Συνδετική Ασφαλτική στρώση με πάχος με 5 cm και μέτρο ελαστικότητας  $E=8870\text{MPa}$  και
- Την Ασφαλτική Βάση με πάχος 15 cm και μέτρο ελαστικότητας  $E=8870\text{MPa}$

Σχετικά με τις υποκείμενες στρώσεις, η δεδομένη διατομή διαθέτει μια ενοποιημένη στρώση βάσης και υπόβασης με πάχος 40 cm και μέτρο ελαστικότητας  $E=120 \text{ MPa}$ , ενώ η στρώση έδρασης έχει απεριόριστο πάχος και μέτρο ελαστικότητας  $E=60\text{MPa}$ .

### 3.2 Πρωτογενή δεδομένα κυκλοφορίας

Η κυκλοφορία που λήφθηκε υπόψη για την συγκριτική ανάλυση της πραγματικής και της ισοδύναμης κυκλοφορίας βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα κυκλοφοριακής μελέτης. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την ανάλυση των πρωτογενών δεδομένων της κυκλοφορίας είναι η εξής:

- Αρχικά, δίνεται η Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ) των βαρέων οχημάτων για δύο κατευθύνσεις οδού, εκφρασμένη σε διερχόμενους άξονες, για κάθε έτος ξεχωριστά.
- Έπειτα, προσδιορίζεται συνολικά η Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία (ΕΜΗΚ) για τη περίοδο σχεδιασμού των 20 ετών η οποία υπολογίζεται ως:

$$EMHK = \sum_{i=1}^{20} EMHK_i \quad (3.1)$$

Όπου:

EMHK<sub>i</sub> : η ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία για κάθε έτος

i : 1-20 έτη

Με βάση τη παραπάνω σχέση η συνολική Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία ισούται με 107,750 διερχόμενους άξονες

- Στη συνέχεια, πρέπει να οριστεί η διερχόμενη κυκλοφορία για τη μία κατεύθυνση, η οποία υπολογίζεται ως το μισό της ετήσιας μέσης ημερήσιας κυκλοφορίας από τη σχέση:

$$EMHK(one\ way) = \sum_{i=1}^{20} (0.5 * EMHK_i) \quad (3.2)$$

Όπου:

EMHK(one way) : η συνολική ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία για τη διάρκεια των 20 ετών

EMHK<sub>i</sub> : η ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία για κάθε έτος

i : 1-20 έτη

Επομένως, με βάση την εξίσωση 3.2 η συνολική μέση ημερήσια κυκλοφορία της μιας κατεύθυνσης ισούται με 53,875 διερχόμενους άξονες για τη προαναφερθείσα περίοδο σχεδιασμού.

- Το οδικό τμήμα που μελετάται διαθέτει δύο λωρίδες ανά κατεύθυνση. Γίνεται η θεώρηση ότι από τη δεξιά λωρίδα διέρχεται το 100% των βαρέων οχημάτων.
- Τέλος, είναι σημαντικό να προσδιορισθεί η Ετήσια Κυκλοφορία για κάθε έτος που διέρχεται από τη μια κατεύθυνση του οδοστρώματος, η οποία υπολογίζεται ως:

$$EK_i = EMHK(one\ way)_i * 365 \quad (3.3)$$

Όπου:

EK<sub>i</sub> : η Ετήσια Κυκλοφορία για κάθε έτος

ΕΜΗΚ(one way)<sub>i</sub> : η Ετήσια Μέση Ημερήσια Κυκλοφορία της μίας κατεύθυνσης για κάθε έτος

i : 1-20 έτη

Η συνολική Ετήσια Κυκλοφορία υπολογίζεται ως:

$$EK = \sum_{i=1}^{20} EK_i \quad (3.4)$$

Όπου:

ΕΜΗΚ<sub>i</sub> : η Ετήσια Κυκλοφορία για κάθε έτος

ΕΜΗΚ: η Ετήσια Κυκλοφορία για τη περίοδο σχεδιασμού των 20 ετών

i : 1-20 έτη

Σύμφωνα με τη σχέση 3.4 η συνολική Ετήσια Κυκλοφορία (EK) ισούται με 19,664,451 διερχόμενους άξονες.

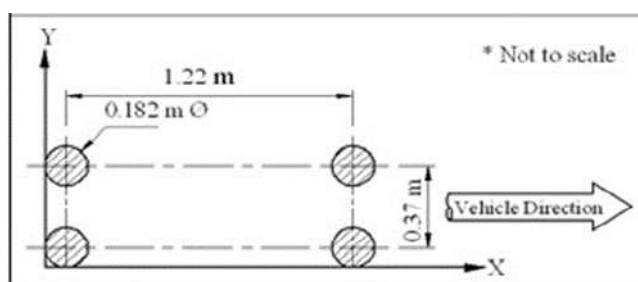
### 3.3 Διάταξη αξονικών φορτίων

Η Ετήσια Κυκλοφορία, που προσδιορίστηκε παραπάνω, αφορά στο σύνολο των βαρέων οχημάτων χωρίς να υπάρχει περαιτέρω πληροφορία για τη σύνθεση της κυκλοφορίας ως προς τον αριθμό των αξόνων και τη διάταξη των τροχών, καθώς και διαφορετικών αξονικών φορτίων. Στη παρούσα διπλωματική εργασία για τη σύνθεση της πραγματικής κυκλοφορίας χρησιμοποιήθηκαν 5 διαφορετικές διατάξεις φορτίσεων.

Για τον προσδιορισμό των διατάξεων αυτών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό 3D-MOVE Analysis, το οποίο είναι ένα λογισμικό ανάλυσης που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο της Νεβάδα (Siddhartan et al, 2000) και προσεγγίζει πολύ καλά το λογισμικό της αναλυτικής μεθόδου MEPDG, το οποίο γενικά είναι διαθέσιμο με άδεια χρήσης. Στο συγκεκριμένο λογισμικό δίνονται ορισμένες τυπικές διατάξεις αξόνων και τροχών προς χρήση στην ανάλυση της κυκλοφορίας και της φθοράς του δεδομένου οδοστρώματος, αλλά υπάρχει και η δυνατότητα δημιουργίας διατάξεων φόρτισης ανάλογα με τη προτίμηση του μελετητή και τον σκοπό της ανάλυσης καθώς και τις συνθήκες που επικρατούν στη περιοχή που πραγματοποιείται η ανάλυση.

Επομένως, για το προσδιορισμό της πραγματικής κυκλοφορίας ελήφθησαν υπόψη οι εξής διατάξεις φορτίσεων που προτείνονται από το λογισμικό:

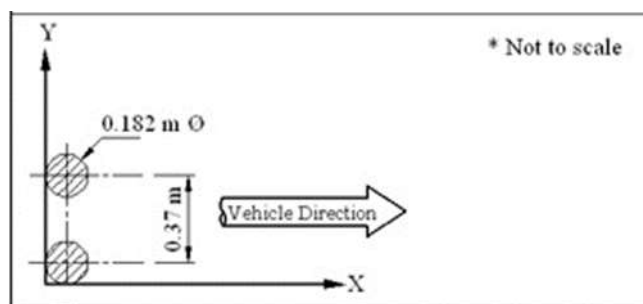
- Load Case 1: Διπλός Άξονας με διπλούς τροχούς κυκλικού σχήματος και ομοιόμορφη πίεση.



Εικόνα 3.2: Διάταξη Φόρτισης 1, μισός άξονας

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.2 είναι μια διαμόρφωση διπλού άξονα με διπλά ελαστικά, με οκτώ κυκλικές περιοχές επαφής. Η πίεση επαφής θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφη στην περιοχή επαφής και ίση με  $p = 862 \text{ kPa}$  (125 psi). Το αξονικό φορτίο είναι 180kN και το φορτίο του μισού άξονα είναι 90 kN, δηλαδή 22,5 kN ανά ελαστικό. Η ακτίνα του τροχού ισούται με  $R = 0.091 \text{ m}$ , η απόσταση μεταξύ των αξόνων από το ένα κέντρο του τροχού μέχρι το άλλο είναι 1.22 m, ενώ η απόσταση μεταξύ των διπλών τροχών ισούται με 0.37 m.

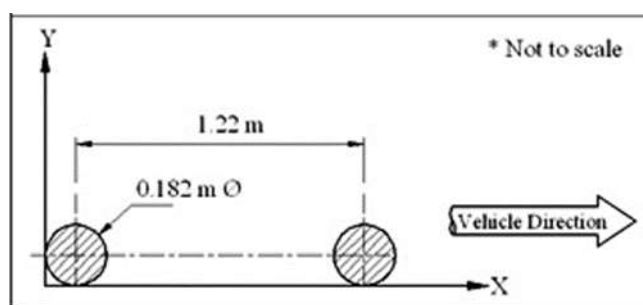
- Load Case 2: Μονός Άξονας με διπλούς τροχούς και ομοιόμορφη πίεση.



Εικόνα 3.3: Διάταξη Φόρτισης 2, μισός άξονας

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3 πρόκειται για μια διαμόρφωση μονού άξονα με διπλά ελαστικά, με τέσσερις κυκλικές περιοχές επαφής. Η πίεση επαφής θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφη στην περιοχή επαφής και ίση με  $p = 862 \text{ kPa}$ . Το αξονικό φορτίο είναι 90 kN και το φορτίο του μισού άξονα είναι 45 kN, δηλαδή 22,5 kN ανά ελαστικό. Η ακτίνα του τροχού ισούται με  $R = 0.091 \text{ m}$ , ενώ η απόσταση μεταξύ των διπλών τροχών ισούται με 0.37 m.

- Load Case 7: Διπλός Άξονας με μονά ελαστικά (super single tires).



Εικόνα 3.4: Διάταξη Φόρτισης 7, μισός άξονας

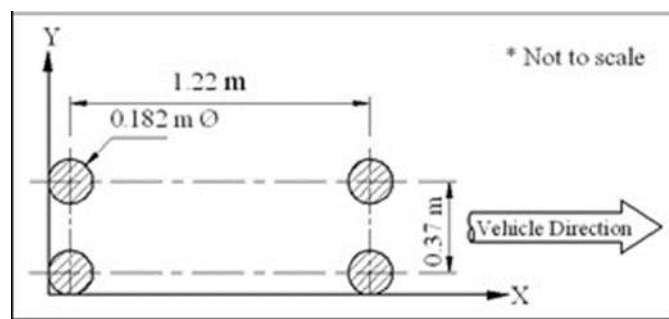
Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.4 πρόκειται για μια διαμόρφωση διπλού άξονα με μονά ελαστικά, με τέσσερις κυκλικές περιοχές επαφής. Η πίεση επαφής θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφη στην περιοχή επαφής και ίση με  $p = 862 \text{ kPa}$ . Το αξονικό φορτίο είναι 180 kN και το φορτίο του μισού άξονα είναι 90 kN, δηλαδή 45 kN ανά ελαστικό. Η ακτίνα του τροχού ισούται με  $R = 0.182 \text{ m}$ , ενώ η απόσταση μεταξύ των αξόνων από το ένα κέντρο του τροχού μέχρι το άλλο είναι 1.22 m.

Επιπλέον, σχετικά με τις διατάξεις 1 και 7, το αξονικό τους φορτίο λαμβάνεται ίσο με 180 kN, ενώ το μέγιστο επιτρεπόμενο αξονικό φορτίο στην Ελλάδα εμφανίζεται να είναι 130 kN. Για το λόγο αυτό, προέκυψε η ανάγκη για τη δημιουργία δυο διαφορετικών διατάξεων

φορτίσεων από αυτές που προτείνονται από το λογισμικό, με σκοπό την καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής κυκλοφορίας στην Ελλάδα.

Έτσι οι διατάξεις φορτίσεων που δημιουργήθηκαν είναι οι εξής:

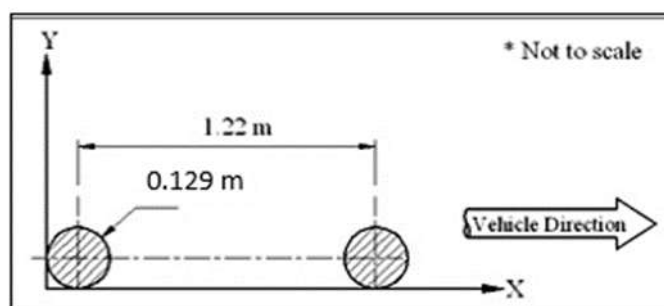
- Load Case 1-1: Διπλός Άξονας με διπλούς τροχούς κυκλικού σχήματος και ομοιόμορφη πίεση.



Εικόνα 3.5: Διάταξη Φόρτισης 1-1, μισός άξονας

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.5 πρόκειται για μια διαμόρφωση διπλού άξονα με διπλά ελαστικά, με οκτώ κυκλικές περιοχές επαφής. Η πίεση επαφής θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφη στην περιοχή επαφής και ίση με  $p = 625 \text{ kPa}$ . Το αξονικό φορτίο είναι  $130 \text{ kN}$  και το φορτίο του μισού άξονα είναι  $65 \text{ kN}$ , δηλαδή  $16.25 \text{ kN}$  ανά ελαστικό. Η ακτίνα του τροχού ισούται με  $R = 0.091 \text{ m}$ , η απόσταση μεταξύ των αξόνων από το ένα κέντρο του τροχού μέχρι το άλλο είναι  $1.22 \text{ m}$ , ενώ η απόσταση μεταξύ των διπλών τροχών ισούται με  $0.37 \text{ m}$ .

- Load Case 7-7: Διπλός Άξονας με μονά ελαστικά (super single tires).



Εικόνα 3.6: Διάταξη Φόρτισης 7-7, μισός άξονας

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.6 πρόκειται για μια διαμόρφωση διπλού άξονα με μονά ελαστικά, με τέσσερις κυκλικές περιοχές επαφής. Η πίεση επαφής θεωρείται ότι είναι ομοιόμορφη στην περιοχή επαφής και ίση με  $p = 622 \text{ kPa}$ . Το αξονικό φορτίο είναι  $130 \text{ kN}$  και το φορτίο του μισού άξονα είναι  $65 \text{ kN}$ , δηλαδή  $32.5 \text{ kN}$  ανά ελαστικό. Η ακτίνα του τροχού ισούται με  $R = 0.129 \text{ m}$ , ενώ η απόσταση μεταξύ των αξόνων από το ένα κέντρο του τροχού μέχρι το άλλο είναι  $1.22 \text{ m}$ .

Επομένως, για την όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση της πραγματικής κυκλοφορίας που διέρχεται από το οδόστρωμα που μελετάται, στη παρούσα διπλωματική εργασία, θεωρήθηκε ότι αυτή περιλαμβάνει συγκεκριμένα ποσοστά των διατάξεων φορτίσεων που έχουν ήδη αναφερθεί παραπάνω. Πιο αναλυτικά:

- Η Load Case 1 σε ποσοστό 2%, με 393,289 διερχόμενους άξονες
- Η Load Case 2 σε ποσοστό 36%, με 7,079,202 διερχόμενους άξονες
- Η Load Case 7 σε ποσοστό 2%, με 393,289 διερχόμενους άξονες
- Η Load Case 1-1 σε ποσοστό 30%, με 5,899,335 διερχόμενους άξονες
- Η Load Case 7-7 σε ποσοστό 30%, με 5,899,335 διερχόμενους άξονες

### 3.4 Υπολογισμός Διελεύσεων Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων

Η πραγματική κυκλοφορία όπως, ορίστηκε στο κεφάλαιο 3.3, μετατρέπεται σε ισοδύναμη μέσω των Ισοδύναμων Τυπικών Αξόνων. Η διαδικασία που ακολουθείται με σκοπό το προσδιορισμό της ισοδύναμης κυκλοφορίας περιλαμβάνει τα εξής βήματα:

1. Προσδιορισμός αξονικού φορτίου της κάθε διάταξης και Ισοδύναμου Τυπικού αξονικού φορτίου, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της κυκλοφορίας
2. Υπολογισμός Συντελεστή Ισοδυναμίας (ΣΙ), ο οποίος είναι διαφορετικός για κάθε μέθοδο μετατροπής αλλά και για κάθε αξονικό φορτίο
3. Οι Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες (ΙΤΑ) για κάθε διάταξη φόρτισης προκύπτουν από τη σχέση:

$$(ITA)_i = (\Sigma I)_i * (\Delta \text{ιελεύσεις})_i \quad (3.5)$$

Όπου:

$(ITA)_i$  : Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες για τη διάταξη αξόνων  $i$

$(\Sigma I)_i$  : Συντελεστής Ισοδυναμίας για τη διάταξη αξόνων  $i$

$(\Delta \text{ιελεύσεις})_i$  : Αξονικές Διελεύσεις για τη διάταξη αξόνων  $i$

4. Οι Συνολικοί Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες για το σύνολο της πραγματικής κυκλοφορίας προσδιορίζονται από τη σχέση:

$$ITA = \Sigma (ITA)_i \quad (3.6)$$

Όπου:

$(ITA)_i$  : Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες για τη διάταξη αξόνων  $i$

ITA : Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες για το σύνολο της πραγματικής κυκλοφορίας.

Με σκοπό να προκύψει η βέλτιστη ισοδύναμη κυκλοφορία που προσεγγίζει ακριβέστερα την πραγματική κυκλοφορία, στη παρούσα διπλωματική εργασία, εξετάζονται 5 διαφορετικές μέθοδοι μετατροπής πραγματικής κυκλοφορίας σε ισοδύναμη.

Οι μέθοδοι αυτές είναι οι εξής:

➤ Ο Κανόνας της 4<sup>ης</sup> Δύναμης

Ακολουθώντας τα παραπάνω βήματα και σύμφωνα με τη σχέση (2.1) προκύπτει η ισοδύναμη κυκλοφορία όπως παρουσιάζεται στο *Πίνακα 3.1*.

➤ Η Μέθοδος COST 334

Για τη μέθοδο αυτή θεωρούνται δυο περιπτώσεις υπολογισμού του Συντελεστή Ισοδυναμίας, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψιν διαφορετικές μέθοδοι καταπόνησης του οδοστρώματος. Άρα, από τη σχέση (2.2) :

○ Για  $n=2$  γίνεται : 
$$\Sigma I = (P_i/P_t)^2 \quad (3.7)$$

Επομένως, για τη μέθοδο COST 334 με εκθέτη 2 ακολουθούνται τα βήματα όπως αναλύθηκαν παραπάνω και σε συνδυασμό με τη σχέση (3.7) προσδιορίζεται η ισοδύναμη κυκλοφορία όπως εμφανίζεται στο Πίνακα 3.2.

○ Για  $n=5$  γίνεται: 
$$\Sigma I = (P_i/P_t)^5 \quad (3.8)$$

Έτσι, για τη μέθοδο COST 334 με εκθέτη 5 πραγματοποιούνται τα βήματα που έχουν ήδη αναφερθεί και σε συνδυασμό με τη σχέση (3.8) προσδιορίζεται η ισοδύναμη κυκλοφορία όπως εμφανίζεται στο Πίνακα 3.3.

➤ Η Μέθοδος του Γενικευμένου Συντελεστή Ισοδυναμίας (GAF)

Σύμφωνα με τη διαδικασία που αναφέρθηκε και από τη σχέση (2.3) μετατρέπεται η πραγματική κυκλοφορία σε ισοδύναμη σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Πίνακα 3.4.

➤ Η Γαλλική Μέθοδος

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή λαμβάνει διαφορετικό Ισοδύναμο Τυπικό Αξονικό Φορτίο από τις άλλες. Άρα, ακολουθώντας τη παραπάνω διαδικασία και σύμφωνα με τη σχέση (2.5) προκύπτουν τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στο Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.1: Μετατροπή πραγματικής σε ισοδύναμη κυκλοφορία με το Κανόνα της 4<sup>ης</sup> Δύναμης

<b>Κανόνας 4ης Δύναμης</b>				
P <sub>i</sub> = Αξονικό Φορτίο, P <sub>t</sub> = 80kN = Ισοδύναμο Τυπικό Αξονικό Φορτίο				
Τύπος Υπολογισμού Συντελεστή Ισοδυναμίας (ΣΙ) = (P <sub>i</sub> /P <sub>t</sub> ) <sup>4</sup>				
<u>Περιπτώσεις</u>	<u>P<sub>i</sub> (kN)</u>	<u>ΣΙ</u>	<u>Σύνολο Διελεύσεων ανά Load Case</u>	<u>Ισοδύναμοι Τυπικοί Αξονες (ITA)</u>
<b><u>Load Case 1</u></b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	180	25.629	393,289	10,079,567.46
<b><u>Load Case 2</u></b> Μονός Άξονας, δίδυμοι τροχοί	90	1.602	7,079,202	11,339,513.39
<b><u>Load case 7</u></b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	180	25.629	393,289	10,079,567.46
<b><u>Load Case 1-1</u></b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	130	6.973	5,899,335	41,135,475.33
<b><u>Load Case 7-7</u></b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	130	6.973	5,899,335	41,135,475.33
<b><u>ΣΥΝΟΛΟ</u></b>				<b>113,769,598.96</b>

Πίνακας 3.2: Μετατροπή πραγματικής σε ισοδύναμη κυκλοφορία με τη μέθοδο COST 334 – n=2

<b>Μέθοδος COST 334</b>				
Pi=Φορτίο, Pt = 80kN				
Τύπος Υπολογισμού Συντελεστή Ισοδυναμίας (ΣΙ)= $(P_i/P_t)^2$				
<u>Περιπτώσεις</u>	<u>P<sub>i</sub> (kN)</u>	<u>ΣΙ</u>	<u>Σύνολο Διελεύσεων ανά Load Case</u>	<u>Ισοδύναμοι Τυπικοί Αξονες (ITA)</u>
<b>Load Case 1</b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	180	5.063	393,289	1,991,025.67
<b>Load Case 2</b> Μονός Άξονας, δίδυμοι τροχοί	90	1.266	7,079,202	8,959,615.52
<b>Load case 7</b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	180	5.063	393,289	1,991,025.67
<b>Load Case 1-1</b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	130	2.641	5,899,335	15,577,931.48
<b>Load Case 7-7</b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	130	2.641	5,899,335	15,577,931.48
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>				44,097,529.83

Πίνακας 3.3: Μετατροπή πραγματικής σε ισοδύναμη κυκλοφορία με τη μέθοδο COST 334 – n=5

<b>Μέθοδος COST 334</b>				
Pi=Φορτίο, Pt = 80kN				
Τύπος Υπολογισμού Συντελεστή Ισοδυναμίας (ΣΙ)= $(P_i/P_t)^5$				
<u>Περιπτώσεις</u>	<u>P<sub>i</sub> (kN)</u>	<u>ΣΙ</u>	<u>Σύνολο Διελεύσεων ανά Load Case</u>	<u>Ισοδύναμοι Τυπικοί Αξονες (ITA)</u>
<b>Load Case 1</b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	180	57.665	393,289	22,679,026.78
<b>Load Case 2</b> Μονός Άξονας, δίδυμοι τροχοί	90	1.802	7,079,202	12,756,952.56
<b>Load case 7</b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	180	57.665	393,289	22,679,026.78
<b>Load Case 1-1</b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	130	11.331	5,899,335	66,845,147.40
<b>Load Case 7-7</b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	130	11.331	5,899,335	66,845,147.40
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>				191,805,300.94



Πίνακας 3.4: Μετατροπή πραγματικής σε ισοδύναμη κυκλοφορία με τη μέθοδο GAF

<b>General Axle Load Equivalency Factor (GAF)</b>				
$GAF = (0,01169 \times L + 0,064) \times \left(4 + \frac{8,9}{L}\right)$ Φορτίο = L				
Περιπτώσεις	L (kN)	GAF	Σύνολο Διελεύσεων ανά Load Case	Σύνολο Διελεύσεων * GAF (GESALs)
<b>Load Case 1</b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	180	8.780	393,289	3,453,079.75
<b>Load Case 2</b> Μονός Άξονας, δίδυμοι τροχοί	90	4.575	7,079,202	32,385,721.91
<b>Load case 7</b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	180	8.780	393,289	3,453,079.75
<b>Load Case 1-1</b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	130	6.443	5,899,335	38,010,728.23
<b>Load Case 7-7</b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	130	6.443	5,899,335	38,010,728.23
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>				115,313,337.87

Πίνακας 3.5: Μετατροπή πραγματικής σε ισοδύναμη κυκλοφορία με τη Γαλλική μέθοδο

<b>Γαλλική Μέθοδος</b>				
Pi=Φορτίο, Pt = 130kN				
Τύπος Υπολογισμού Συντελεστή Ισοδυναμίας (ΣΙ)= 1.1*(Pi/Pt) <sup>5</sup>				
Περιπτώσεις	Pi (kN)	ΣΙ	Σύνολο Διελεύσεων ανά Load Case	Ισοδύναμοι Τυπικοί Άξονες (ITA) ΣΙ * Σύνολο Διελεύσεων
<b>Load Case 1</b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	180	63.432	393,289	24,946,929.46
<b>Load Case 2</b> Μονός Άξονας, δίδυμοι τροχοί	90	1.982	7,079,202	14,032,647.82
<b>Load case 7</b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	180	63.432	393,289	24,946,929.46
<b>Load Case 1-1</b> Διπλός άξονας, δίδυμοι τροχοί	130	1.1	5,899,335	6,489,268.50
<b>Load Case 7-7</b> Διπλός άξονας,μονοί τροχοί	130	1.1	5,899,335	6,489,268.50
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>				76,905,043.74

### 3.5 Συμπεριφορά οδοστρώματος

Η συγκριτική αξιολόγηση της πραγματικής και της ισοδύναμης κυκλοφορίας, στη παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται μέσω των αποτελεσμάτων που πηγάζουν από τη συμπεριφορά του οδοστρώματος υπό την έννοια των παραμενοσών παραμορφώσεων, σύμφωνα με τις βασικές αρχές της αναλυτικής μεθόδου MEPDG.

Πιο αναλυτικά, η παραμένουσα παραμόρφωση, ή αυλάκωση (Rutting) όπως ορίζεται από τη μέθοδο MEPDG, παρουσιάζεται στο οδόστρωμα ως μια διαμήκης επιφανειακή κοιλότητα στη διαδρομή του τροχού που προκύπτει από πλαστική ή μόνιμη παραμόρφωση σε κάθε στρώση του οδοστρώματος. Η μονάδα μέτρησης της αυλάκωσης (Rutting) που υπολογίζεται από την μέθοδο MEPDG είναι σε ίντσες (ή χιλιοστά) και αντιπροσωπεύει το μέγιστο μέσο βάθος αυλάκωσης μεταξύ των δύο διαδρομών των τροχών. Η μέθοδος MEPDG υπολογίζει επίσης τα βάθη της αυλάκωσης μέσα στην ασφαλτική στρώση, στη στρώση βάσης και στη στρώση έδρασης (AASHTO, 2008).

Για όλα τα ασφαλτικά μείγματα και για μείγματα ασύνδετων υλικών, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις υπολογισμού της παραμένουσας παραμόρφωσης υπό την έννοια της αυλάκωσης, οι οποίες βασίζονται στις βασικές αρχές της μεθόδου MEPDG.

Εξίσωση για ασφαλτικά μείγματα:

$$\Delta_{p(HMA)} = \varepsilon_{p(HMA)} \times h_{HMA} = \beta_{1r} k_z \varepsilon_{r(HMA)} \times 10^{k_{1r}} n^{k_{2r}\beta_{2r}} T^{k_{3r}\beta_{3r}} \quad (3.9)$$

Όπου:

$\Delta_{p(HMA)}$  : Συσσωρευμένη παραμένουσα παραμόρφωση (αυλάκωση) στην ασφαλτική στρώση.

$\varepsilon_{p(HMA)}$  : Συσσωρευμένη μόνιμη ή πλαστική αξονική παραμόρφωση στην ασφαλτική στρώση.

$\varepsilon_{r(HMA)}$  : Ελαστική παραμόρφωση υπολογιζόμενη στο μέσον της ασφαλτικής στρώσης.

$h_{HMA}$  : Πάχος της ασφαλτικής στρώσης.

$n$  : Πλήθος διελεύσεων αξονικού φορτίου.

$T$  : Θερμοκρασία ασφάλτου σε °F.

$k_z$  : Συντελεστής περιορισμού βάθους

$k_{1r,2r,3r}$  : Διεθνείς παράμετροι προσομοίωσης πεδίου,  $k_{1r} = -3,35412$ ,  $k_{2r} = 1.5606$  και  $k_{3r} = 0.4791$

$\beta_{1r}, \beta_{2r}, \beta_{3r}$  : Σταθερές για τοπική ή μεικτή βαθμονόμηση πεδίου. Για την διεθνή βαθμονόμηση ισχύει  $\beta_{1r} = \beta_{2r} = \beta_{3r} = 1.0$

$$k_z = (C1 + C2D)0.328196^D \quad (3.10)$$

$$C_1 = -0.1039(H_{HMA})^2 + 2.4868H_{HMA} - 17.342 \quad (3.11)$$

$$C_{12} = 0.0172(H_{HMA})^2 + 1.7331H_{HMA} + 27.428 \quad (3.12)$$

$D$  : Βάθος κάτω από την επιφάνεια και

$H_{HMA}$  : Συνολικό πάχος ασφάλτου

Εξίσωση για τα ασύνδετα υλικά (στρώση βάσης και στρώση έδρασης):

$$\Delta_{p(soil)} = \beta_{s1} k_{s1} \varepsilon_v h_{soil} \left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_r} \right) e^{\left( \frac{\rho}{n} \right)^\beta} \quad (3.13)$$

Όπου:

$\Delta_{p(soil)}$  : παραμένουσα παραμόρφωση (αυλάκωση) για την στρώση βάσης και έδρασης

$n$  : Πλήθος διελεύσεων αξονικού φορτίου.

$\varepsilon_0$  : Μόνιμη παραμόρφωση από επαναλαμβανόμενες δοκιμές σε τομή που έχει προσδιορισθεί στο εργαστήριο

$\varepsilon_r$  : Ελαστική παραμόρφωση που έχει προέλθει από εργαστηριακές δοκιμές για το προσδιορισμό των  $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon$  και  $\rho$ .

$\varepsilon_v$  : Μέση κατακόρυφη ελαστική παραμόρφωση της στρώσης ασύνδετου υλικού.

$h_{soil}$  : Πάχος στρώσης ασύνδετου υλικού

$k_{s1}$  : Διεθνείς συντελεστές βαθμονόμησης για κοκκώδη υλικά  $k_{s1}=1.673$  (στρώση έδρασης) και για λεπτόκοκκα υλικά  $k_{s1}=1.35$  (στρώση βάσης)

$\varepsilon_{s1}$  : Τοπική σταθερά βαθμονόμησης για την αυλάκωση στις στρώσεις με ασύνδετα υλικά, διεθνώς έχει οριστεί στο 1.0

$$\log \beta = -0,61119 - 0,017638(W_c) \quad (3.14)$$

$$\rho = 10^9 \left[ \frac{C_o}{(1-(10^9)^\beta)} \right]^\beta \quad (3.15)$$

$$C_o = \text{Ln} \left( \frac{\alpha_{1M_r} b_1}{\alpha_{9M_r} b_9} \right) = 0.0075 \quad (3.16)$$

$W_c$  : Ποσοστό νερού, %,

$M_r$  : Ενεργό μέτρο ελαστικότητας στρώσης έδρασης, psi,

$a_{1,9}$  : Σταθερές Παλινδρόμησης,  $a_1=0.15$  and  $a_9= 20.0$  και

$b_{1,9}$  : Σταθερές Παλινδρόμησης,  $b_1=0.0$  and  $b_9= 0.0$

Οι σχέσεις που αναλύθηκαν παραπάνω χρησιμοποιούνται στη παρούσα διπλωματική για το προσδιορισμό των παραμενουσών παραμορφώσεων που δημιουργούνται στις επιμέρους στρώσεις της διατομής του οδοστρώματος λόγω της πραγματικής κυκλοφορίας αλλά και λόγω της θεώρησης της ως ισοδύναμη. Για την επίτευξη της ανάλυσης αυτής χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό 3D-MOVE Analysis, το οποίο βασίζεται στις γενικές αρχές της αναλυτικής μεθόδου MEPDG, σύμφωνα με τις οποίες, οι επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος θεωρούνται ως συνεχές μέσο και αξιοποιείται η τεχνική μετασχηματισμού του Fourier (Siddhartan et al, 2000).

Οι παράμετροι σχεδιασμού που απαιτείται να προσδιοριστούν είναι οι εξής:

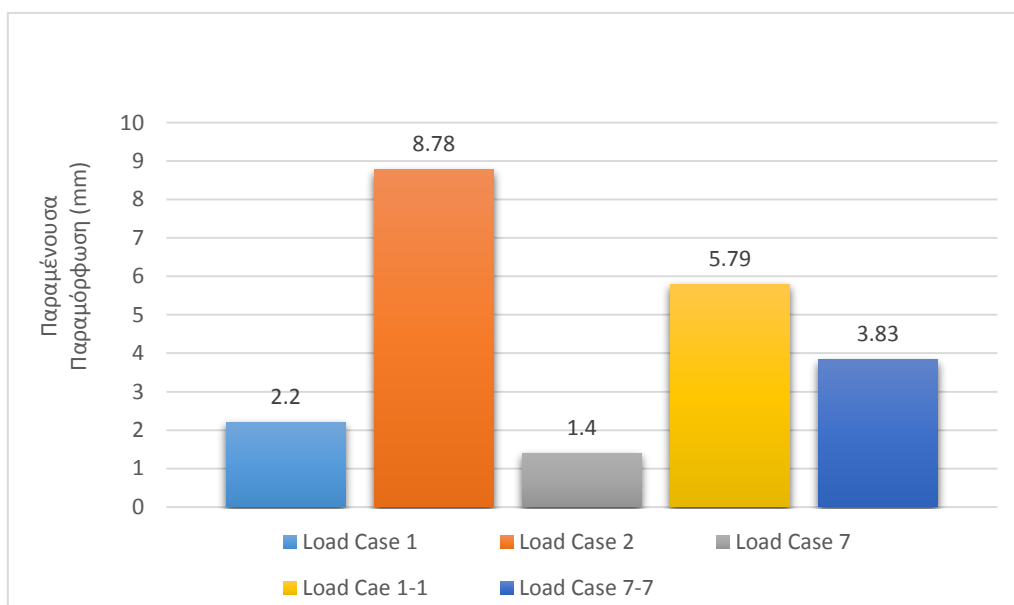
1. Η διαμόρφωση του άξονα, η οποία είτε επιλέγεται από αυτές που προτείνονται είτε δημιουργείται κάποια νέα. Στη παρούσα διπλωματική εργασία έχουν οριστεί παραπάνω οι διατάξεις που έχουν ληφθεί υπόψιν στην ανάλυση.
2. Η κυκλοφορία, στην οποία περιλαμβάνεται η ΕΜΗΚ της μίας κατεύθυνσης της οδού που μελετάται, το ποσοστό των βαρέων οχημάτων στη λωρίδα κυκλοφορίας 100%, η περίοδος σχεδιασμού 20 χρόνια και η γραμμική αύξηση της κυκλοφορίας κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού 1%.
3. Η δομή του οδοστρώματος, η οποία περιλαμβάνει τα πάχη των υποκείμενων στρώσεων σε μέτρα (m) καθώς και τον τύπο της κάθε στρώσης (ασφαλτική, βάση, έδρασης)
4. Τα μηχανικά χαρακτηριστικά της κάθε στρώσης, όπου εισάγεται το μέτρο ελαστικότητας της κάθε στρώσης σε kPa, ο λόγος Poisson  $\nu=0.35$  σταθερός για κάθε στρώση, η θερμοκρασία του οδοστρώματος  $T = 18^{\circ}\text{C}$ , ενώ για τις στρώσεις βάσης και έδρασης ορίζεται και το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα στα 10 m από την επιφάνεια του οδοστρώματος και το βάθος βραχώδους εδάφους στα 20 m.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν για την παραμένουσα παραμόρφωση. Πιο αναλυτικά, για τη δεδομένη διατομή του οδοστρώματος και για τις πραγματικές και τις ισοδύναμες διελεύσεις για κάθε διάταξη άξονα, όπως αυτές προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, υπολογίζεται η παραμένουσα παραμόρφωση, σύμφωνα με τη διαδικασία αυτή που αναφέρθηκε παραπάνω για την ασφαλτική στρώση, τη στρώση βάσης και τη στρώση έδρασης.

## 4 Ανάλυση δεδομένων

### 4.1 Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης με θεώρηση πραγματικής κυκλοφορίας

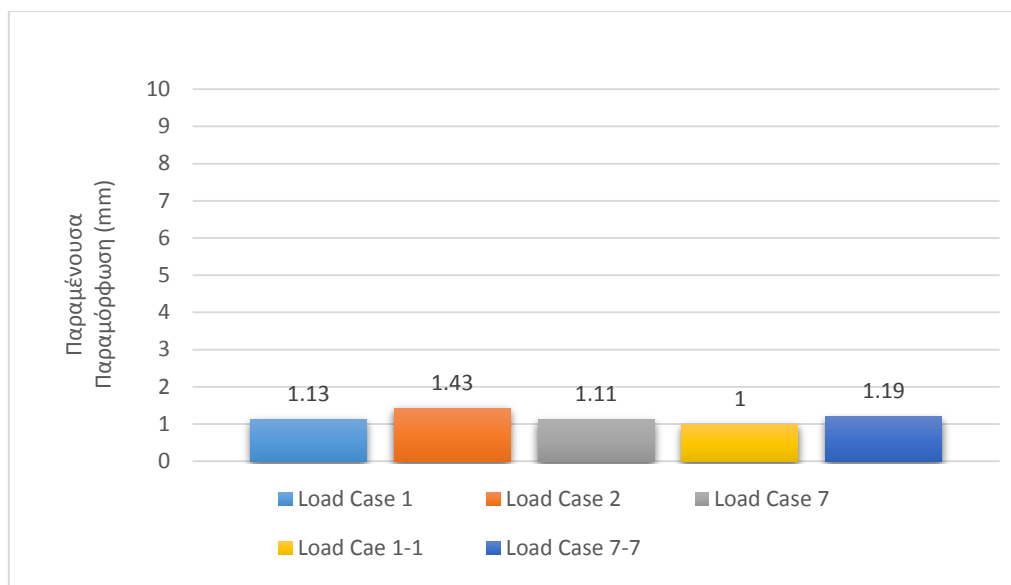
Στην εικόνα 4.1 εμφανίζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην ασφαλτική στρώση, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας.



Εικόνα 4.1: Παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικής στρώσης από την πραγματική κυκλοφορία

Παρατηρείται πως για την ασφαλτική στρώση, η παραμένουσα παραμόρφωση από τη Load Case 2 προκύπτει αρκετά μεγαλύτερη συγκριτικά με τις υπόλοιπες διατάξεις αξόνων που περιλαμβάνονται στη πραγματική κυκλοφορία. Αυτό οφείλεται στο μεγαλύτερο ποσοστό συμμετοχής της στην θεώρηση της κυκλοφορίας. Στην συγκεκριμένη περίπτωση μπορούν να ομαδοποιηθούν και να συγκριθούν οι διατάξεις με ίδιο αξονικό φορτίο και το ίδιο ποσοστό συμμετοχής στη κυκλοφορία. Αυτές είναι η Load Case 1 με τη Load Case 7 και η Load Case 1-1 με τη Load Case 7-7. Επομένως, όπως φαίνεται και την εικόνα 4.1, η Load Case 1 δημιουργεί μεγαλύτερη παραμένουσα παραμόρφωση στην ασφαλτική στρώση από τη Load Case 7. Επίσης, η παραμένουσα παραμόρφωση της Load Case 1-1 είναι μεγαλύτερη από αυτή της Load Case 7-7.

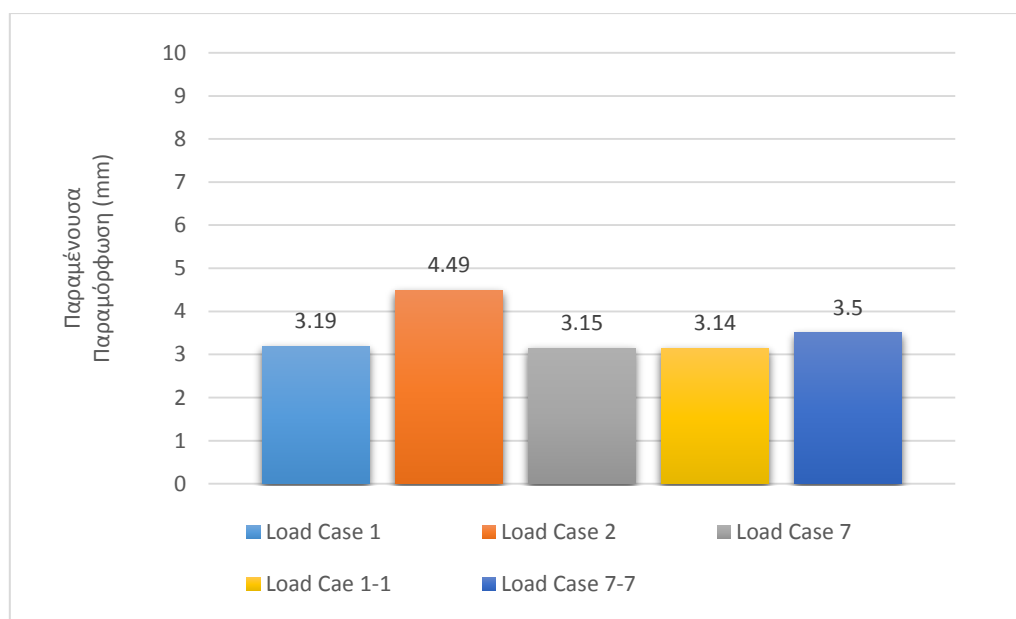
Στην εικόνα 4.2 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση βάσης, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας.



Εικόνα 4.2: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης βάσης από την πραγματική κυκλοφορία

Όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2, η παραμένουσα παραμόρφωση της στρώσης βάσης προκύπτει σχεδόν ίδια για τις διαφορετικές διατάξεις αξόνων που περιλαμβάνονται στην πραγματική κυκλοφορία, με μικρή διαφορά μεταξύ τους.

Στην εικόνα 4.3 εμφανίζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση έδρασης, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας.



Εικόνα 4.3: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης από την πραγματική κυκλοφορία

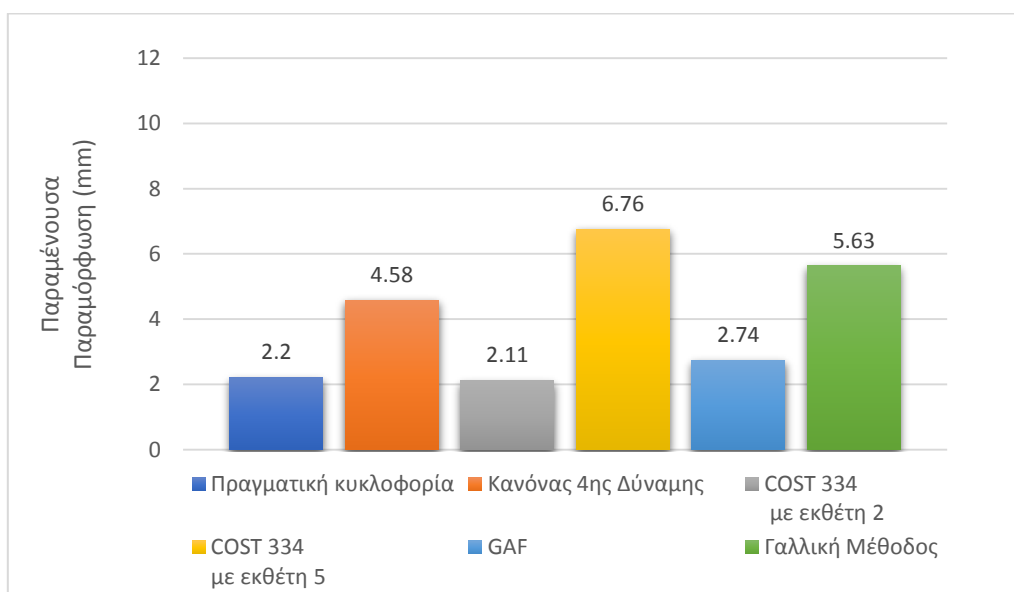
Γενικά παρατηρείται ότι οι παραμένουσες παραμορφώσεις για την στρώση έδρασης, βρίσκονται στο ίδιο εύρος τιμών για τις διάφορες διατάξεις αξόνων της πραγματικής κυκλοφορίας, με εξαίρεση την παραμένουσα παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη Load Case 2, η οποία παρουσιάζει μικρή απόκλιση.

Όπως φαίνεται στις εικόνες 4.2 και 4.3, για την στρώση βάσης και την στρώση έδρασης δεν παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση στα αποτελέσματα της παραμένουσας παραμόρφωσης μεταξύ των διαφόρων διατάξεων αξόνων, τροχών και αξονικών φορτίων.

## 4.2 Αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης με θεώρηση ισοδύναμης κυκλοφορίας με σύγκριση ως προς την πραγματική

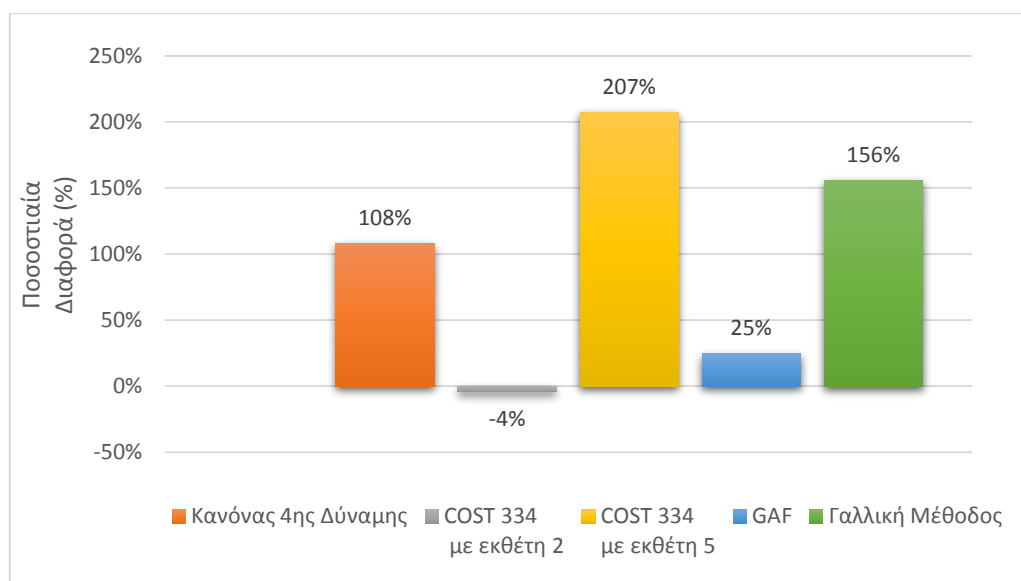
### 4.2.1 Ασφαλική στρώση

Στην εικόνα 4.4 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην ασφαλική στρώση, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 1** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους



Εικόνα 4.4: Παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλικής στρώσης για τη Load Case 1

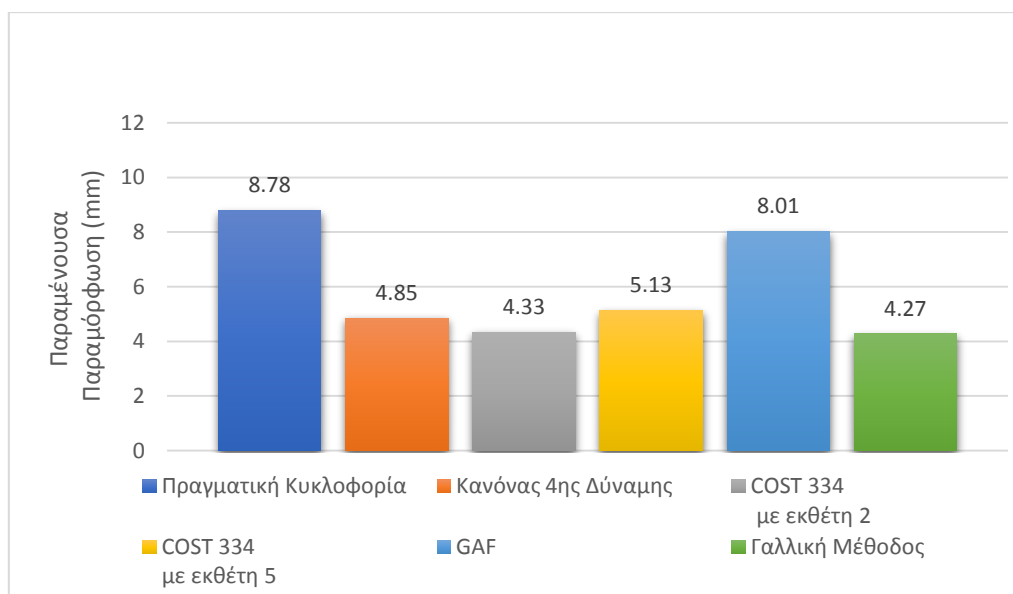
Στην εικόνα 4.5 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης της ασφαλικής στρώσης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 1**.



Εικόνα 4.5: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για την ασφαλτική στρώση ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 1

Παρατηρείται πως η καλύτερη προσέγγιση για τη συγκεκριμένη περίπτωση παρέχεται από τη μέθοδο COST 334 με εκθέτη 2, με απόκλιση 4%, ενώ αρκετά κοντά είναι και η μέθοδος GAF. Αντίθετα, αρκετά μεγάλη απόκλιση από τη πραγματική παραμένουσα παραμόρφωση φαίνεται να έχει η μέθοδος COST 334 με εκθέτη 5.

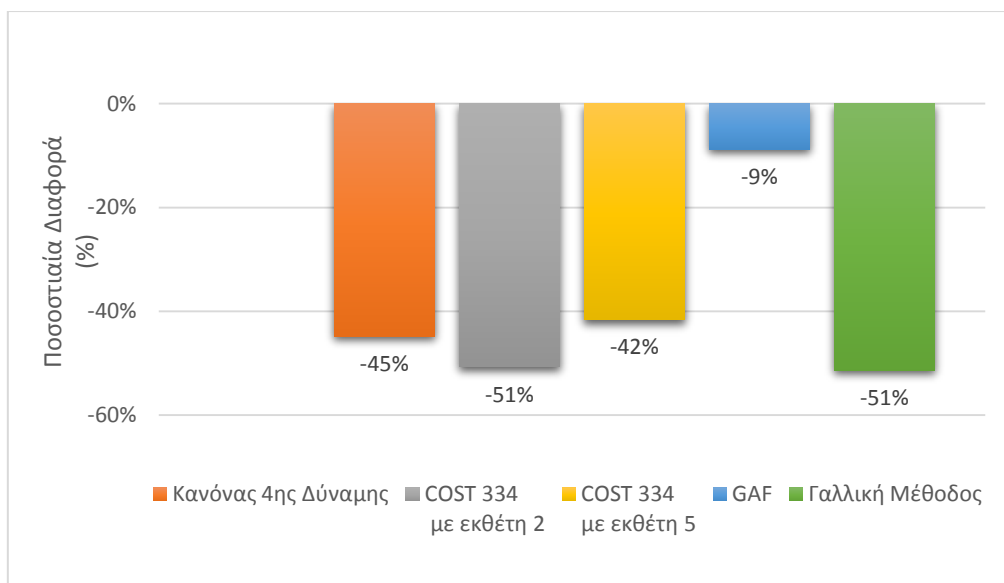
Στην εικόνα 4.6 εμφανίζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην ασφαλτική στρώση, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 2** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.6: Παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικής στρώσης για τη Load Case 2

Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης της ασφαλτικής στρώσης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 2**.

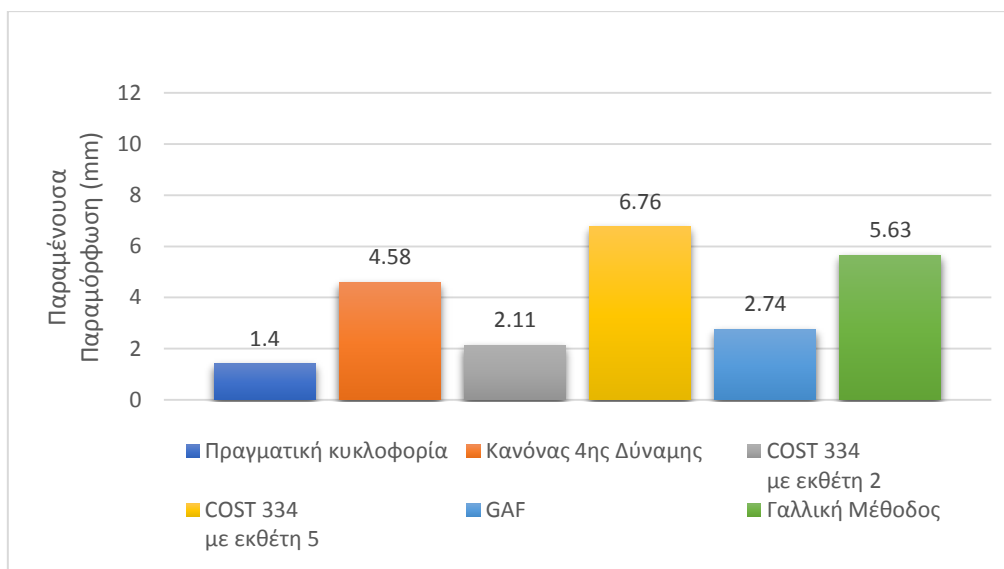




Εικόνα 4.7: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για την ασφαλτική στρώση ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 2

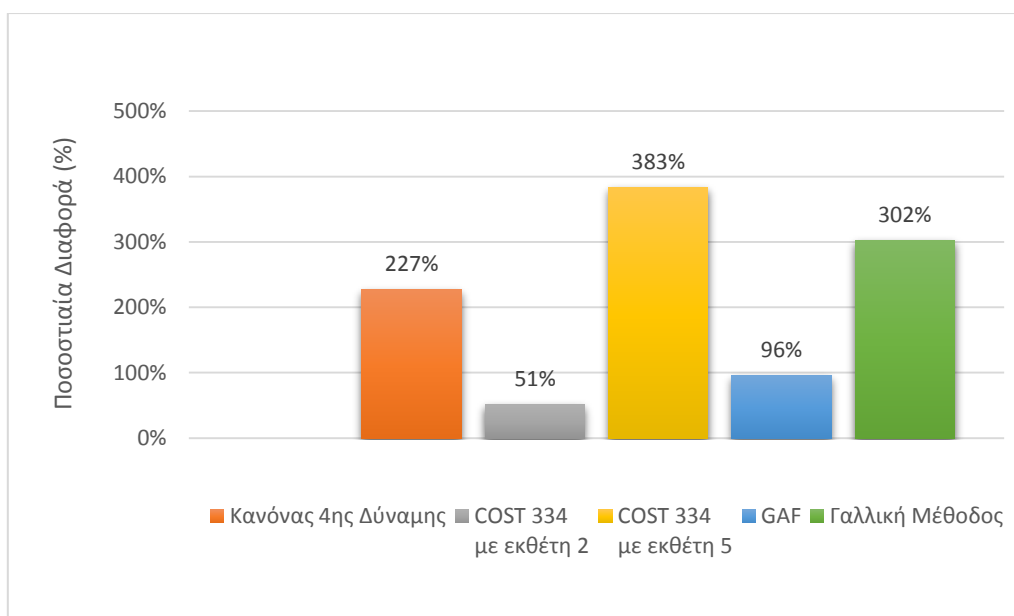
Όπως φαίνεται στις εικόνες 4.6 και 4.7, για τη Load Case 2, όλες οι μέθοδοι μετατροπής της κυκλοφορίας δίνουν ως αποτέλεσμα μικρότερη παραμένουσα παραμόρφωση της ασφαλτικής στρώσης από αυτή που προκύπτει με τη διέλευση της πραγματικής κυκλοφορίας, ενώ αρκετά κοντά προσεγγίζει η μέθοδος GAF, με απόκλιση 9%.

Η εικόνα 4.8 παρουσιάζει τη παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην ασφαλτική στρώση, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 7** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους



Εικόνα 4.8: Παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικής στρώσης για τη Load Case 7

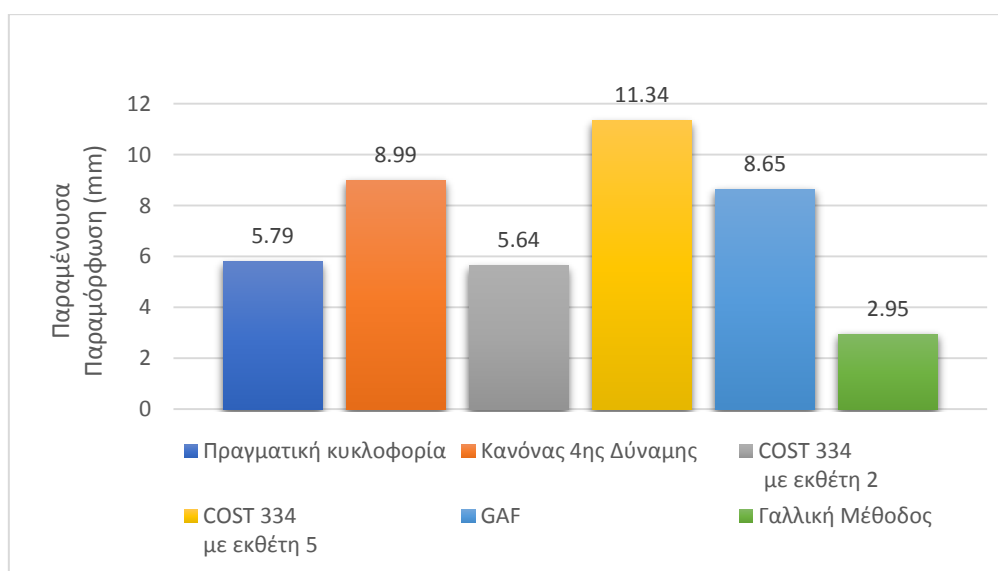
Στην εικόνα 4.9 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στην ασφαλτική στρώση, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 7**.



Εικόνα 4.9: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για την ασφαλτική στρώση ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 7

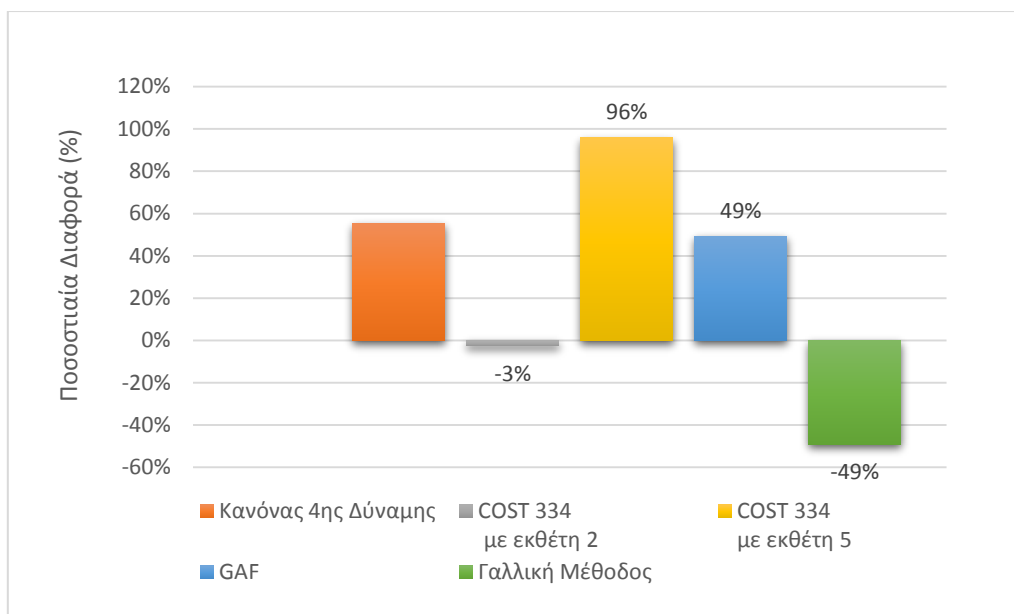
Για τη Load Case 7, παρατηρείται πως η παραμένουσα παραμόρφωση για την ασφαλτική στρώση προσεγγίζεται καλύτερα από τη μέθοδο COST 334 με εκθέτη 2, με απόκλιση 51%, ενώ όπως φαίνεται από όλες τις μεθόδους μετατροπής της κυκλοφορίας προκύπτουν αρκετά μεγαλύτερες παραμένουσες παραμορφώσεις συγκριτικά με την πραγματική.

Στην εικόνα 4.10 εμφανίζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην ασφαλτική στρώση, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 1-1** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.10: Παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικής στρώσης για τη Load Case 1-1

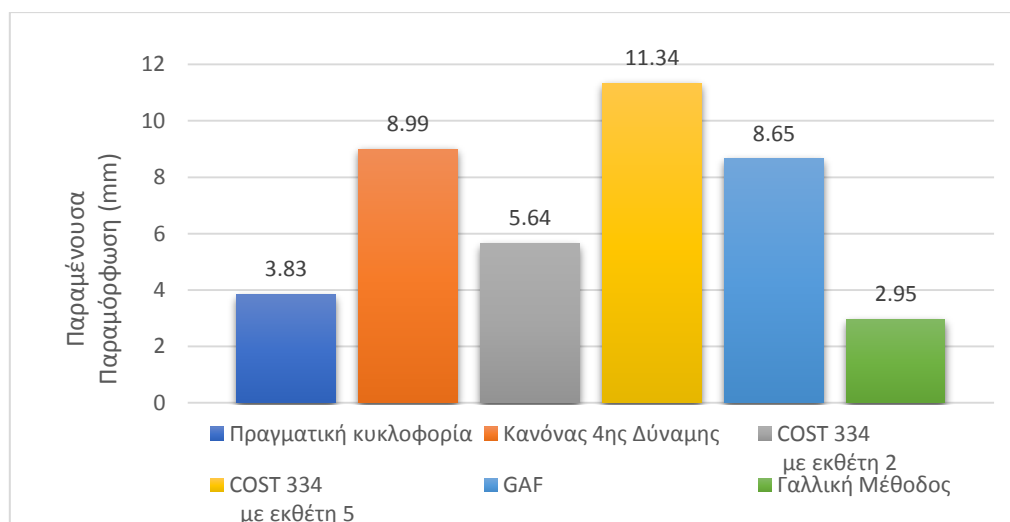
Στην εικόνα 4.11 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στην ασφαλτική στρώση, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 1-1**.



Εικόνα 4.11: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για την ασφαλτική στρώση ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 1-1

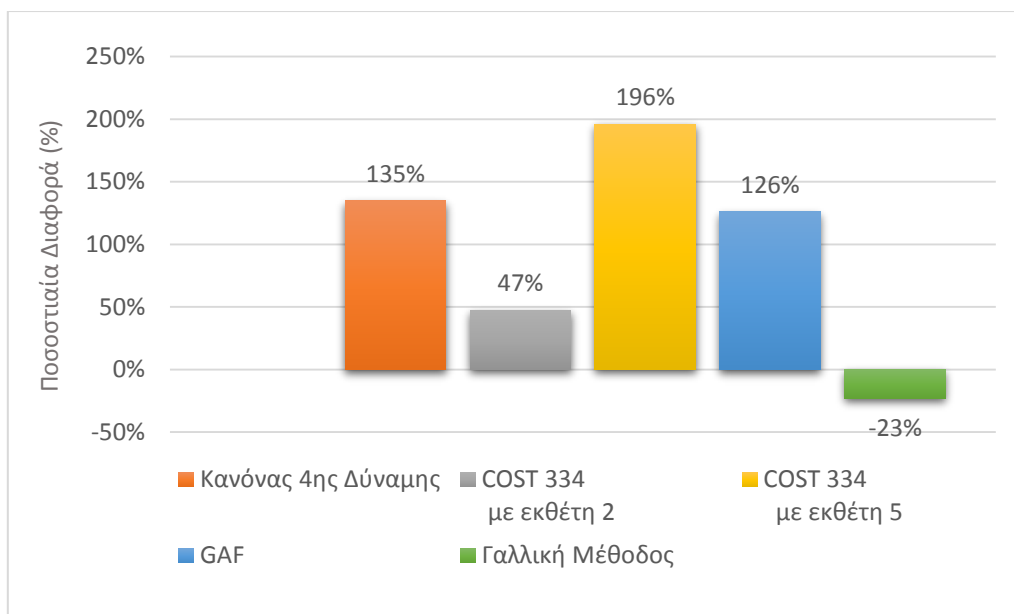
Επομένως, η παραμένουσα παραμόρφωση της ασφαλτικής στρώσης για τη Load Case 1-1 προσεγγίζεται σε αρκετά καλό βαθμό από τη μέθοδο COST 334 με εκθέτη 2, αν και σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο προκύπτει κατά 3% μικρότερη, αλλά παρόλα αυτά μπορεί να θεωρηθεί μια πολύ καλή προσέγγιση. Αντίθετα, η μέθοδος COST 334 με εκθέτη 5 αποκλίνει αρκετά από τη πραγματική παραμένουσα παραμόρφωση.

Στην εικόνα 4.12 εμφανίζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην ασφαλτική στρώση, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 7-7** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.12: Παραμένουσα παραμόρφωση ασφαλτικής στρώσης για τη Load Case 7-7

Στην εικόνα 4.13 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στην ασφαλτική στρώση, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 7-7**.

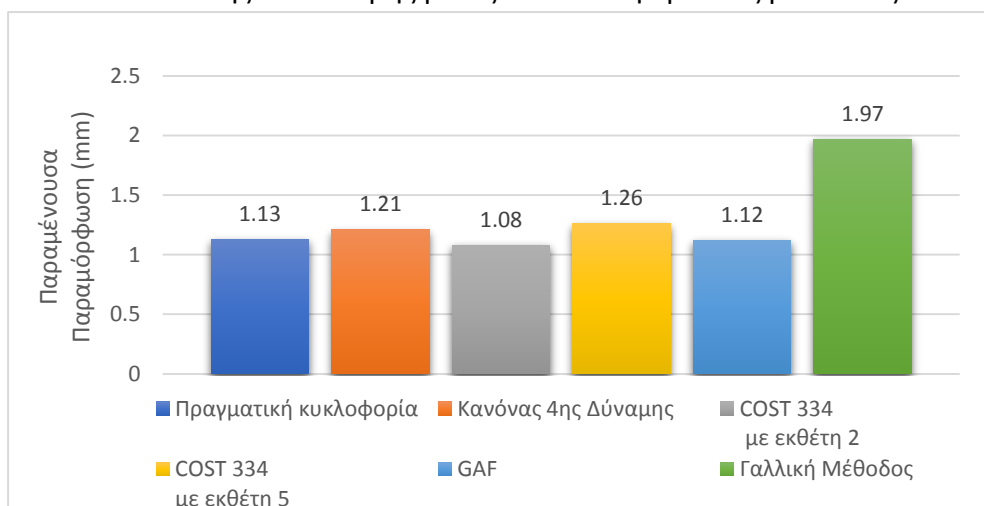


Εικόνα 4.13: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για την ασφαλτική στρώση ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 7-7

Παρατηρείται από τις παραπάνω εικόνες ότι η παραμένουσα παραμόρφωση της ασφαλτικής στρώσης για τη Load Case 7-7, προσεγγίζεται καλύτερα από τη Γαλλική μέθοδο, με απόκλιση 23%. Επίσης, αρκετά καλή προσέγγιση φαίνεται να πραγματοποιείται και από τη μέθοδο COST 334 με εκθέτη 2.

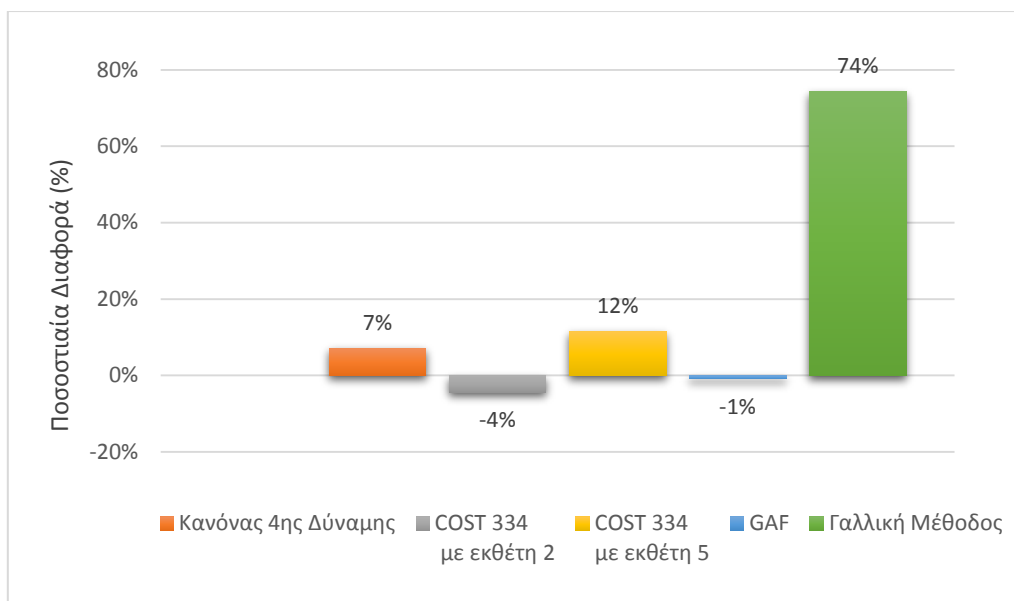
#### 4.2.2 Στρώση βάσης

Στην εικόνα 4.14 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση βάσης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 1** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.14: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης βάσης για τη Load Case 1

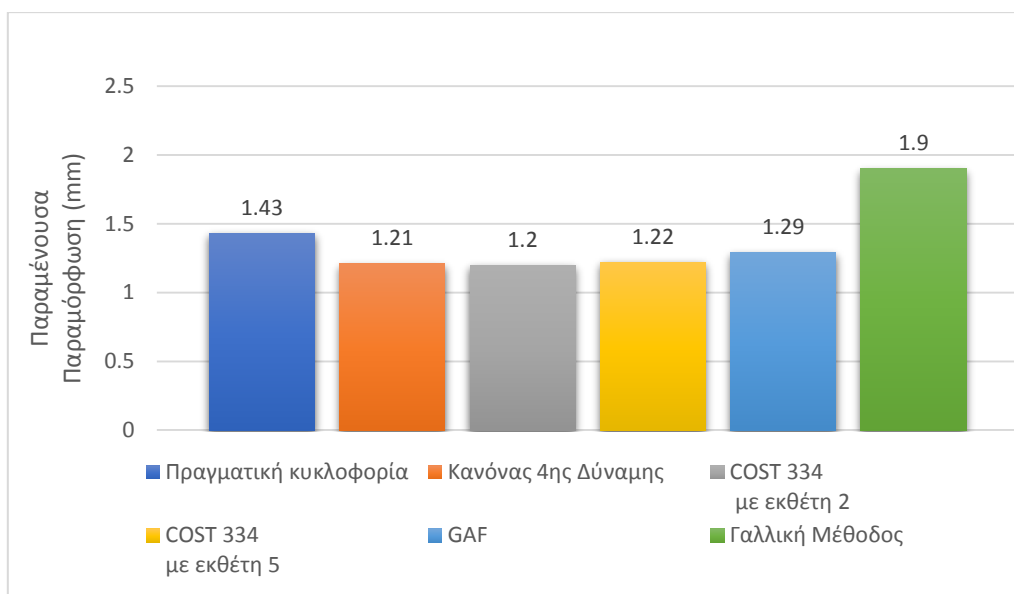
Στην εικόνα 4.15 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση βάσης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 1**.



Εικόνα 4.15: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση βάσης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 1

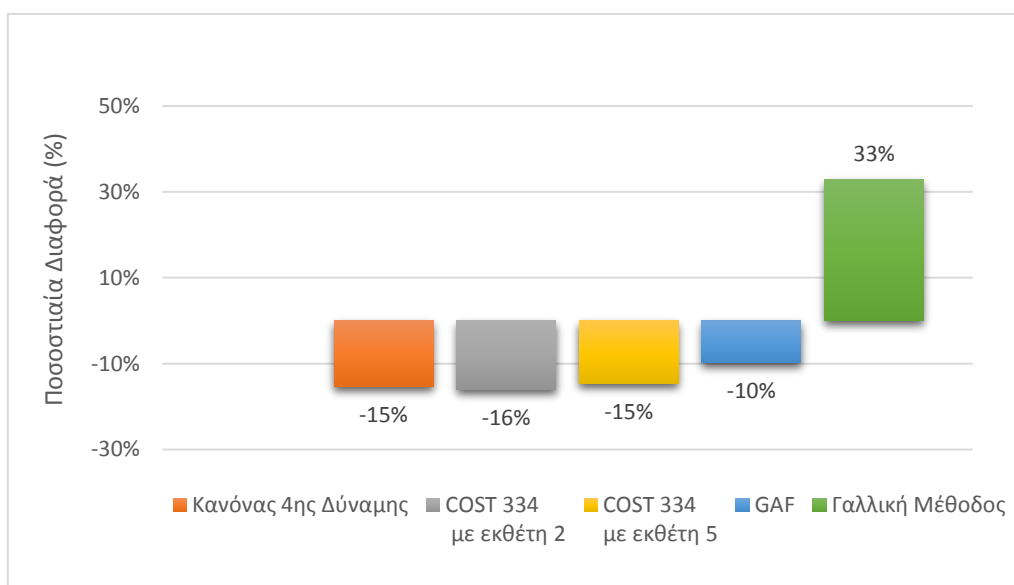
Παρατηρείται ότι για τη Load Case 1, η παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση βάσης προσεγγίζεται καλύτερα από τη μέθοδο GAF, με ελάχιστη απόκλιση 1%. Επίσης, αρκετά κοντά είναι και οι παραμένουσες παραμορφώσεις που προκύπτουν από τις υπόλοιπες μεθόδους, με εξαίρεση τη Γαλλική μέθοδο.

Στην εικόνα 4.16 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση βάσης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 2** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.16: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης βάσης για τη Load Case 2

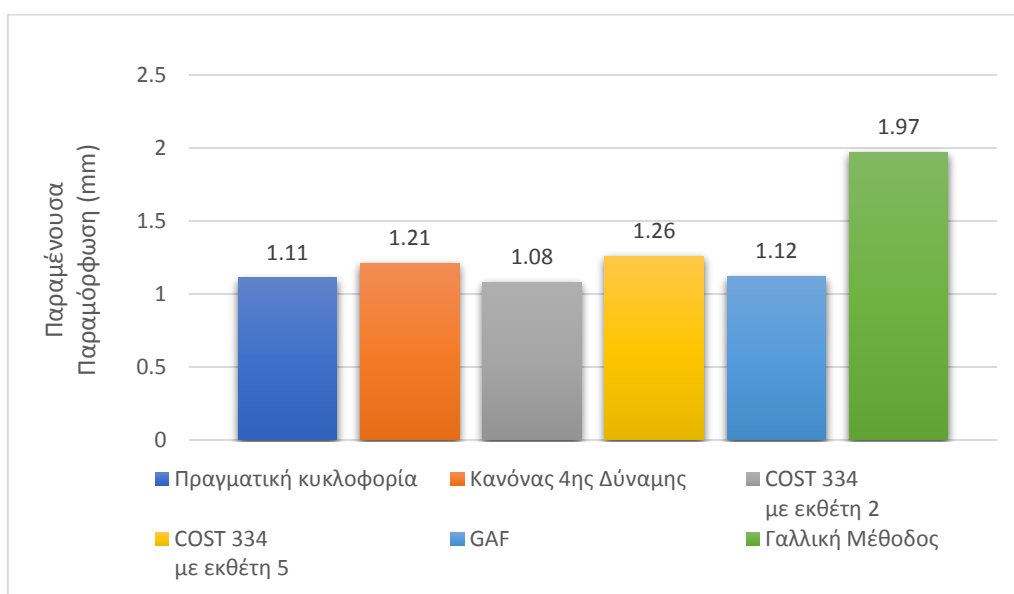
Στην εικόνα 4.17 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση βάσης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 2**.



Εικόνα 4.17: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση βάσης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 2

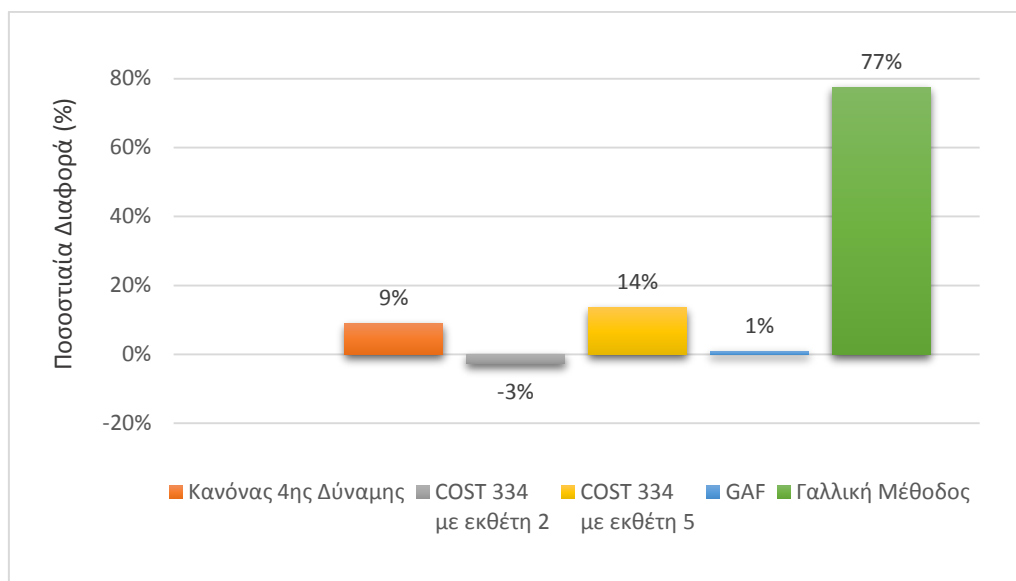
Από τις παραπάνω εικόνες μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι η παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση βάσης για τη Load Case 2 προσεγγίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια από τη μέθοδο GAF, με απόκλιση μόλις 10%, ενώ μια όχι και τόσο καλή προσέγγιση παρουσιάζεται από τη Γαλλική μέθοδο.

Στην εικόνα 4.18 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση βάσης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 7** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.18: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης βάσης για τη Load Case 7

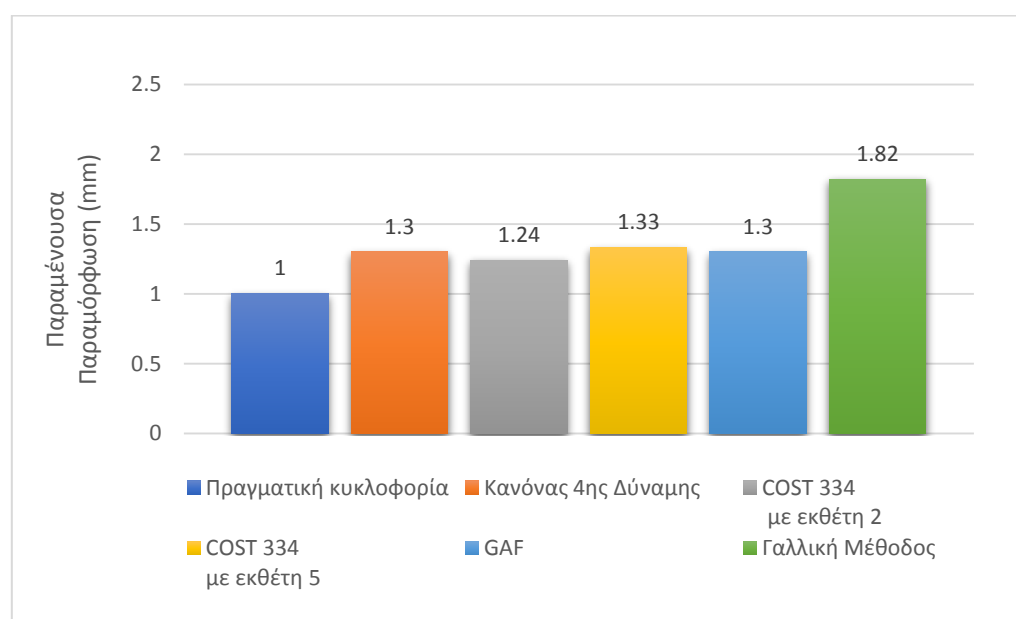
Στην εικόνα 4.19 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση βάσης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 7**.



Εικόνα 4.19: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση βάσης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 7

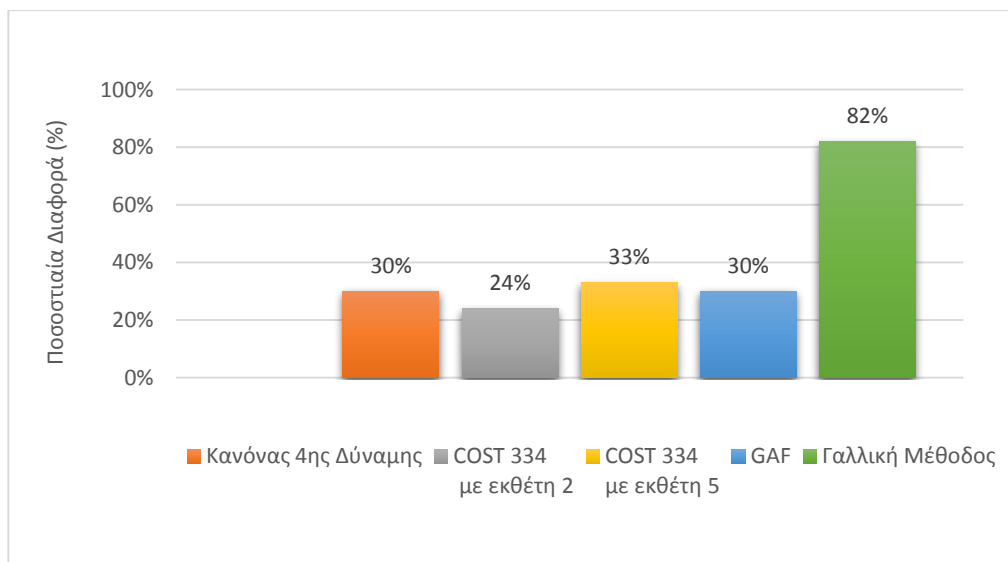
Παρατηρείται ότι με κριτήριο την παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση βάσης για τη Load Case 7, η καλύτερη μέθοδος μετατροπής της πραγματικής κυκλοφορίας σε ισοδύναμη είναι η μέθοδος GAF, με απόκλιση μόλις 1%. Αντίθετα, αρκετά μεγάλη απόκλιση από τη πραγματική παραμένουσα παραμόρφωση φαίνεται να έχει η Γαλλική μέθοδος.

Στην εικόνα 4.20 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση βάσης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 1-1** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.20: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης βάσης για τη Load Case 1-1

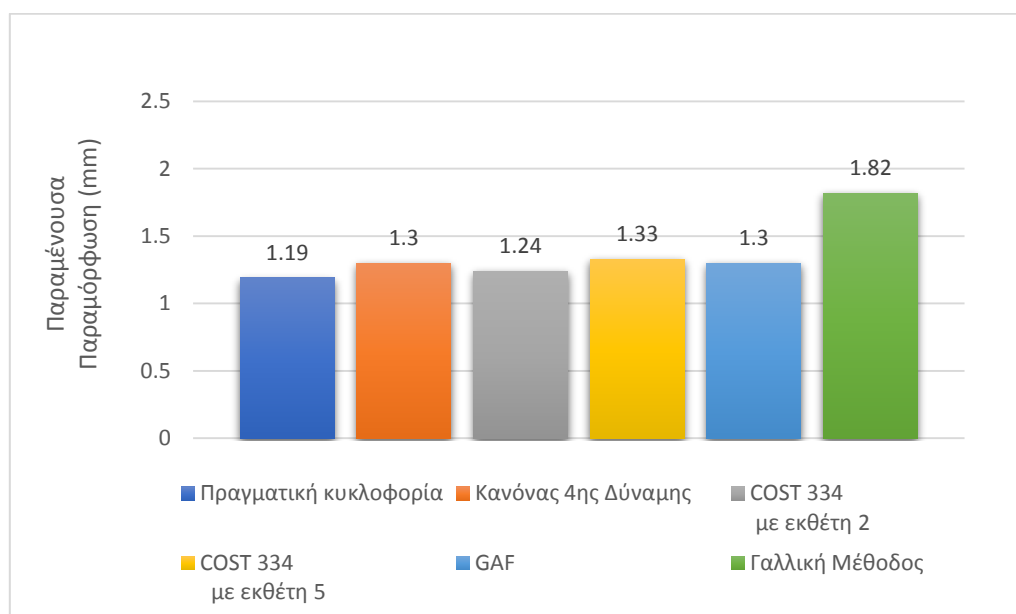
Στην εικόνα 4.21 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση βάσης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 1-1**.



Εικόνα 4.21: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση βάσης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 1-1

Από τις παραπάνω εικόνες μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι η παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση βάσης για τη Load Case 1-1 προσεγγίζεται καλύτερα από τη μέθοδο COST 334 με εκθέτη 2, με απόκλιση 24%, ενώ μια όχι και τόσο καλή προσέγγιση πραγματοποιείται από τη Γαλλική μέθοδο.

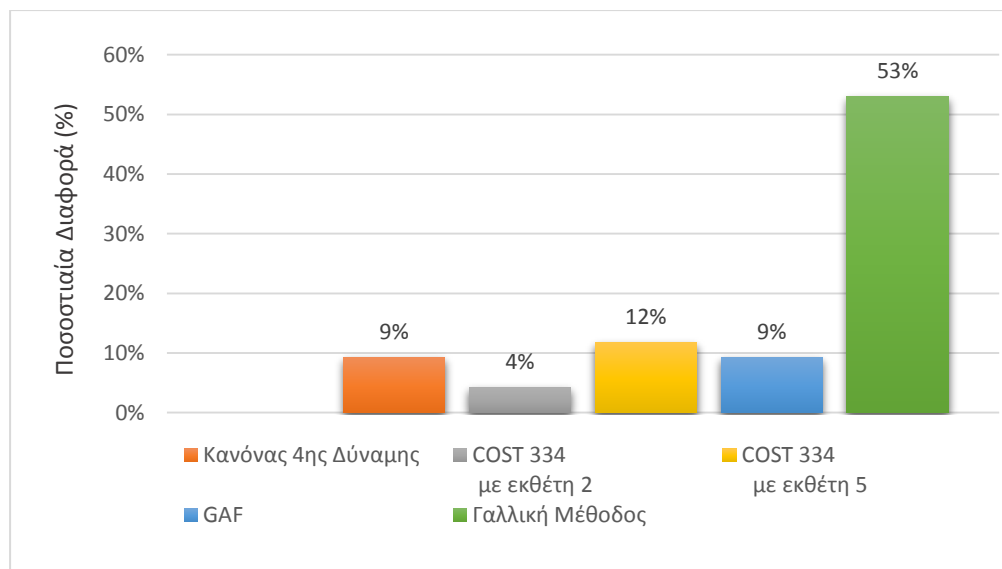
Στην εικόνα 4.22 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση βάσης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 7-7** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.





Εικόνα 4.22: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης βάσης για τη Load Case 7-7

Στην εικόνα 4.23 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση βάσης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 7-7**.

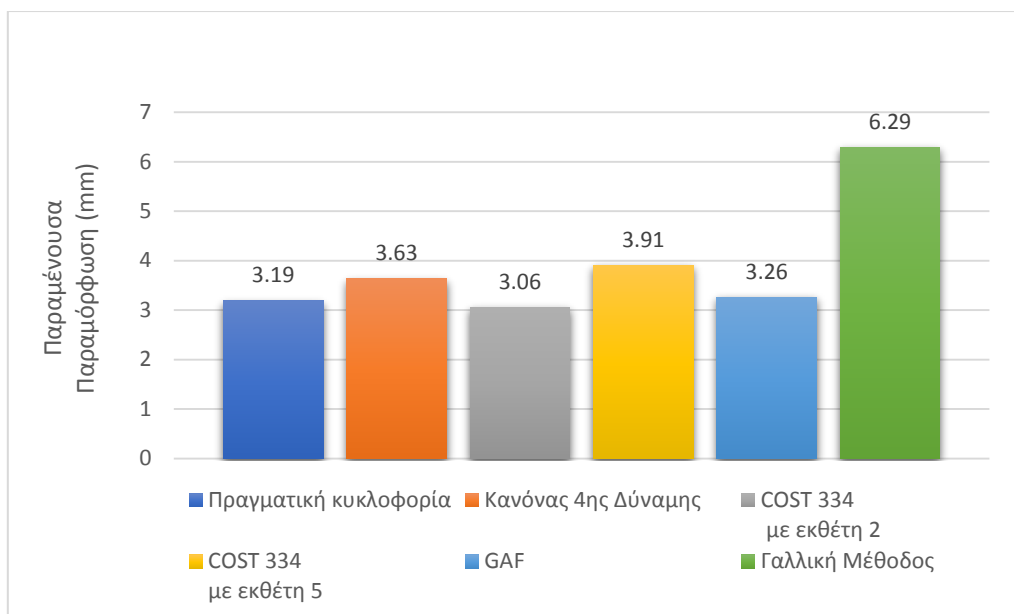


Εικόνα 4.23: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση βάσης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 7-7

Παρατηρείται ότι με κριτήριο την παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση βάσης για τη Load Case 7-7, η καλύτερη μέθοδος μετατροπής της πραγματικής κυκλοφορίας σε ισοδύναμη είναι η μέθοδος COST 334 με εκθέτη 2, με απόκλιση μόλις 4%. Αντίθετα, αρκετά μεγάλη απόκλιση από τη πραγματική παραμένουσα παραμόρφωση φαίνεται να έχει η Γαλλική μέθοδος.

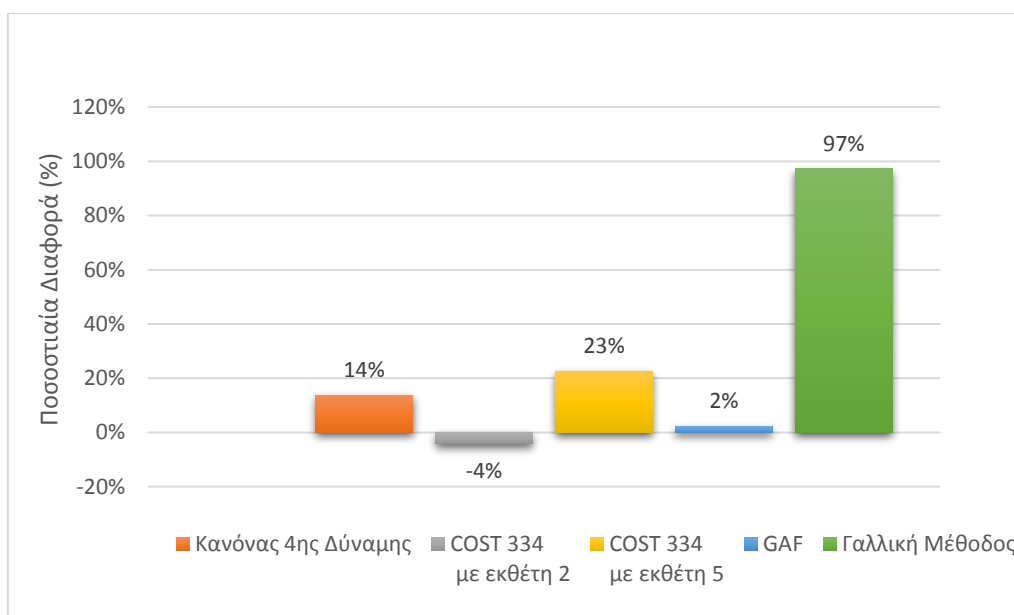
#### 4.2.3 Στρώση έδρασης

Στην εικόνα 4.24 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (*mm*) στην στρώση έδρασης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 1** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.24: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης για τη Load Case 1

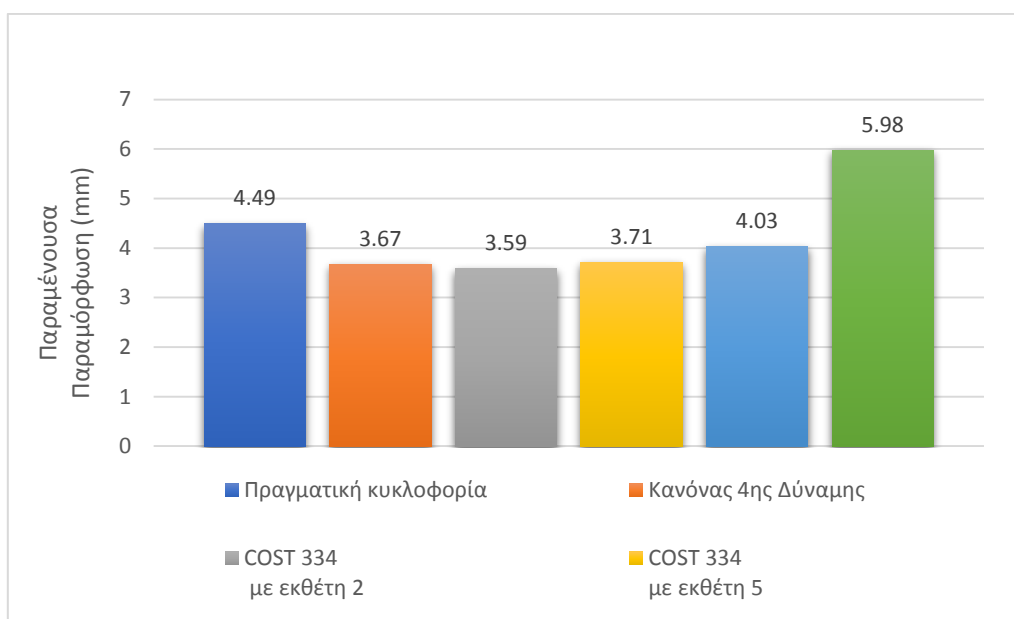
Στην εικόνα 4.25 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση έδρασης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 1**.



Εικόνα 4.25: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση έδρασης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 1

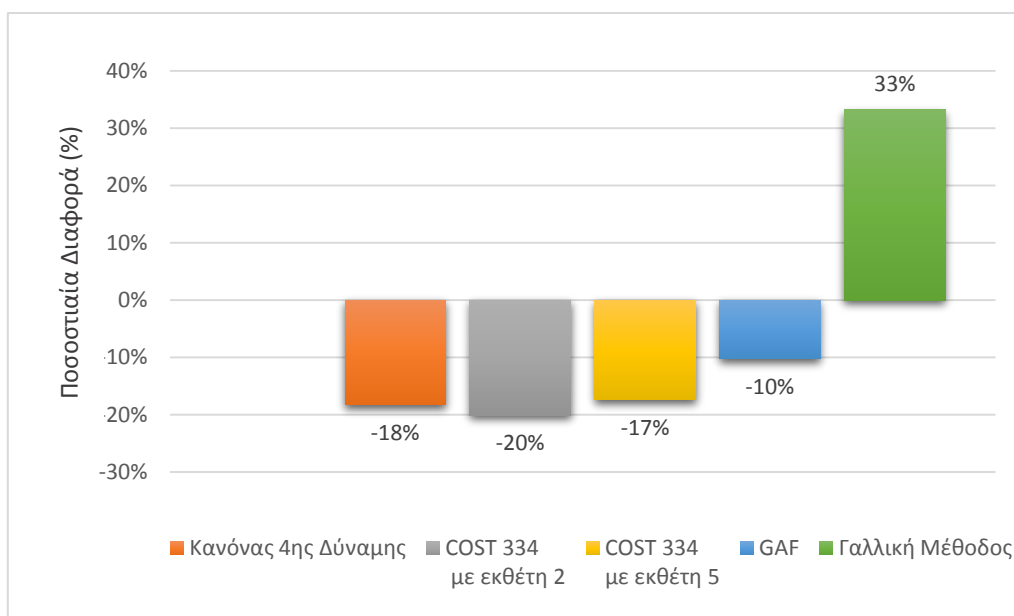
Από τις παραπάνω εικόνες μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι η παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση έδρασης για τη Load Case 1 προσεγγίζεται καλύτερα από τη μέθοδο GAF, με απόκλιση μόλις 2%, ενώ μια όχι και τόσο καλή προσέγγιση πραγματοποιείται από τη Γαλλική μέθοδο.

Στην εικόνα 4.26 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση έδρασης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 2** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.26: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης για τη Load Case 2

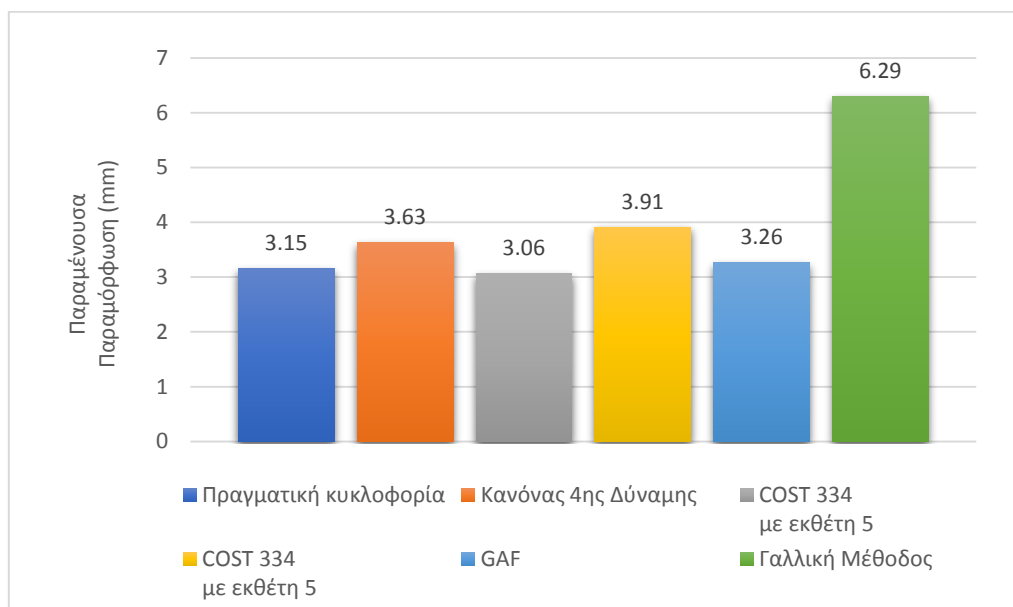
Στην εικόνα 4.27 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση έδρασης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 2**.



Εικόνα 4.27: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση έδρασης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 2

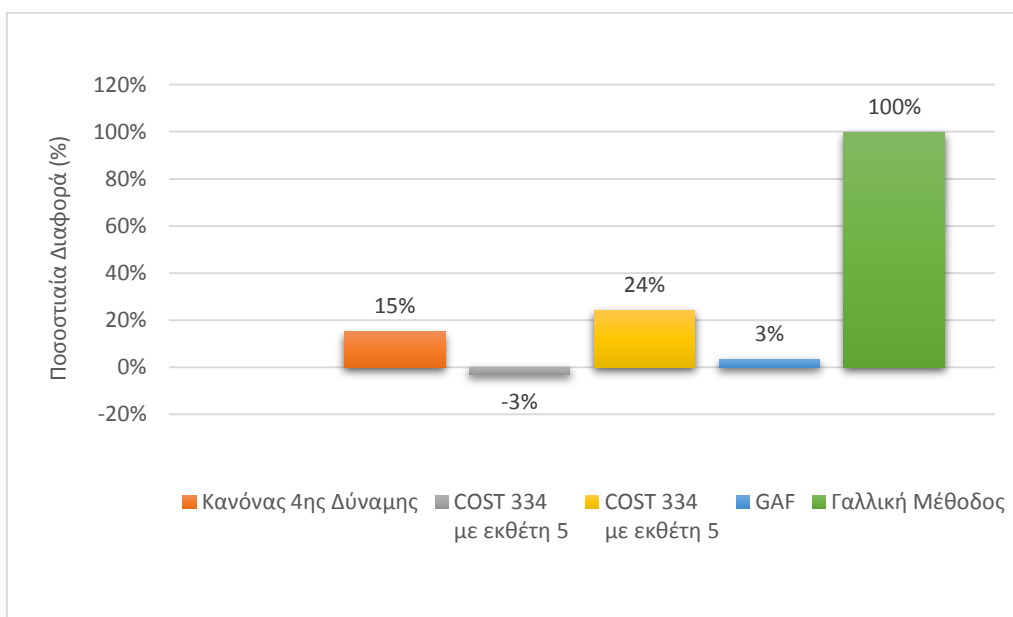
Παρατηρείται ότι με κριτήριο την παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση έδρασης για τη Load Case 2, η καλύτερη μέθοδος μετατροπής της πραγματικής κυκλοφορίας σε ισοδύναμη είναι η μέθοδος GAF, με απόκλιση μόλις 10%.

Στην εικόνα 4.28 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση έδρασης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 7** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.28: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης για τη Load Case 7

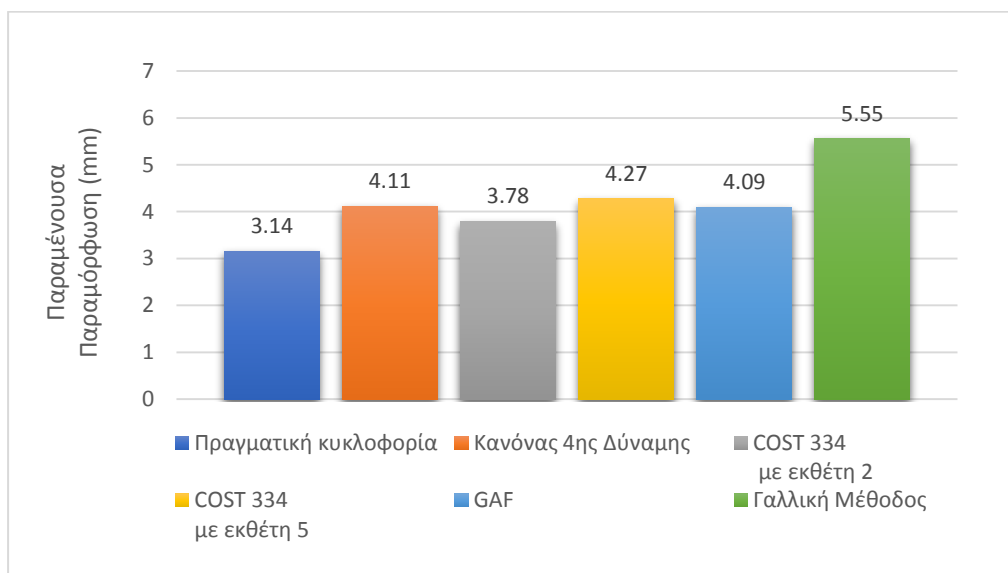
Στην εικόνα 4.29 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση έδρασης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 7**.



Εικόνα 4.29: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση έδρασης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 7

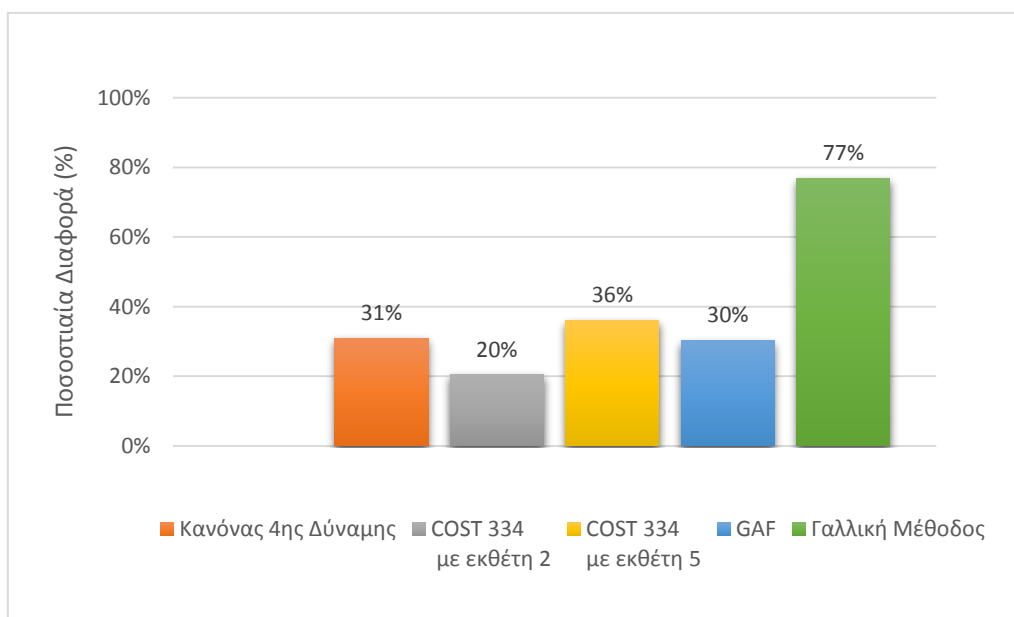
Από τις παραπάνω εικόνες μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι η παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση έδρασης για τη Load Case 7 προσεγγίζεται ισοδύναμα από τη μέθοδο GAF και τη μέθοδο COST 334 με εκθέτη 2, με απόκλιση μόλις 3% και από τις δύο, ενώ μια όχι και τόσο καλή προσέγγιση πραγματοποιείται από τη Γαλλική μέθοδο.

Στην εικόνα 4.30 παρουσιάζεται η παραμένουσα παραμόρφωση (mm) στην στρώση έδρασης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 1-1** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.30: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης για τη Load Case 1-1

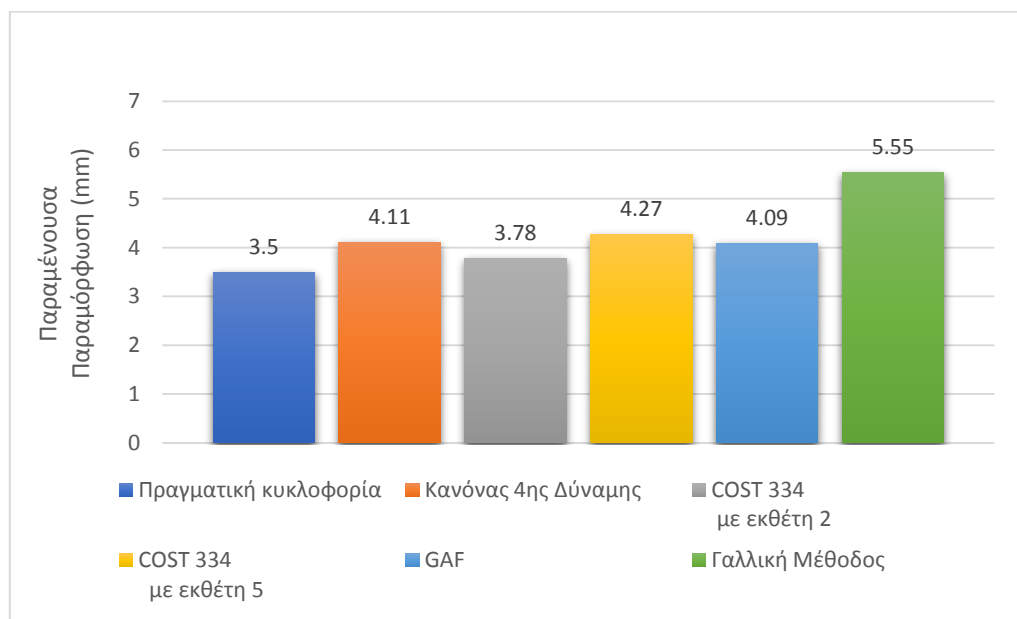
Στην εικόνα 4.31 παρουσιάζεται η ποσοστιαία διαφορά της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση έδρασης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 1-1**.



Εικόνα 4.31: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση έδρασης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 1-1

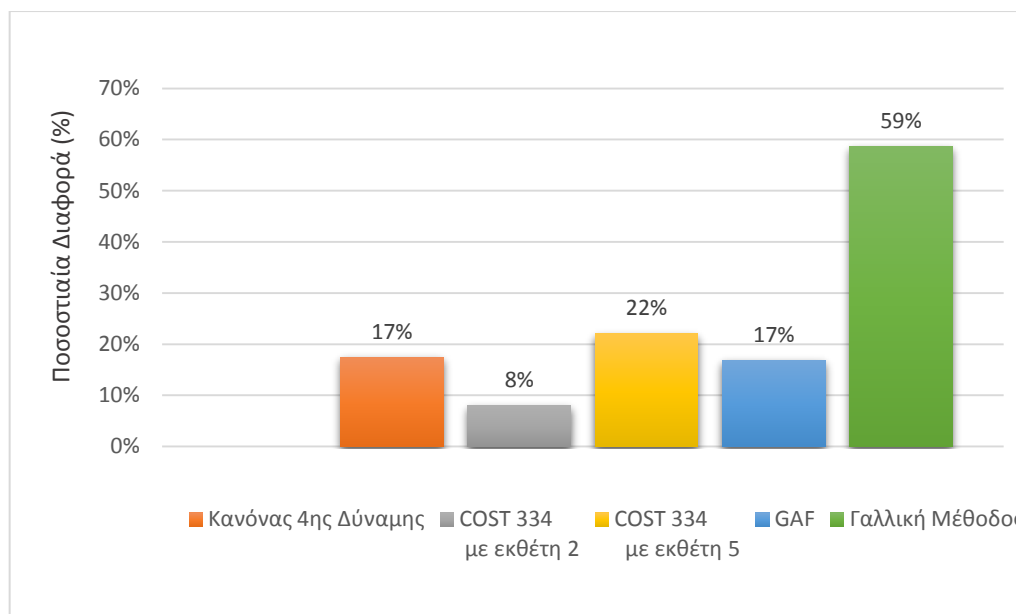
Παρατηρείται ότι με κριτήριο την παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση έδρασης για τη Load Case 1-1, η καλύτερη μέθοδος μετατροπής της πραγματικής κυκλοφορίας σε ισοδύναμη είναι η μέθοδος COST 334 με εκθέτη 2, με απόκλιση 20%. Επιπλέον, και οι υπόλοιπες μέθοδοι μετατροπής της κυκλοφορίας δίνουν ως αποτέλεσμα αρκετά μεγαλύτερες τιμές παραμένουσας παραμόρφωση με τη μεγαλύτερη να προέρχεται από τη Γαλλική μέθοδο.

Στην εικόνα 4.32 παρουσιάζεται η *παραμένουσα παραμόρφωση (mm)* στην στρώση έδρασης του οδοστρώματος, όπως υπολογίζεται με βάση τη θεώρηση της πραγματικής κυκλοφορίας για τη **Load Case 7-7** και της ισοδύναμης με τις πέντε διαφορετικές μεθόδους.



Εικόνα 4.32: Παραμένουσα παραμόρφωση στρώσης έδρασης για τη Load Case 7-7

Στην εικόνα 4.33 παρουσιάζεται η *ποσοστιαία διαφορά* της παραμένουσας παραμόρφωσης που προκαλείται στη στρώση έδρασης, θεωρώντας την ισοδύναμη ως προς την πραγματική κυκλοφορία για τη **Load Case 7-7**.



Εικόνα 4.33: Ποσοστιαίες διαφορές παραμενουσών παραμορφώσεων για τη στρώση έδρασης ως προς την πραγματική κυκλοφορία - Load Case 7-7

Από τις παραπάνω εικόνες μπορεί να διεξαχθεί το συμπέρασμα ότι η παραμένουσα παραμόρφωση στη στρώση έδρασης για τη Load Case 7-7 προσεγγίζεται καλύτερα από τη μέθοδο COST 334 με εκθέτη 2, με απόκλιση μόλις 8%, ενώ μια όχι και τόσο καλή προσέγγιση πραγματοποιείται από τη Γαλλική μέθοδο.

## 5 Συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η συγκριτική αξιολόγηση των δύο θεωρήσεων της κυκλοφορίας σχεδιασμού (ισοδύναμη έναντι πραγματικής κυκλοφορίας) στον σχεδιασμό ενός εύκαμπτου οδοστρώματος και η διερεύνηση της επίδρασής τους στην συμπεριφορά του οδοστρώματος. Για την επίτευξη του στόχου, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική ανασκόπηση, με σκοπό την εύρεση των κυριότερων μεθόδων μετατροπής της κυκλοφορίας σε ισοδύναμη, έτσι ώστε να αξιολογηθεί σε επόμενη φάση ποια προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική κυκλοφορία. Επιλέχθηκαν πέντε διαφορετικές μέθοδοι μετατροπής της κυκλοφορίας σε ισοδύναμη, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί συγκριτική ανάλυση. Στην συνέχεια, καθορίστηκε η πραγματική κυκλοφορία, η οποία αποτελείται από πέντε διαφορετικές διατάξεις αξόνων, τροχών και αξονικών φορτίων.

Με δεδομένη την πραγματική και την ισοδύναμη κυκλοφορία, καθώς και με θεώρηση μιας πειραματικής διατομής οδοστρώματος, για κάθε διάταξη αξόνων πραγματοποιήθηκε κατάλληλη πειραματική ανάλυση με κριτήριο την παραμένουσα παραμόρφωση που αναπτύσσεται στην ασφαλική στρώση, στη βάση και στη στρώση έδρασης. Εν συνεχεία, πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων παραμενουσών παραμορφώσεων που επιφέρει για κάθε περίπτωση η ισοδύναμη κυκλοφορία έναντι αυτών της πραγματικής κυκλοφορίας.

Από την επεξεργασία και την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτουν:

1. Συμπεράσματα ως προς την επίδραση των διαφορετικών διατάξεων αξόνων (πραγματική κυκλοφορία) στην παραμένουσα παραμόρφωση.
2. Συμπεράσματα ως προς τις μεθόδους υπολογισμού της ισοδύναμης κυκλοφορίας.
3. Συμπεράσματα ως προς τις διαφορές της ισοδύναμης κυκλοφορίας σε σχέση με τη πραγματική για τον υπολογισμό της παραμένουσας παραμόρφωσης.

### Συμπεράσματα 1:

Οι διατάξεις αξόνων που εμπεριέχονται στην πραγματική κυκλοφορία διαχωρίζονται και ομαδοποιούνται ανάλογα με το αξονικό φορτίο που φέρουν αλλά και το ποσοστό συμμετοχής τους στην κυκλοφορία. Έτσι ως αντίστοιχες συγκρίνονται η Load Case 1 με τη Load Case 7 και η Load Case 1-1 με τη Load Case 7-7 ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση που επιφέρουν στην ασφαλική στρώση του οδοστρώματος και εξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Για διπλό άξονα και αξονικό φορτίο 180 kN: προκαλείται μεγαλύτερη παραμένουσα παραμόρφωση από τη διάταξη με διπλό άξονα με διπλά ελαστικά (*Load Case 1*) σε σύγκριση με αυτή που προκύπτει από τη διάταξη με διπλό άξονα και μονά ελαστικά (*Load Case 7*).
- Για διπλό άξονα και αξονικό φορτίο 130 kN: από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι η παραμένουσα παραμόρφωση για διπλό άξονα με



διπλά ελαστικά (*Load Case 1-1*) είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με αυτή που προκύπτει από τη διάταξη του διπλού άξονα με μονά ελαστικά (*Load Case 7-7*).

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την στρώση βάσης και την στρώση έδρασης δεν παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση στα αποτελέσματα της παραμένουσας παραμόρφωσης μεταξύ των διαφόρων διατάξεων αξόνων, τροχών και αξονικών φορτίων. Επίσης, προκύπτει ότι οι διατάξεις με διπλούς τροχούς, όπως περιεγράφηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιφέρουν μεγαλύτερη παραμένουσα παραμόρφωση στο οδόστρωμα.

#### Συμπεράσματα 2:

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν για τις μεθόδους υπολογισμού της ισοδύναμης κυκλοφορίας, από τα αποτελέσματα των παραμενουσών παραμορφώσεων στις επιμέρους στρώσεις της διατομής του οδοστρώματος είναι τα εξής:

##### Με χρήση του Κανόνα 4<sup>ης</sup> Δύναμης:

- *Για την ασφαλική στρώση:* εμφανίζεται αρκετά μεγαλύτερη η παραμένουσα παραμόρφωση της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική, σχεδόν για όλες τις διατάξεις αξόνων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια να υπάρχει κίνδυνος υπερεκτίμησης της φθοράς που προκαλείται στο οδόστρωμα με συνέπεια υπερδιαστασιολόγηση και αύξηση κόστους.
- *Για την στρώση βάσης και τη στρώση έδρασης:* μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει με μικρή απόκλιση την παραμένουσα παραμόρφωση της πραγματικής κυκλοφορίας σχεδόν για όλες τις διαφορετικές διατάξεις, εκτός από τη *Load Case 2*.

Γενικά, τα αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική για την στρώση βάσης και την στρώση έδρασης, με χρήση του Κανόνα της 4<sup>ης</sup> Δύναμης, φαίνεται να είναι αρκετά ικανοποιητικά. Αντίθετα, για την ασφαλική στρώση τα αποτελέσματα αποκλίνουν σημαντικά, με πιθανή αύξηση στο κόστος του σχεδιασμού.

##### Με χρήση της μεθόδου COST 334 – $n = 2$ :

- *Για την ασφαλική στρώση:* εμφανίζεται μια αρκετά καλή προσέγγιση της παραμένουσας παραμόρφωσης της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική για όλες τις διατάξεις αξόνων.
- *Για τη στρώση βάσης και τη στρώση έδρασης:* τα αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική φαίνεται να είναι μικρότερα σχεδόν για όλες τις διατάξεις αξόνων.

Γενικά, αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό, καθώς προσεγγίζει με σχετική ακρίβεια τα αποτελέσματα της παραμένουσας παραμόρφωσης της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική κυκλοφορία.

#### Με χρήση της μεθόδου COST 334 – n = 5:

- *Για την ασφαλική στρώση:* παρατηρείται αρκετά μεγάλη απόκλιση της παραμένουσας παραμόρφωσης της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος υπερδιαστασιολόγησης του οδοστρώματος σε περίπτωση χρησιμοποίησης της μεθόδου στο σχεδιασμό.
- *Για την στρώση βάσης και τη στρώση έδρασης:* παρατηρείται σχετικά μικρή απόκλιση για τα αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική, σχεδόν για όλες τις διατάξεις αξόνων.

Γενικά, αυτή η μέθοδος δεν παρουσιάζει ικανοποιητικά αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική. Επομένως, υπάρχει πιθανότητα αύξησης του κόστους, εφόσον χρησιμοποιηθεί στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων.

#### Με χρήση της μεθόδου GAF:

- *Για την ασφαλική στρώση:* τα αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική παρουσιάζουν μικρή απόκλιση για όλες τις περιπτώσεις διατάξεων αξόνων. Εξαιρέση αποτελούν οι Load Case 1-1 και Load Case 7-7.
- *Για τη στρώση βάσης και τη στρώση έδρασης:* οι παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς τη πραγματική παρουσιάζουν αρκετά μικρή απόκλιση για όλες τις διατάξεις αξόνων.

Γενικά, με τη χρήση της μεθόδου GAF τα αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική παρουσιάζουν σημαντικά μικρή απόκλιση για όλες τις επιμέρους στρώσεις του οδοστρώματος. Επομένως, μπορεί να προταθεί για χρήση στη διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων.

#### Με χρήση της Γαλλικής μεθόδου:

- *Για την ασφαλική στρώση:* τα αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική αποκλίνουν σημαντικά. Για τις διατάξεις με διαφορετικό αξονικό φορτίο από το τυπικό, που ορίζεται από τη μέθοδο (Load Case 1,2,7), παρατηρείται μεγάλη αύξηση της παραμένουσας παραμόρφωσης της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική. Αντίθετα, για τις διατάξεις με ίδιο αξονικό φορτίο με το τυπικό της μεθόδου (Load Case 1-1, 7-7) παρατηρείται σημαντική μείωση της παραμένουσας παραμόρφωσης.
- *Για τη στρώση βάσης και τη στρώση έδρασης:* κοινό συμπέρασμα προκύπτει για όλες τις διατάξεις αξόνων, αφού οι παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση.

Γενικά, η χρήση της Γαλλικής μεθόδου για τον υπολογισμό της ισοδύναμης κυκλοφορίας, δεν διεξάγει ικανοποιητικά αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική.

*Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων της πραγματικής κυκλοφορίας προσεγγίζονται ικανοποιητικά από τα αντίστοιχα αποτελέσματα όταν γίνεται θεώρηση ισοδύναμης κυκλοφορίας υπολογισμένης με τη μέθοδο COST 334 –  $n=2$ . Επίσης, συγκρίνοντας ως προς την πραγματική κυκλοφορία, ικανοποιητικά είναι και τα αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων που βασίζονται στην ισοδύναμη κυκλοφορία υπολογισμένη με τη μέθοδο GAF.*

### Συμπεράσματα 3:

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν έπειτα από την παρατήρηση των αποτελεσμάτων κάθε διάταξης άξονα για τις παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική είναι τα εξής:

- Για τη Load Case 1 (Διπλός άξονας με διπλά ελαστικά και αξονικό φορτίο 180kN): η χρήση της μεθόδου GAF εμφανίζει μικρότερη απόκλιση για τις παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική.
- Για τη Load Case 2 (Μονός άξονας με διπλά ελαστικά και αξονικό φορτίο 90 kN): η χρήση της μεθόδου GAF εμφανίζει μικρότερη απόκλιση για τις παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική και για αυτή τη διάταξη.
- Για τη Load Case 7 (Διπλός άξονας με μονά ελαστικά και αξονικό φορτίο 180 kN): η χρήση της μεθόδου COST 334 ( $n=2$ ) εμφανίζει μικρότερη απόκλιση για τις παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική.
- Για τη Load Case 1-1 (Διπλός άξονας με διπλά και αξονικό φορτίο 130 kN) : η χρήση της μεθόδου COST 334 ( $n=2$ ) εμφανίζει μικρότερη απόκλιση για τις παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική.
- Για τη Load Case 7-7 (Διπλός άξονας με μονά ελαστικά και αξονικό φορτίο 130 kN): η χρήση της μεθόδου COST 334 ( $n=2$ ) εμφανίζει μικρότερη απόκλιση για τις παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική και για αυτή τη διάταξη.

Πρέπει να τονιστεί ότι οι παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας προκύπτουν ίσες, ανά μέθοδο υπολογισμού, για διατάξεις αξόνων με το ίδιο αξονικό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα, για τη Load Case 1 και τη Load Case 7 οι παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας είναι ίσες από τον Κανόνα της 4<sup>ης</sup> Δύναμης, τη μέθοδο COST 334 με  $n=2$  και  $n=5$ , τη μέθοδο GAF και τη Γαλλική μέθοδο. Το ίδιο συμβαίνει και για τη Load Case 1-1 και τη Load Case 7-7. Τα αποτελέσματα αυτά φαίνεται να είναι ανεξάρτητα του πλήθους των τροχών (μονοί ή δίδυμοι) για όλες τις στρώσεις της διατομής του οδοστρώματος.

*Εν κατακλείδι, παρατηρείται ότι για κάθε διάταξη αξόνων είναι διαφορετική η μέθοδος που εξάγει καλύτερα αποτελέσματα παραμενουσών παραμορφώσεων ισοδύναμης κυκλοφορίας. Για τις Load Case 1 και Load Case 2 προκύπτουν ακριβή αποτελέσματα παραμένουσας παραμόρφωσης με τη μέθοδο GAF. Για τις Load Case 7, Load Case 1-1 και Load Case 7-7 προκύπτουν ικανοποιητικά αποτελέσματα με χρήση της μεθόδου COST 334 – n=2.*

Συνοψίζοντας, διαφαίνεται ότι η θεώρηση της ισοδύναμης κυκλοφορίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στη διαστασιολόγηση των εύκαμπτων οδοστρωμάτων, χωρίς να προκαλείται σημαντικό σφάλμα στην εκτίμηση της παραμένουσας παραμόρφωσης. Προϋπόθεση για να πραγματοποιηθεί αυτό αποτελεί η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου υπολογισμού της ισοδύναμης κυκλοφορίας. Η κατάλληλη μέθοδος επιλέγεται με βάση την εξεταζόμενη διάταξη άξονα, τροχού και αξονικού φορτίου. Οι μέθοδοι που αποδίδουν καλύτερα τις παραμένουσες παραμορφώσεις της πραγματικής κυκλοφορίας, όπως αυτή έχει θεωρηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι η μέθοδος COST 334 – n=2 και η μέθοδος GAF. Έτσι, οι παραμένουσες παραμορφώσεις της ισοδύναμης κυκλοφορίας ως προς την πραγματική δεν αποκλίνουν σημαντικά, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας σχεδιασμού των οδοστρωμάτων.

Με δεδομένα τα αποτελέσματα και συμπεράσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, προτείνεται να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα σχετικά με την επίδραση του παράγοντα της κυκλοφορίας στο σχεδιασμό των οδοστρωμάτων. Συγκεκριμένα προτείνεται:

- Να αξιολογηθεί πλήθος επιπρόσθετων διατάξεων αξόνων, τροχών και αξονικών φορτίων, στα πλαίσια της ίδιας πειραματικής ανάλυσης με δείκτη συμπεριφοράς του οδοστρώματος την παραμένουσα παραμόρφωση.
- Να γίνει αντίστοιχη πειραματική ανάλυση ως προς την κόπωση του οδοστρώματος (Fatigue Cracking), καθώς αποτελεί και αυτή κριτήριο σχεδιασμού και δείκτη συμπεριφοράς των εύκαμπτων οδοστρωμάτων.
- Να εμπλουτιστεί η πειραματική ανάλυση με διαφορετικές διατομές οδοστρώματος, με διαφορετικά πάχη και μηχανικά χαρακτηριστικά των επιμέρους στρώσεων, τόσο ως προς την παραμένουσα παραμόρφωση (αυλάκωση), όσο και ως προς την κόπωση του οδοστρώματος (Fatigue Cracking).
- Να ληφθούν υπόψη και άλλοι τύποι οδοστρωμάτων, όπως δύσκαμπτα, ημι-εύκαμπτα ή ημι-άκαμπτα.

## 6 Βιβλιογραφία

- AASHO. (1961-1962). *The AASHO Road Test, Special Report 61*. Washington, DC: National Academy of Sciences – National Research Council.
- AASHO. (1962). *The AASHO Road Test, Report 7, Summary Report*. Washington, D.C.: National Academy of Sciences.
- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993*. Washington, D.C.: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, A Manual of Practice*. United States of America: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Al-Hasan, S., Balamuralikrishnan, R., & Altarawneh, M. (2002). Eco-Friendly Asphalt Approach for the Development of Sustainable Roads. *Journal of Human, Earth and Future*, 1(3), 97-111. Retrieved from <https://www.hefjournal.org/index.php/HEF/article/view/45>
- Balay, J., Brosseaud, Y., Bara, B., & Castaneda, E. (2012). *Adaptation of the French pavement design to countries in South America*. France: Congrès theme jornadas international des Asfalto.
- Corte, J.-F. (1997). *French Design Manual for Pavement Structures*. Paris, France: Laboratoire Central des Ponts et Chausees (LCPC).
- COST 333 Management Committee. (1997). *Interim report on European pavement design methods*. Crowthorne, UK: Transport Research Laboratory.
- Divinsky, M., Livneh, M., & Nesichi, S. (1999). Load-Equivalency Factors Based on Extended California Bearing Ratio Method. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1684(1), 8-16.
- European Commission Directorate General Transport. (2001). *COST 334 Effects of Wide Single Tyres and Dual Tyres*. Luxembourg: European Communities.
- Federal Highway Administration. (2001). *Guide to LTPP Traffic Data Collection and Processing*. Washington, DC.
- Hajek, J. J. (1995). General Axle Load Equivalency Factors. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*(1482), 67-78.
- Muhammad , R., Rawid, K., Arsalaan , K., Muhammad Taimur , K., Irfan , A., Bashir , A., & Behram , W. (2018). Impact of axle overload, asphalt pavement thickness and subgrade modulus on load equivalency factor using modified ESALs equation. *Cogent Engineering*, 5(1), 1528044. doi:10.1080/23311916.2018.1528044
- NSW Roads and Transport Directorate. (2017). Implications of the 4th Power Law. *Information Sheet* (6), 1-2.

- NZ Forest Owners Association Inc. (2020). *NZ Forest Road Engineering Manual*. New Zealand: The New Zealand Forest Owners Association Incorporated (FOA).
- Pavement Tools Consortioum. (2022). Equivalent single axle load. Retrieved from <https://pavementinteractive.org/reference-desk/design/design-parameters/equivalent-single-axle-load/>
- Rys, D., Judycki, J., & Jaskula, P. (2016). Determination of vehicles load equivalency factors for polish catalogue of typical flexible and semi-rigid pavement structures. *Transportation Research Procedia*, 14, 2382-2391.
- Siddhartan , R., Krishnamenon , N., & Sebaaly , P. (2000). Pavement Response Evaluation Using Finite-Layer Approach. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1709(1), 43-49.
- Smith, B. C., & Diefenderfer, B. K. (2009). *Development of Truck Equivalent Single-Axle Load (ESAL) Factors Based on Weigh-in-Motion Data for Pavement Design in Virginia*. Virginia: Virginia Transportation Research Council.
- Sounthararajah, A., Bui, H. H., Jitsangiam, P., & Kodikara, J. (2015). *Development of new mechanistic pavement design approach for cement stabilized bases*. Colombo: International Conference on Geotechnical Engineering (ICGE).
- Uzan, J., & Sidess, A. (1990). Extension of Load Equivalency Factors for Various Pavement Conditions. *Transportation Reserch Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1286, 132-137.
- Λοϊζος, Α., & Πλατή , Χ. (2018). *Σχεδιασμός Οδοστρωμάτων Οδών και Αεροδρομίων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείου, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εργαστήριο Οδοποιίας.