

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ  
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Α. ΛΟΙΖΟΣ

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ  
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

3D

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΠΙΣΤΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2001

## **Πρόλογος**

Η επιστήμη των οδοστρωμάτων είναι μια προκλητική και σε ένα βαθμό ανεξερεύνητη επιστήμη. Ο λόγος πρέπει να αναζητηθεί στην ανομοιομορφία της σύνθεσης ενός οδοστρώματος το οποίο γενικά αποτελείται από πολλά ασύνδετα ή συνδεδεμένα υλικά διαφορετικών ιδιοτήτων το καθένα.

Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας έγινε προσπάθεια να εξερευνηθεί λίγο από το μυστήριο που περιβάλλει τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα. Με την βοήθεια λοιπόν, μίας από τις σύγχρονες μεθόδους ανάλυσης, της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, έγινε προσπάθεια προσομοίωσης και διερεύνησης της στατικής συμπεριφοράς τους.

Ευχαριστώ τον επίκουρο καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ανδρέα Λοϊζο για την ανάθεση καθώς και την υποστήριξη, την καθοδήγηση και την απαραίτητη κριτική καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας που κρατάτε στα χέρια σας.

Θερμά ευχαριστήρια και στον υποψήφιο διδάκτορα Γιώργο Χαρωνίτη για την βοήθεια και το ενδιαφέρον του.

*Δημήτριος Πιστής*

*Αθήνα, Μάρτιος 2001*

## Περιεχόμενα

### Κεφάλαια

<b>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	4
--------------------------	---

### 2. ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

2.1. Γενικά στοιχεία .....	7
2.2. Μόρφωση και υπολογισμός οδοστρωμάτων με Π.Σ. ....	8
2.3. Εφαρμογή στα οδοστρώματα .....	10

### 3. ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CAPA3D

3.1. Γενικά .....	14
3.2. Παρουσίαση του Capa3D .....	16
3.3. Γενική πορεία υπολογισμού μετατοπίσεων και εντατικών μεγεθών με το Capa3D .....	20
3.3.1. Κατασκευή πλέγματος φορέα (Mesh Generation) .....	20
3.3.2. Κατασκευή μητρώου ακαμψίας, τοποθέτηση φορτίου (FEM Analysis) .....	20
3.3.3. Παρουσίαση του πλέγματος και των υποχωρήσεων .....	21

### 4. ΗΜΙΑΚΑΜΠΤΑ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΑ

4.1. Γενικά Στοιχεία .....	22
4.2. Μηχανικά χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες .....	24

### 5. ΣΥΓΚΡΙΣΗ CAPA3D, BISAR, MICHPAVE

5.1. Γενικά .....	26
5.2. Ανάλυση με το λογισμικό Bisar .....	26
5.3. Ανάλυση με το λογισμικό Michpave .....	27
5.4. Ανάλυση με το λογισμικό Capa3D .....	28
5.4.1. Σχεδίαση προβλήματος .....	28
5.4.2. Λεπτομέρειες προσομοίωσης με το Capa3D .....	31
5.5. Αποτελέσματα – Παρατηρήσεις - Διαπιστώσεις .....	36

### 6. ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΑ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ (3D Finite Element).

6.1 Εισαγωγή .....	40
6.2 Οριζόντιες τάσεις στις διεπιφάνειες σε σχέση με πάχος και μέτρα ελαστικότητας .....	41
6.3 Διαγράμματα – Παρατηρήσεις – Σχόλια .....	42
6.4 Διερεύνηση αναλογίας $H_{κω}^2 \sim σ_{xx}$ .....	47

## **7 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΙΔΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΟΛΙΣΘΗΣΗ ΣΕ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΕΣ**

7.1 Γενικά περί συνεργασίας .....	50
7.2 Ολίσθηση μεταξύ στρώσεων σταθεροποιημένης βάσης .....	52
7.2.1 Συνθήκες μερικής Ολίσθησης .....	56
7.3 Ολίσθηση στη διεπιφάνεια ασφαλτομίγματος – ΚΘΑ .....	57
7.3.1 Συνθήκες μερικής Ολίσθησης ασφαλτομίγματος – ΚΘΑ .....	60

## **8 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΣΥΝΕΧΕΙΑΣ ΣΤΟ ΥΛΙΚΟ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΒΑΣΗΣ.**

8.1 Εισαγωγή .....	62
8.2 Παρουσίαση και ανάλυση στο Capa3D .....	62
8.3 Αποτελέσματα – παρατηρήσεις .....	65
8.3.1 Πλήρης συνεργασία στρώσεων .....	65
8.3.2 Πλήρης ολίσθηση μεταξύ στρώσεων .....	74
8.4 Ισοτασικά γραφήματα στον πυθμένα ασφαλτομίγματος .....	75

## **9 ΤΕΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ**

9.3 Τελικά συμπεράσματα .....	79
9.4 Επεκτάσεις .....	82

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....** ..... 85

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....** ..... 86

## 1. Εισαγωγή

Τα οδοστρώματα ως πολύπλοκα συστήματα εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους. Η συμπεριφορά τους είναι άμεσα ή έμμεσα συνδεδεμένη με παράγοντες όπως ιδιότητες υλικών, περιβαλλοντικές συνθήκες, σύνθεση κυκλοφορίας (φορτία, συχνότητα) και κατασκευαστικά στοιχεία. Η μελέτη και ο σχεδιασμός τους βασίζονται πολλές φορές σε εμπειρικές ή ημιεμπειρικές μεθόδους οι οποίες με την σειρά τους βασίζονται στην μακροχρόνια εμπειρία ή σε δοκιμές όπως το "AASHO Road test".[1]

Η συγκεκριμένη δοκιμή έλαβε μέρος στα τέλη της δεκαετίας του 1960 στις Η.Π.Α. και είναι η βάση για πολλά μοντέλα σχεδιασμού οδοστρωμάτων διεθνώς. Οι σχέσεις μεταξύ κυκλοφορίας και συμπεριφοράς οδοστρώματος που αποκτήθηκαν από αυτή την δοκιμή δεν ήταν εφικτό να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικές συνθήκες χωρίς σημαντικά προβλήματα [1]. Επίσης, η σχετική φθορά από τα χαρακτηριστικά των νέων οχημάτων, μάλλον διαφέρει αρκετά από αυτά του πειράματος AASHO. Σε αναζήτηση νέων μεθόδων πιο κατάλληλων και σύγχρονων έγιναν απόπειρες να συμπεριληφθούν χαρακτηριστικά νεώτερων τύπων οχημάτων και νέες παράμετροι ανάλυσης. Αυτές οι νέες μέθοδοι μπορούν να χωριστούν σε 2 γενικές κατηγορίες.

A. Εμπειρικές μέθοδοι (empirical) ανάλυσης που χρησιμοποιούν παρατηρούμενα δεδομένα, μετρήσεις, δοκιμές κ.α. για να εκτιμήσουν συμπεριφορά.

B. Αναλυτικές (analytical) μέθοδοι οι οποίες γενικά αξιοποιούν υπολογιστικά προσομοιώματα βασισμένα στην ελαστική θεωρία πολλαπλών στρώσεων ή άλλες θεωρήσεις για να εκτιμήσουν πάλι συμπεριφορά, διάρκεια ζωής κλπ.

Υπάρχουν και οι λεγόμενες «μηχανιστικές» μέθοδοι αλλά στην ουσία δεν είναι κάτι αρκετά διαφορετικό, αφού γενικά χρησιμοποιούν κατάλληλα στοιχεία και από τις δύο μεθόδους για την αναζήτηση αξιόπιστων αποτελεσμάτων.

Στις αναλυτικές οι παράμετροι του οδοστρώματος που χρειάζονται για την δημιουργία μοντέλων, εκτιμώνται με διάφορους τρόπους (δεδομένα μελέτης, επιτόπου και εργαστηριακές δοκιμές), ενώ μια ποικιλία προγραμμάτων Η/Υ καλύπτει την ανάγκη για τους απαιτούμενους υπολογισμούς των πολυστρωματικών συστημάτων.

Τα προγράμματα διακρίνονται σε αυτά που χρησιμοποιούν πεπερασμένα στοιχεία και άλλα που βασίζονται στη θεωρία των ελαστικών επαλλήλων στρώσεων (ή και άλλες θεωρήσεις όπως μη γραμμική ελαστική, ιξοελαστική, πλαστική κ.α.) που μπορούν να στρατολογηθούν ώστε να περιγράψουν την συμπεριφορά των εκάστοτε οδοστρωμάτων. Τα πεπερασμένα στοιχεία είναι αριθμητική μέθοδος και πλεονεκτούν στη γενική τους μορφή αφού μπορούν να χρησιμοποιήσουν διάφορες θεωρίες (ελαστική, ιξοελαστική, μη γραμμική κλπ) κάτι που δεν είναι δυνατό με ένα πρόγραμμα που εφαρμόζει αποκλειστικά και μόνο μία θεώρηση όπως Bisar, NOAH κλπ. [2]

Για την πιστοποίηση των αναλυτικών μοντέλων, απαιτείται κατάλληλη διαδικασία ελέγχου και βαθμονόμησης. Αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί με διάφορους τρόπους. Συχνά χρησιμοποιούνται μονέλα επιταχυνόμενης φόρτισης (accelerated load models) που δεν είναι τίποτα άλλο από διατάξεις που καταπονούν το εξεταζόμενο οδόστρωμα ανάλογα με την πραγματική καταπόνηση που θα είχε σε όλη του την ζωή, αλλά σε πολύ μικρότερο χρόνο. Εάν τα αποτελέσματα κριθούν επαρκώς συμβατά τότε το αναλυτικό μοντέλο είναι υποψήφιο για χρήση στην εκτίμηση οδοστρωμάτων.

Τα πεπερασμένα στοιχεία αν και καταξιωμένος τρόπος ανάλυσης από μηχανικούς σε άλλους τομείς, στα οδοστρώματα σχετικά πρόσφατα αρχίζουν να κάνουν τα πρώτα βήματα. Γενικά διεθνώς, πιστεύεται ότι παρουσιάζουν έντονο ενδιαφέρον [3], αλλά η χρησιμοποίηση τους απαιτεί αυξημένες γνώσεις χειρισμού ηλεκτρονικού υπολογιστή (Υ/Η) και τα αποτελέσματά τους πρέπει πρώτα να ελεγχθούν κατάλληλα ώστε αποκτήσουν αξιοπιστία.

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση με την βοήθεια της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων ημιάκαμπτου οδοστρώματος σε τρισδιάστατη ανάλυση (3D Finite Elements) και η προσπάθεια κατανόησης των παραμέτρων του πάχους και μέτρου ελαστικότητας των εκάστοτε στρώσεων. Για να μελετηθεί όμως ένα νέο, σχετικά άγνωστο λογισμικό είναι χρήσιμο να συγκριθεί με κάποια άλλα γνωστά και δοκιμασμένα στον χώρο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν τα Bisar (ελαστικής θεωρίας πολλαπλών στρώσεων) και Michpave (πεπερασμένων στοιχείων σε 2 διαστάσεις). Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε, με την χρήση των πεπερασμένων στοιχείων, η προσομοίωση του ημιάκαμπτου οδοστρώματος και διερευνήθηκαν οι επιρροές στις οριζόντιες τάσεις του πάχους των επιμέρους στρώσεων και τα μέτρα ελαστικότητας των υλικών. Επίσης, έγινε προσπάθεια για προσομοίωση οδοστρώματος πριν και μετά την ύπαρξη ασυνέχειας σε ολόκληρο το σταθεροποιημένο υλικό βάσης. Ακόμα, κρίθηκε απαραίτητη η εξέταση με προσομοιώματος με ολίσθηση μεταξύ των στρώσεων καθώς και η διερεύνηση σε συνθήκες μερικής τους συνεργασίας. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τρισδιάστατη ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία ήταν το *Capa3D version 1.1*. Στα επόμενα κεφάλαια αναλύεται τα θέμα πιο συγκεκριμένα ως εξής:

2. Πεπερασμένα στοιχεία και οδοστρώματα.
3. Το πρόγραμμα Capa3D.
4. Ημιάκαμπτα οδοστρώματα.
5. Σύγκριση Capa3D, Bisar, Michpave
6. Διερεύνηση προσομοιώματος με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία (3D).
7. Διερεύνηση ειδικού προσομοιώματος με ολίσθηση σε διεπιφάνειες.
8. Προσομοίωση και διερεύνηση ασυνέχειας στο υλικό σταθεροποιημένης βάσης.
9. Τελικά συμπεράσματα - επεκτάσεις

## 2. Πεπερασμένα Στοιχεία και οδοστρώματα

### 2.1 Γενικά στοιχεία

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Π.Σ.) είναι σχετικά καινούρια αφού χρησιμοποιείται μόλις το τελευταίο μισό του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Η μαθηματική γνώση προϋπήρχε από τα τέλη του 19<sup>ου</sup>, αλλά η απαίτηση της μεθόδου σε υπολογισμούς καθιστούσε αδύνατη τη χρήση της. Μόνο μετά την εξέλιξη των πρώτων ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων το 1950 δημιουργήθηκαν οι κατάλληλες συνθήκες. Τότε οι μηχανικοί άρχισαν να εγκαταλείπουν τις προσεγγιστικές μεθόδους και στράφηκαν προς τις αναλυτικές. Η μέθοδος των Π.Σ. αποτέλεσε αυτό που ονομάζουμε «μητρωϊκή ανάλυση κατασκευών» με κύρια εφαρμογή τους ραβδωτούς φορείς. Στη δεκαετία του '60 λοιπόν, η ανάγκη για αεροναυπηγικές κατασκευές ικανές για μεγάλες ταχύτητες, ανάγκασαν τους μελετητές/ερευνητές να εφεύρουν λύσεις για τον λεπτομερέστερο υπολογισμό των εντατικών μεγεθών των αεροσκαφών. Ήτσι αναπτύχθηκαν ιδέες προπομποί των πεπερασμένων στοιχείων. Σύμφωνα με αυτές η κατασκευή ενός αεροσκάφους χωρίζονταν σε μικρότερα τμήματα-στοιχεία που συνδέονταν μεταξύ τους με κόμβους. Με αργούς ρυθμούς η μέθοδος αυτή πέρασε σχεδόν σε όλες τις κατασκευές με υψηλές απαιτήσεις ανάλυσης αφού αποδείχτηκε επαρκώς αξιόπιστη [1]. Ήξω από την εξέλιξη δεν θα μπορούσε να μείνει και ο τομέας έργων πολιτικού μηχανικού, αλλά ούτε και η επιστήμη των οδοστρωμάτων.

Τα πεπερασμένα στοιχεία (Π.Σ.) αποτελούν επέκταση της μητρωϊκής ανάλυσης των ραβδωτών κατασκευών στις ολόσωμες κατασκευές. Η κατασκευή υποδιαιρείται σε στοιχεία ίδιου υλικού και η σύνδεσή τους γίνεται σε ένα αριθμό διακριτών σημείων τους κόμβους. Η ικανοποίηση των σχέσεων ισορροπίας και συμβιβαστού παραμορφώσεων περιορίζεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων κατασκευής. Για να αποκτηθεί θεωρητικά απολύτως ακριβή λύση πρέπει το μέγεθος των στοιχείων να γίνει απειροστό.

Αν το μέγεθος των στοιχείων είναι πεπερασμένο τα αποτελέσματα θα είναι προσεγγιστικά, θα περιέχουν δηλαδή κάποιο σφάλμα που θα γίνεται μικρότερο όσο το μέγεθος των στοιχείων μειώνεται. Γενικά, με βάση τις δυνατότητες των σημερινών λογισμικών το σφάλμα αυτό θεωρείται αποδεκτό. Με τον κατακερματισμό της κατασκευής, αντικαθίσταται ο σύνθετος φορέας από ένα σύνολο απλών πεδίων τα οποία και ονομάζονται πεπερασμένα στοιχεία και εμφανίζουν αυτόνομες τάσεις και παραμορφώσεις.

## 2.2 Μόρφωση και υπολογισμός κατασκευής με Π.Σ.

Η ακρίβεια της αναλύσεως της συγκεκριμένης μεθόδου είναι συνάρτηση της ικανότητας των στοιχείων να προσομοιώνουν την συμπεριφορά του τμήματος που αντικαθιστούν. Εκεί παίζει ρόλο και η διακριτοποίηση του φορέα. Η διακριτοποίηση γίνεται ανάλογα με το σχήμα, τα φορτία και τα υλικά. Η αύξηση του αριθμού των στοιχείων προκαλεί και αύξηση των προσδιοριστέων κομβικών παραμέτρων[4]. Κάτι τέτοιο μπορεί να προσκρούσει σε πρακτικά προβλήματα (ισχύς και μνήμη Η/Υ) ή σε αύξηση κόστους (σε χρόνο ή χρήμα). Για τους λόγους αυτούς γίνεται κατάλληλη μείωση του αριθμού των στοιχείων όπως, πύκνωση των στοιχείων σε περιοχές που αναμένονται ραγδαίες μεταβολές των εντατικών και παραμορφωσιακών μεγεθών ή απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια.

Κάθε πεπερασμένο στοιχείο δεν παύει να έχει την ίδια συμπεριφορά με το αρχικό σώμα και να υπόκειται στις ίδιες καταστατικές εξισώσεις [4]. Αναζητείται επομένως, μια σχέση που να συνδέει τις μετατοπίσεις σε κάθε στοιχείο με κάποιες κομβικές παραμέτρους και στη συνέχεια υπολογίζεται με την εφαρμογή της αρχής των δυνατών έργων (Α.Δ.Ε.) το τοπικό μητρώο ακαμψίας. Για τον προσδιορισμό των μετατοπίσεων σε κάθε στοιχείο θεωρούμε πως αν γνωρίζουμε τις μετατοπίσεις των κόμβων ενός στοιχείου μπορούμε να εκφράσουμε τις μετατοπίσεις ενός σημείου μέσα στο στοιχείο με τη βοήθεια μιας κατάλληλης παρεμβολής. Όσο μικρότερο το μέγεθος του

στοιχείου, τόσο μικρότερο και το σφάλμα με αυτή την παραδοχή. Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις υπολογίζουμε τις παραμορφώσεις και τις τάσεις. Με την εφαρμογή της Α.Δ.Ε. στο απομονωμένο στοιχείο, θεωρώντας ως εξωτερικά φορτία τις τάσεις που προκαλούνται από το υπόλοιπο σώμα, προσδιορίζονται κάποιες ισοδύναμες «κομβικές δυνάμεις». Δυνάμεις που δρουν στους κόμβους και παράγουν έργο όσο και το κατανεμημένο φορτίο Τ. Με την ίδια διαδικασία προσδιορίζεται και το τοπικό μητρώο ακαμψίας.

Η διαμόρφωση του τελικού συστήματος ακαμψίας προκύπτει από την Α.Δ.Ε. πάλι, σε όλο το σώμα, οπότε προκύπτει μια σχέση (μητρώων) τύπου:

**$K \bullet r = R$**  όπου:

- $r$  μητρώο κομβικών μετατοπίσεων ελεύθερων κόμβων κατασκευής
- δυνάμεις  $R$  που δρουν στους μη παγιωμένους κόμβους κατασκευής
- και  $K$  μητρώο ακαμψίας όλης της κατασκευής.

Στη συνέχεια επιλύεται το σύστημα ακαμψίας και γνωρίζοντας τις κομβικές μετατοπίσεις, προσδιορίζονται οι μετατοπίσεις σε κάθε σημείο κατασκευής και φυσικά τα ζητούμενα εντατικά και παραμορφωσιακά μεγέθη. Στη συγκεκριμένη φάση προτιμάται συνήθως, η μέθοδος απαλοιφής Gauss για μικρότερες απαιτήσεις σε μνήμη και υπολογιστική ισχύ. Σημαντικό στην επίλυση, ιδιαίτερα για τα οδοστρώματα, το γεγονός πως οι διαφορετικές στρώσεις δεν συνεργάζονται πάντοτε μεταξύ τους, με αποτέλεσμα κατά μήκος των ορίων των στοιχείων οι τιμές των ανηγμένων παραμορφώσεων να παρουσιάζουν μεγάλη ασυνέχεια. Το μειονέκτημα αυτό ξεπερνιέται με την εισαγωγή των σημείων "Gauss" τα οποία σε συνδυασμό με το κέντρο του στοιχείου και την εφαρμογή της γραμμικής παρεμβολής σε κοντινά σημεία δίνουν ικανοποιητικές τιμές [5].

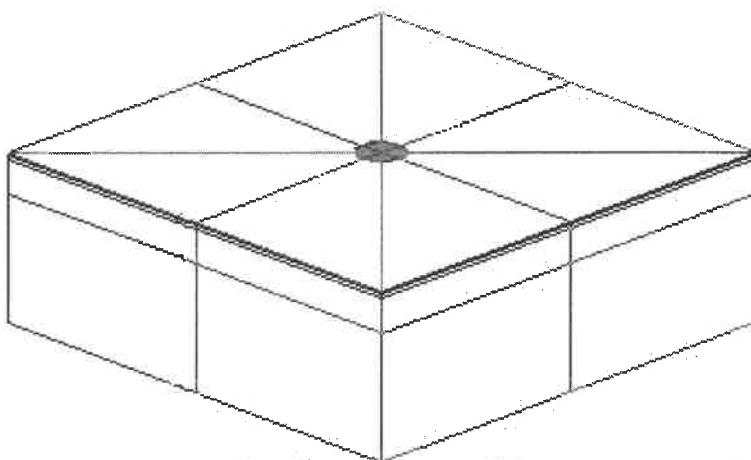
## 2.3 Εφαρμογή στα οδοστρώματα

Ένα από τα ενδιαφέροντα πεδία για ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία (Π.Σ.) είναι τα οδοστρώματα δεδομένου ότι τα τελευταία αποτελούν σύνθετα πολυστρωματικά συστήματα με ανομοιόμορφα χαρακτηριστικά.

Τα οδοστρώματα γενικά, χωρίζονται σε εύκαμπτα, δύσκαμπτα και ημιάκαμπτα (ή ημιεύκαμπτα). Στη συγκεκριμένη εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με τα ημιάκαμπτα για τα οποία ακολουθούν περισσότερα στοιχεία σε επόμενο κεφάλαιο.

Τρόποι προσέγγισης με πεπερασμένα στοιχεία και χαρακτηριστικές παραδοχές:

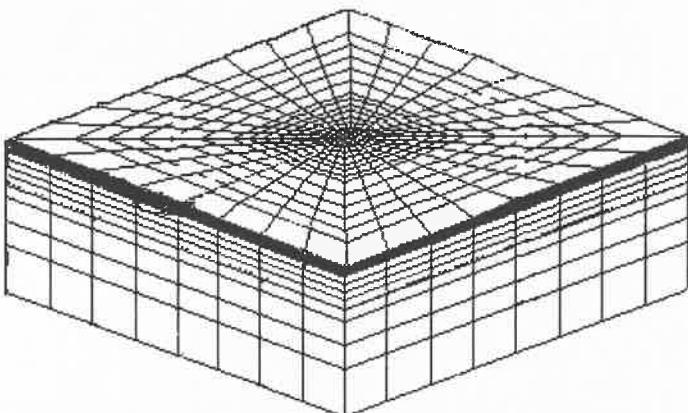
- Το απλούστερο πλέγμα που μπορεί να κατασκευαστεί είναι ένα πλέγμα εντελώς ομοιόμορφο (κανονικό). Κάτι τέτοιο δεν προσφέρεται εδώ γιατί υπάρχει μία περιοχή γύρω από το φορτίο του τροχού που εμφανίζονται σημαντικές τάσεις και μετατοπίσεις. Άρα για καλύτερη προσέγγιση και μικρότερο μέγεθος αριθμού εξισώσεων πυκνώθηκε κατάλληλα το πλέγμα γύρω από το κατανεμημένο φορτίο του τροχού. (σχήμα 2.1)



Μορφή ολόκληρου εξεταζόμενου φρέα ήχη με τα superelements  
Διακρίνεται με κοκκινό το κυκλικό πεδίο του φορτίου

**Σχήμα 2.1** Μόρφωση ολόκληρου πλέγματος για εξέταση με πεπερασμένα στοιχεία. Ο χωρισμός είναι σε υπερστοιχεία που χρειάζεται το Capa3D.

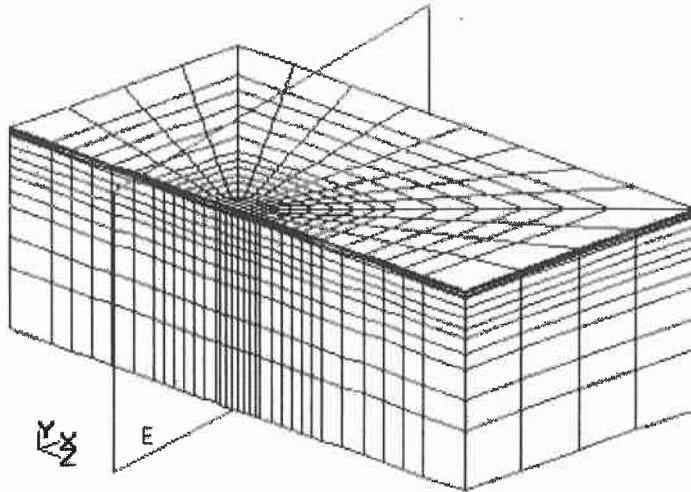
- Το φορτίο κάθε τροχού προσομοιώνεται με ένα κατακόρυφο, ομοιόμορφα κατανεμημένο φορτίο κυκλικής κάτοψης (σχήμα 2.1). Αυτή είναι η συνηθέστερη προσομοίωση του φορτίου. Ωστόσο υπάρχουν μελέτες και εργασίες που έχουν χρησιμοποιήσει τετραγωνικής επιφάνειας φορτίο [1]. Αποτέλεσμα του τελευταίου η δημιουργία πιο εύκολου αλλά πιθανών μειωμένης ακρίβειας πλέγματος.
- Για τις αναλύσεις λαμβάνεται τμήμα οδοστρώματος με αφετηρία το κέντρο του τροχού. Η εξέταση δεν εμπεριέχει το μέγεθος του χρόνου (στατική καταπόνηση) και έτσι ο προσανατολισμός της κίνησης δεν έχει σημασία όπως θα δούμε και παρακάτω.



Η μορφή ολόκληρου φορέα για εξέταση

**Σχήμα 2.2 Μόρφωση του φορέα μετά την τελική διακριτοποίηση των υπεστοιχείων**

- Από τα σχήματα 2.2 και 2.3 παρατηρείται η συμμετρία κατά X και Z κατακόρυφα επίπεδα. Τις χρησιμοποιούμε για να απλοποιήσουμε τον κάναβό μας αφού οι υπολογισμοί για το  $\frac{1}{4}$  του πεδίου μειώνονται πάρα πολύ όπως και ο χρόνος υπολογισμού χωρίς μεγάλο κόστος στα αποτελέσματα



**Σχήμα 2.3** Το μισό πλέγμα και το επίπεδο συμμετρίας του.

- Η ακτίνα 3 μέτρων από τον τροχό επιλέχτηκε λαμβάνοντας υπόψη τον κανόνα του 10α ( $a=15\text{εκ}$ )[6] ως όριο πέραν του οποίου τα μεγέθη είναι απειροελάχιστα και έτσι αποδείχτηκε και στη συνέχεια. Στα όρια αυτά τοποθετούνται κατάλληλες στηρίξεις ώστε να αποκατασταθεί η συνέχεια του φορέα (οδοστρώματος). Στα πλάγια τοιχώματα απελευθερώνεται μόνο η κατακόρυφη μετακίνηση, στην άνω επιφάνεια δεν εφαρμόζεται καμία δέσμευση και στην κάτω επιφάνεια δεσμεύονται όλες τις μετακινήσεις.
- Το έδαφος (δηλαδή η στρώση έδρασης) έπρεπε να διαστασιολογηθεί με κάποιο πάχος για την λειτουργία του προγράμματος. Επιλέχτηκε η τιμή των 3 μέτρων αν και μεγάλη τιμή αφού τα εντατικά μεγέθη πρακτικά μηδενίζονται σε πολύ μικρότερο βάθος.
- Στη ανάλυση με ασυνέχεια, η ασυνέχεια υλικού προσομοιώθηκε χωρίς να ληφθεί υπόψη η ενδεχόμενη επίδραση υλικού πλήρωσής της. Επίσης δεν έχει ληφθεί υπόψη η ύπαρξη τριβών μεταξύ των παρειών που οδηγεί σε κάποια σχετική συνεργασία.
- Όπου δεν αναφέρεται διαφορετικά, οι τιμές που υπολογίστηκαν είναι στον κατακόρυφο άξονα που διέρχεται από το κέντρο του φορτίου. Στην

προκείμενη περίπτωση στην άκρη του πλέγματος πάνω στον άξονα Y (σύμφωνα με το πρόγραμμα). Οι οριζόντιοι άξονες για το Capa3D είναι οι X, Z.

- Κατά την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε πλήρης συνεργασία μεταξύ των στρώσεων αλλά και ολίσθηση πλήρης ή μερική με την βοήθεια κατάλληλου μηχανισμού των προγραμμάτων [βλ. Κεφ. 7].

### 3. Το πρόγραμμα Capa3D

#### 3.1 Γενικά

Το Capa3D είναι ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή το οποίο δημιουργήθηκε για την ανάλυση κατασκευών σε τρεις διαστάσεις, με πεπερασμένα στοιχεία. Σκοπός του, ο υπολογισμός μετατοπίσεων, τάσεων και ανηγμένων παραμορφώσεων σε φορείς και σε κατασκευές πολυστρωματικών συστημάτων συμπεριλαμβανομένων των οδοστρωμάτων [2]. Αναπτύχθηκε στο τμήμα μηχανικής (Structural Mechanics) του Πολυτεχνείου TU Delft από τους Σκάρπας – Kasbergen για ερευνητικούς σκοπούς. Στα πλαίσια συνεργασίας του τμήματος αυτού και του τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Ε.Μ.Π. στην περιοχή οδοστρωμάτων, το πρόγραμμα αυτό έχει προσφερθεί για τη διεξαγωγή αναλύσεων και τη βελτίωσή του.

Το Capa3D προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα σε σχέση με αντίστοιχα προγράμματα:

- Είναι μια παραθυρική εφαρμογή σε περιβάλλον Microsoft Windows 95-98, NT, Με όσον αφορά την εισαγωγή και έλεγχο δεδομένων, άρα και ιδιαίτερα φιλικό για χρήστες χωρίς ιδιαίτερες γνώσεις προγραμματισμού. Πολύ σημαντική για την επιτάχυνση της διαδικασίας, η δυνατότητα εισαγωγής των δεδομένων μέσω αρχείου απλού κειμένου (text).
- Δίνει εποπτική εικόνα του πλέγματος που δημιουργήθηκε στο φορέα, όσο και των υποχωρήσεων, έχοντας την δυνατότητα παρουσίασης οποιουδήποτε συνόλου στοιχείων από όποια γωνία επιθυμούμε.
- Η ανάλυση γίνεται σε τρεις διαστάσεις προσφέροντας την καλύτερη δυνατή ακρίβεια σύμφωνα με την σημερινή τεχνολογία. Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιεί (Frontal solution) θεωρείται από τις πλέον αποτελεσματικές. Η δε

εφαρμογή της σε τρεις διαστάσεις αποτελεί καινοτομία δεδομένου ότι ελάχιστα αξιοποιείται με αυτό τον τρόπο (δύσκολος προγραμματισμός).

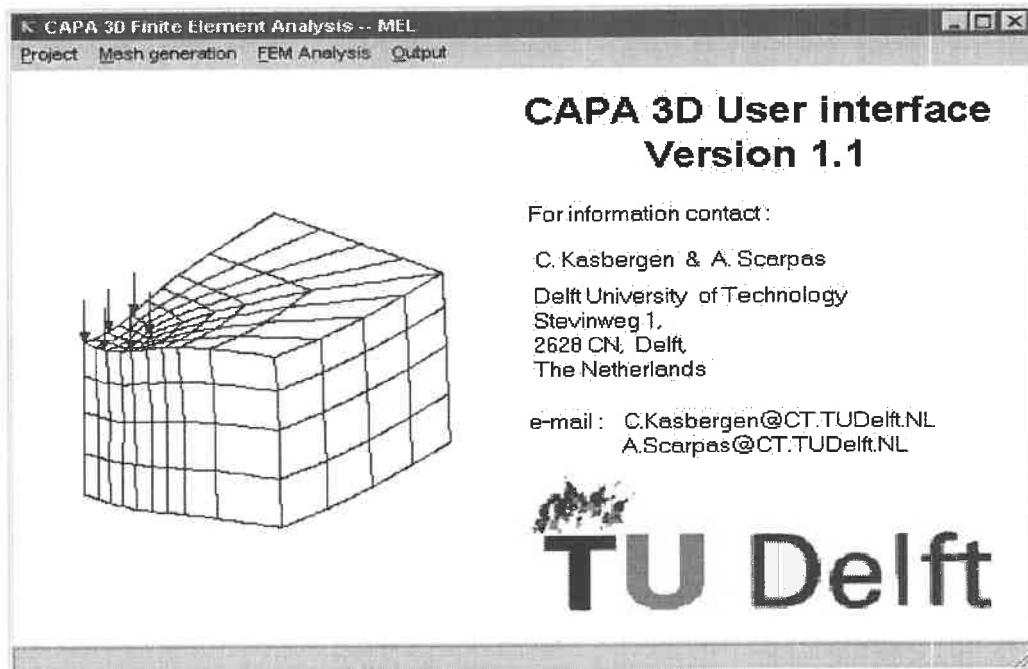
Παράλληλα με τα πλεονεκτήματα πρέπει να αναφερθούν και σημεία που χρήζουν βελτίωσης, όπως:

- Η εισαγωγή των δεδομένων από το περιβάλλον που προσφέρει το ίδιο το πρόγραμμα είναι και χρονοβόρα και δύσκολη στην εποπτεία, οπότε η εισαγωγή μέσω αρχείου κειμένου στις περισσότερες περιπτώσεις είναι ευχερέστερη.
- Τα αποτελέσματα των τάσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων δεν παρουσιάζονται στους κόμβους, αλλά στα σημεία "Gauss". Επομένως, η περαιτέρω επεξεργασία των αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό αποτελεσμάτων στα σημεία κόμβων (που είναι και τα συνηθέστερα) με χρήση παρεμβολών, είναι αναγκαία και ιδιαίτερα χρονοβόρα. Η δημιουργία αυτών των παρεμβολών μέσα στο πρόγραμμα και εύκολη είναι, για τους δημιουργούς, αλλά και θα αποδειχτεί σημαντική βελτίωση στη φιλικότητα χρήσης και ολοκλήρωσης του προγράμματος.
- Μικρό μειονέκτημα και ο τρόπος απόδοσης των αποτελεσμάτων σε απλά αρχεία (text) αφού είναι σχεδόν αδιαμόρφωτα και δυσνόητα σε μη εξοικειωμένους χρήστες.

### 3.2 Παρουσίαση του Capa3D

Το πρόγραμμα περιέχει τέσσερα βασικά menus:

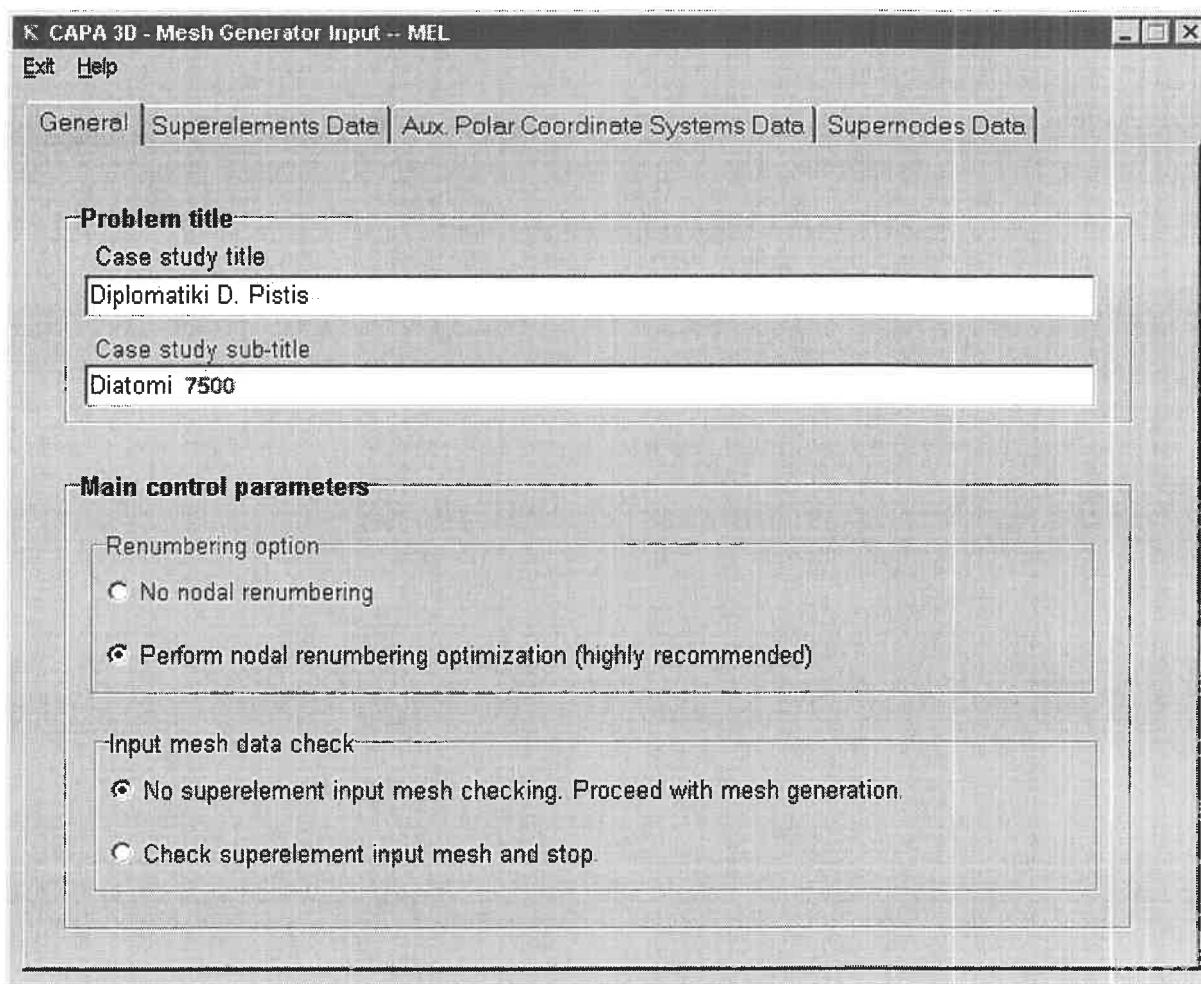
Project: βασικές πληροφορίες όπως εισαγωγή ονόματος εργασίας, χρήστη και ημερομηνίας. (Εικόνα 3.1)



Εικόνα 3.1

Mesh Generation: Δημιουργία πλέγματος φορέα, με επιλογές: (Εικόνα 3.2)

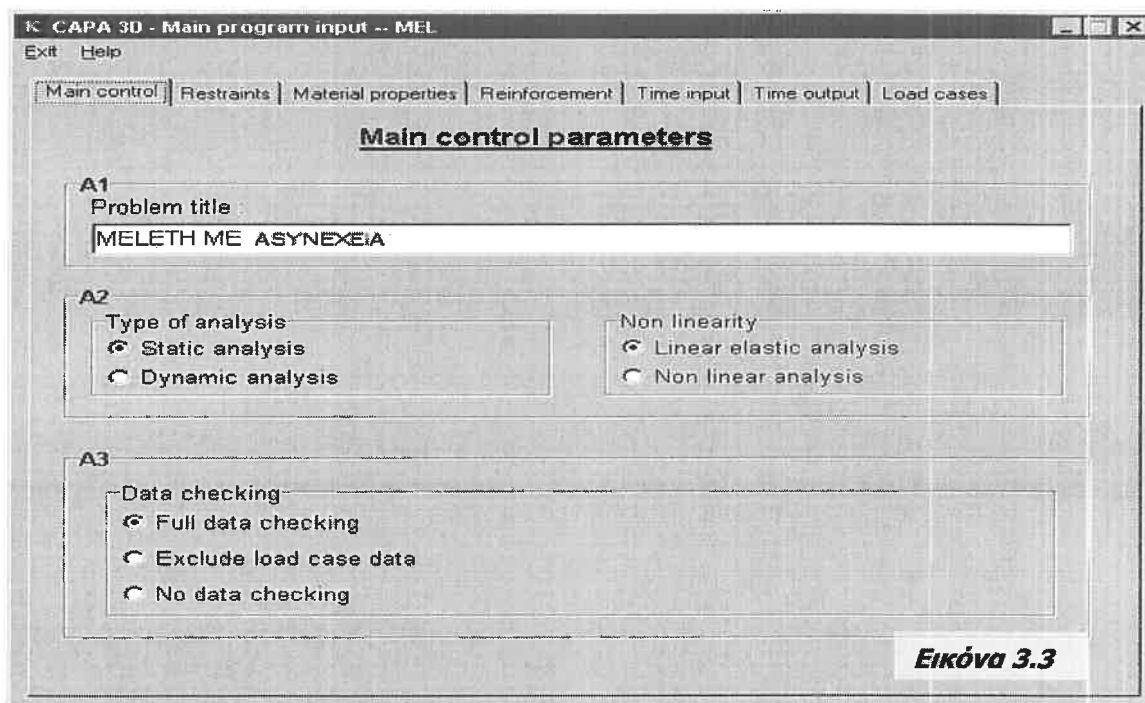
- *General:* Όνομα και γενικές ρυθμίσεις πλέγματος.
- *Super Elements Data:* Εισαγωγή δεδομένων υπερστοιχείων.
- *Auxiliary Polar System Coordinate System Data:* Εισαγωγή πολικού συστήματος συντεταγμένων (προαιρετικό).
- *Supernodes Data:* Εισαγωγή συντεταγμένων κόμβων υπερστοιχείων.
- *Generate Mesh:* Εντολή για διακριτοποίηση υπερστοιχείων, επαναρίθμηση κόμβων και δημιουργία πλέγματος.



Εικόνα 3.2

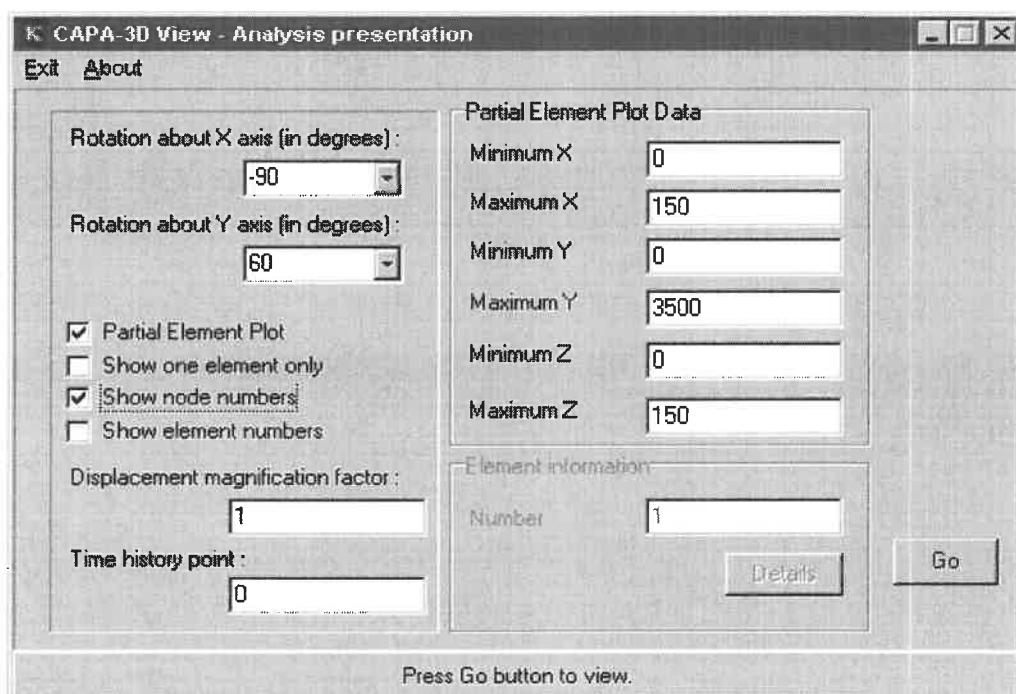
FEM Analysis / Input Analysis Data: Ανάλυση και επίλυση φορέα. (Εικόνα 3.3)

- **Main Control:** Είδος ανάλυσης (Στατική ή δυναμική, γραμμική ελαστική ή όχι κοκ).
- **Restraints:** Περιορισμοί βαθμών ελευθερίας του συστήματος.
- **Material Properties:** Χαρακτηριστικά των υλικών του οδοστρώματος που παίρνουν μέρος στην ανάλυση.
- **Reinforcement:** Δεδομένα προέντασης για προεντεταμένους φορείς.
- **Time input:** Δεδομένα χρόνου και βημάτων φορτίσεων.
- **Time output:** Τα επιθυμητά σημεία προβολής (κόμβοι σημεία, Gauss) των αποτελεσμάτων.
- **Load Cases:** Είδος και δεδομένα φόρτισης.
- **Run Analysis:** Εντολή υπολογισμού των υποχωρήσεων και εντατικών μεγεθών.



### Output: Τρισδιάστατες απεικονίσεις. (Εικόνα 3.4)

- Mesh View: Απεικόνιση πλέγματος και ρυθμίσεις.
- Analysis Presentation: Απεικόνιση πλέγματος με τις υπολογισμένες υποχωρήσεις με δυνατότητα προσδιορισμού χρόνου και μεγέθυνσης υποχωρήσεων.



**Εικόνα 3.4**

### 3.3 Γενική πορεία υπολογισμού μετατοπίσεων και εντατικών μεγεθών με το Capa3D.

#### 3.3.1 Κατασκευή πλέγματος φορέα (Mesh Generation)

Η διαδικασία του υπολογισμού αρχίζει με την κατασκευή του πλέγματος. Η αντιμετώπιση του πλέγματος στο συγκεκριμένο πρόγραμμα γίνεται με τον χωρισμό σε δύο φάσεις. Πρώτα δημιουργούνται τα κομβικά (20 σημείων) υπερστοιχεία (super elements) τα οποία σχηματίζονται όσο το δυνατόν μεγαλύτερα διατηρώντας ωστόσο απλό γεωμετρικό σχήμα και αποτελούμενα από ίδια υλικά και στοιχεία με κοινή μηχανική συμπεριφορά. Έτσι στα οδοστρώματα τα επιμέρους στρώματα μπορούν να σχηματίσουν αρχικά τα υπερστοιχεία. Εισάγονται οι συντεταγμένες των κόμβων και έτσι καθορίζεται η θέση τους μέσα στο χώρο. Ιδιαίτερη μνεία πρέπει να γίνει στην ονοματολογία των αξόνων που έχει ιδιαιτερότητα. Ο κατακόρυφος άξονας είναι ο Y και οι οριζόντιοι άξονες είναι οι X,Z.

Ολοκληρώνουμε την διακριτοποίηση με εσωτερικό κατάλληλο τεμαχισμό των υπερστοιχείων, σε τρεις διαστάσεις, πυκνώνοντας όπου είναι απαραίτητο.

Η επιλογή της *αυτόματης αναδιάταξης και επαναρίθμησης των κόμβων* είναι μια καλή κίνηση αφού το κέρδος σε χρόνο από την μείωση του όγκου των δεδομένων είναι σημαντικό.

#### 3.3.2 Κατασκευή μητρώου ακαμψίας, τοποθέτηση φορτίου (FEM Analysis)

Αρχίζοντας, καθορίζουμε το είδος ανάλυσης (στατική – δυναμική, μη γραμμική κλπ). Στη συνέχεια τοποθετούμε τους περιορισμούς, δηλαδή το είδος στηρίξεων. Στα πλάγια τοιχώματα απελευθερώνουμε μόνο την κατακόρυφη μετακίνηση, στην άνω επιφάνεια δεν εφαρμόζουμε καμία δέσμευση και στην κάτω επιφάνεια δεσμεύουμε όλες τις μετακινήσεις. Απαραίτητα φυσικά, τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υπό ανάλυση υλικών. Υπάρχει επιλογή και θερμοκρασιακής φόρτισης, κάτι το οποίο όμως δεν ελήφθη υπόψη στην

προκείμενη άσκηση. Απαραίτητη και η φόρτιση με όλα τα χαρακτηριστικά της όπως: μέγεθος, χρόνος, μεταβολή σε σχέση με το χρόνο, είδος (σημειακή, κατανεμημένη κ.α.). Τέλος καταγράφουμε τους κόμβους και τα σημεία “Gauss” όπου χρειαζόμαστε αποτελέσματα με την βοήθεια πάντα της απεικόνισης του πλέγματος για τον προσδιορισμό της αρίθμησης των κόμβων και στοιχείων.

Είμαστε πια έτοιμοι για το «τρέξιμο» της ανάλυσης, η οποία δημιουργεί το ολικό μητρώο ακαμψίας και επιλύει το σύστημα. Τα αποτελέσματα καταχωρούνται στο αρχείο \*.OUT σε μορφή απλού κειμένου.

### **3.3.3 Παρουσίαση του πλέγματος και των υποχωρήσεων**

Μια δυνατότητα να ελέγχουμε τα αποτελέσματα ή να τα παρουσιάσουμε μας δίνει η επιλογή Output στις κύριες επιλογές. Με το analysis presentation μπορούμε να δούμε την μορφή που έχει πάρει ο φορέας μετά την φόρτιση (με δυνατότητα μεγέθυνσης των παραμορφώσεων) και να παρατηρήσουμε την ορθότητά του αποτελέσματος σε μια γενική ματιά.

Για την παρουσίαση πριν, κατά την διάρκεια (δυναμική ανάλυση) και μετά την ολοκλήρωση της φόρτισης οι επιλογές είναι πολλές, όπως και οι δυνατότητες οπτικής γωνίας.

\* το όνομα που έχουμε δώσει στην εκάστοτε ανάλυση

## 4. Ημιάκαμπτα οδοστρώματα

### 4.1 Γενικά στοιχεία

Η προσομοίωση και ανάλυση οδοστρωμάτων με πεπερασμένα στοιχεία (3D) είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και απαιτητική σε εργασία σε σχέση με άλλες μεθόδους. Κρίθηκε επομένως καταλληλότερο η παρούσα εργασία να αναφερθεί περισσότερο σε θέματα προσομοίωσης, ανάλυσης, και συμπερασμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου των Π.Σ. (3D) και λιγότερο στη διερεύνηση και το σχολιασμό της υπάρχουσας σχετικής εμπειρίας.

Τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα είναι οδοστρώματα με βάση από σταθεροποιημένα υλικά. Πολλές φορές τα υλικά που διατίθενται κοντά στο έργο δεν ικανοποιούν τις απαιτήσεις για κατασκευή βάσεων και υποβάσεων ή σε περιπτώσεις όπου οι απαιτήσεις κυκλοφορίας είναι αυξημένες τότε οι μηχανικοί μπορούν να καταφύγουν στην λύση της κατεργασίας των υλικών με υδραυλικές ή άλλες κονίες ώστε να έχουν βελτιωμένα μηχανικά χαρακτηριστικά[7].

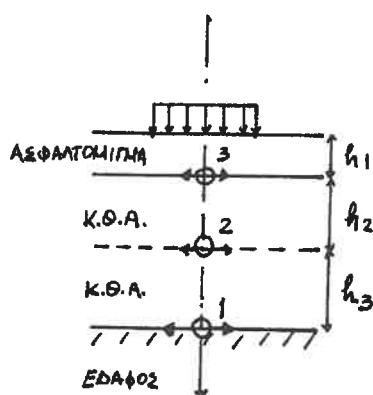
Στην περίπτωση αυτοκινητοδρόμων που οι απαιτήσεις είναι μεγάλες το απαιτούμενο πάχος ασφαλτομίγματος για ένα εύκαμπτο οδόστρωμα είναι σχετικά μεγάλο όπως και των στρώσεων βάσεων. Στην αντίθετη περίπτωση η εντατική κατάσταση στις κρίσιμες θέσεις είναι αρκετά δυσμενής και συνεπάγεται μικρή ζωή. Εδώ έρχεται η λύση των ημιακάμπτων που βρίσκονται ανάμεσα στις λύσεις των ευκάμπτων και δύσκαμπτων χωρίς το κόστος σε χρήμα των τελευταίων[7]. Τα πλεονεκτήματα των ημιακάμπτων είναι το αυξημένο μέτρο ελαστικότητας της βάσης σχετικά με του ασφαλτομίγματος το οποίο δημιουργεί θλιπτικές τάσεις στον πυθμένα του και ο κίνδυνος αστοχίας από κόπωση του ασφαλτομίγματος, πρακτικά δεν υφίσταται. Κάτι τέτοιο δεν μπορεί να επιτευχθεί χωρίς κατεργασία του υλικού της βάσης γιατί οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας χωρίς σταθεροποίηση κυμαίνονται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα. Επίσης μειώνονται και οι κατακόρυφες τάσεις στην επιφάνεια της

στρώσης έδρασης και εξασφαλίζεται συνήθως το οδόστρωμα και από αστοχία της στρώσης έδρασης. Ένα άλλο πλεονέκτημα που πρέπει να επισημανθεί είναι το μειωμένο πάχους ασφαλτομίγματος που απαιτούν, γεγονός το οποίο οδηγεί σε ελάττωση του κινδύνου δημιουργίας τροχοαυλακώσεων και παρέχουν την δυνατότητα υποβιβασμού του κόστους κατασκευής αλλά και της συντήρησης εξαιτίας των μειωμένων αυλακώσεων.

Η βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών των εδαφικών υλικών, κατά κανόνα, μπορεί να γίνει με μία από τις ακόλουθες μεθόδους:

- i. Μηχανική σταθεροποίηση
- ii. Σταθεροποίηση με άσβεστο
- iii. Σταθεροποίηση με τσιμέντο
- iv. Σταθεροποίηση με ιπτάμενη τέφρα και ασβέστη ή τσιμέντο
- v. Σταθεροποίηση με μεταλλουργικές σκωρίες
- vi. Σταθεροποίηση με άσφαλτο
- vii. Σταθεροποίηση με χημικές ουσίες

Η αντιμετώπιση ενός ημιακάμπτου οδοστρώματος διαφέρει από ενός ευκάμπτου γιατί είναι διαφορετική η δομική απόκριση στις καταπονήσεις και γενικά στην συμπεριφορά τους. Οι κατεργασμένες στρώσεις λόγω της μεγάλης ακαμψίας μεταθέτουν τα «κρίσιμα σημεία» και τόσο η διαστασιολόγηση όσο και η διερεύνηση διαφέρει. Σύμφωνα με μετρήσεις του ΕΜΠ και του ΑΠΘ σε συνεργασία με το ΤΕΟ [7], η κυκλοφορία σε ορισμένα τμήματα του ελληνικού οδικού δικτύου, είναι τόσο βαριά που απαιτούνται πάχη ασφαλτικών εύκαμπτων οδοστρωμάτων τουλάχιστον 20εκ. γεγονός που καθιστά



**Σχήμα 4.1** Τυπικό ημιάκαμπτο οδόστρωμα

απαραίτητη, από οικονομικής απόψεως, την εξέταση της δυνατότητας χρησιμοποίησης κατεργασμένων στρώσεων.

#### **4.2 Μηχανικά χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες**

Το μέτρο ελαστικότητας της σταθεροποιημένης βάσης κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 10000-20000MPa[7]. Ωστόσο εξαιτίας της μικρορηγμάτωσης λόγω παρεμποδιζόμενων μετακινήσεων και φόρτισης από την κυκλοφορία το μέτρο ελαστικότητας υποστηρίζεται από πολλούς πως μειώνεται με την πάροδο του χρόνου και με αυτή την θεώρηση εξηγούνται τιμές 10000MPa ή και χαμηλότερες που βρίσκονται σε υφιστάμενα οδοστρώματα τα οποία κυκλοφορούνται αρκετά χρόνια [8].

Η αντοχή σε κόπωση των κατεργασμένων θραυστών αμμοχάλικων (ΚΘΑ) δίνεται από τον νόμο αστοχίας του άοπλου σκυροδέματος με τις κατάλληλες τιμές στις παραμέτρους.

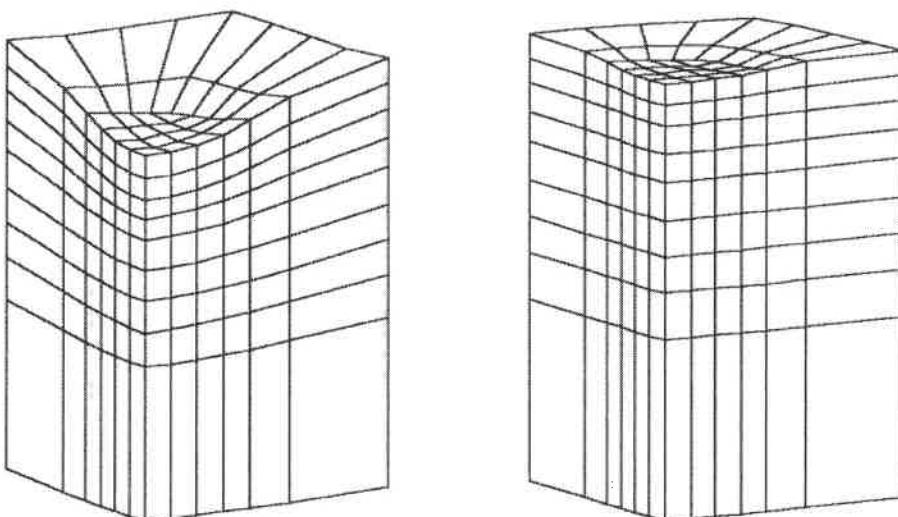
$$\sigma/f = 1 - a * \log N \text{ (σχέση 4.1) [7,8],}$$

όπου **σ** η επιβαλλόμενη τάση, **f** η αντοχή σε μονοτονική φόρτιση (από 0.8 έως 1.7 MPa σε κάμψη σε 90 ημέρες) και **a** η κλίση της γραμμής σε ημιλογαριθμική κλίμακα.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό όλων των κατεργασμένων στρώσεων είναι η αναπόφευκτη ρηγμάτωση που υφίστανται λόγω παρεμπόδισης των μετακινήσεων που προκαλούνται από συστολή πήξεως και κυρίως από θερμοκρασιακές τάσεις. Οι εγκάρσιες αυτές ρωγμές μεταδίδονται με την κυκλοφορία στην ασφαλτική στρώση μετά από κάποιο χρονικό διάστημα και εμφανίζονται στην επιφάνεια του οδοστρώματος (ρωγμές εξ ανακλάσεως). Αν όμως η διαστασιολόγησή του είναι σωστή οι ρωγμές αυτές δεν αποτελούν δομική βλάβη αλλά αισθητικό μειονέκτημα.

Στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα και με την προϋπόθεση πλήρους συνεργασίας μεταξύ των στρώσεων η εντατική κατάσταση στο πυθμένα ασφαλτομίγματος είναι θλιπτική και έτσι το σημείο αυτό δεν είναι κρίσιμο. Επίσης η μεταβιβαζόμενη κατακόρυφη τάση στην στρώση έδρασης είναι συνήθως τόσο μειωμένη ώστε σπανίως αποτελεί και αυτή κρίσιμο σημείο. Τα «κρίσιμα σημεία» ενός ημιακάμπτου οδοστρώματος είναι η οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις στην κάτω ίνα των κατεργασμένων στρώσεων.

Σε αυτό το σημείο και με εργαλείο το Capa3D παρατίθεται η απεικόνιση των παραμορφώσεων σε μία διατομή με κατεργασμένα υλικά βάσης (ΚΘΑ) και χωρίς. Οι διαφορές στη μεταφορά των τάσεων και συμπεριφορά είναι εμφανής.



**Σχήμα 4.2** Σύγκριση παραμόρφωσης ευκάμπτου και ημιακάμπτου οδοστρώματος

Παρατηρούμε στο σχήμα 4.2, αριστερά ένα εύκαμπτο οδόστρωμα υπό καταπόνηση αξονικού φορτίου 13 τόνων και δεξιά το αντίστοιχο οδόστρωμα (ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά) αλλά με σταθεροποιημένες στρώσεις βάσης. Οι 2 πάνω στρώσεις είναι το ασφαλτόμιγμα οι παρακάτω 5 το ΚΘΑ και οι υπόλοιπες 2 το έδαφος. Οι παραμορφώσεις είναι το ίδιο μεγεθυσμένες για προφανείς λόγους. Είναι φανερή η διαφορά στην συμπεριφορά και παραμόρφωση των δύο διατομών. Σημαντική η διαφορά στην παραμόρφωση της βάσης όπου στο ημιάκαμπτο είναι αμελητέα, ενώ στο εύκαμπτο σημαντική παραμόρφωση και στη βάση.

## 5. Σύγκριση *Capa3D, Bisar, Michpave*

### 5.1 Γενικά

Όπως προαναφέρθηκε το Capa3D είναι ένα σχετικά καινούριο πρόγραμμα όχι ιδιαίτερα διαδεδομένο και επομένως δεν έχει μελετηθεί σε βάθος. Για να μπορέσει κάποιος ερευνητής να δεχτεί και να αναλύσει τα αποτελέσματά του πρέπει, μεταξύ άλλων, να τα αντιπαραθέσει με αντίστοιχα άλλων ευρέως χρησιμοποιούμενων προγραμμάτων. Γι' αυτό το λόγο επιλέχτηκαν 2 κλασικά προγράμματα όπως το Michpave το οποίο χρησιμοποιεί τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (σε δύο όμως διαστάσεις) και το Bisar το οποίο χρησιμοποιεί την θεωρία ελαστικών επαλλήλων στρώσεων. Οι συγκρίσεις δεν έλαβαν μέρος σε όλες τις περιπτώσεις των διατομών που αναλύσαμε για λόγους χρόνου και κυρίως, όγκου υπολογισμών.

### 5.2 Ανάλυση με το λογισμικό Bisar

Το Bisar είναι ένα αρκετά διαδεδομένο πρόγραμμα το οποίο τρέχει και σε περιβάλλον Windows. Μπορεί να υπολογίζει τάσεις, μετατοπίσεις και ανηγμένες παραμορφώσεις σε ελαστικά πολυστρωματικά συστήματα. Οι παραδοχές του προγράμματος είναι [9]:

- Τα σύστημα αποτελείται από οριζόντιες στρώσεις ομοιόμορφου πάχους οι οποίες εδράζονται σε βάση ελαστικού ημιχώρου.
- Τα στρώματα εκτείνονται στο άπειρο κατά το οριζόντιο επίπεδο.
- Τα υλικά κάθε στρώσης είναι ομογενή και ισότροπα.
- Επίσης είναι ελαστικά και έχουν γραμμική σχέση τάσεων παραμορφώσεων.

Το φορτίο βρίσκεται στην κορυφή του συστήματος και είναι πάντα κυκλικό. Έχει την ικανότητα υπολογισμού κατακόρυφων και οριζόντιων τάσεων. Τέλος, δέχεται και συνθήκες ολικής ή μερικής ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων αρκετά εύκολα κάτι το οποίο χρησιμοποιήθηκε. Οι διατομές που εξετάστηκαν

και αναλύονται σε επόμενη παράγραφο (5.4) ήταν οι ίδιες με αυτές που εξετάστηκαν με το Capa3D για καλύτερη σύγκριση. Το Bisar είναι κλασσικό πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιείται από πολλούς σχεδιαστές και αναλυτές οδοστρωμάτων.

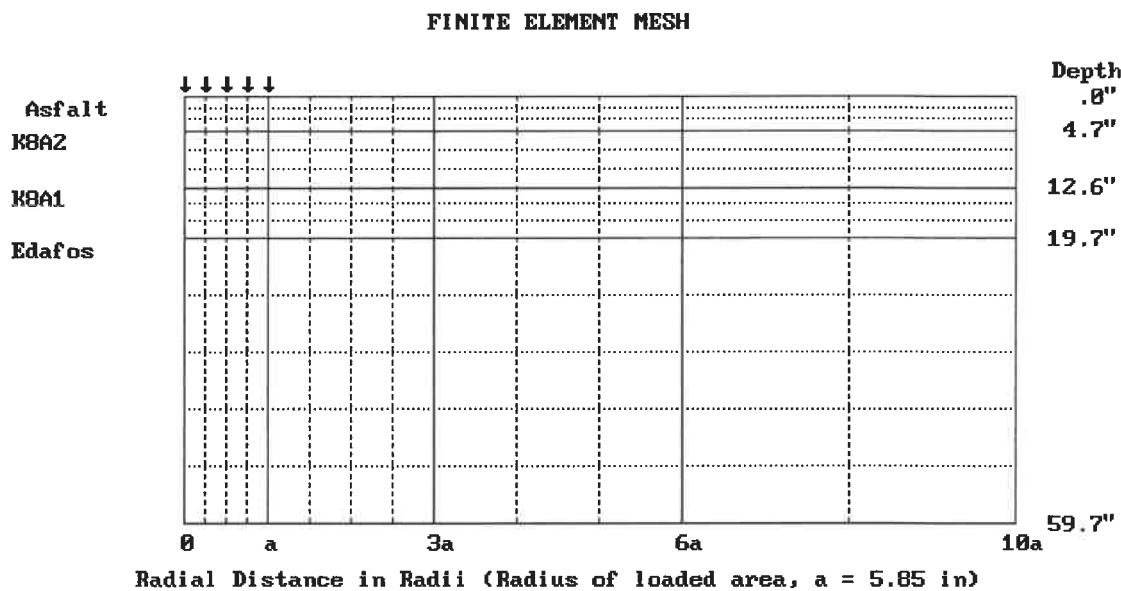
### 5.3 Ανάλυση με το λογισμικό Michpave

Το Michpave (v1.2) είναι ένα επίσης αρκετά κλασσικό πρόγραμμα, το οποίο αξιοποιεί θεωρία πεπερασμένων στοιχείων σε αξονοσυμμετρικό προσομοίωμα. Λειτουργεί σε περιβάλλον Ms-Dos αλλά και σε περιβάλλον WINDOWS 95/98, ενώ είναι γραμμένο σε γλώσσα Fortran 77. Χρησιμοποιεί μη γραμμική ανάλυση και υπολογίζει παραμορφώσεις (ανηγμένες ή όχι) και τάσεις σε οδοστρώματα. Επίσης παρέχει την δυνατότητα του υπολογισμού μέσω εμπειρικών σχέσεων της τροχο-αυλάκωσης και της αντοχής σε κόπωση σε εύκαμπτα οδοστρώματα. Η λειτουργία του είναι πολύ απλή και η ανάλυση ενός θέματος είναι συνολικά πολύ γρήγορη. Δουλεύει με στοιχεία δύο διαστάσεων, στην προκειμένη περίπτωση βάθος και οριζόντια απόσταση από το φορτίο. Οι δυνατότητές του θα χαρακτηρίζονταν μάλλον μικρές. Χρησιμοποιήθηκαν δύο χαρακτηριστικές διατομές με:

- ασφαλτόμιγμα - 12 εκ. / 10.5 εκ.
- ΚΘΑ - 20 εκ. / 5.5 εκ.
- ΚΘΑ - 18 εκ. / 11εκ.
- Έδαφος - 3 μ. / 3μ.

για τις διατομές 7500 και 7595 (σχήμα 5.2) αντίστοιχα, και έγιναν 4 περιπτώσεις με μέτρα ελαστικότητας όπως φαίνονται στον πίνακα 5.1.

Ο χωρισμός έγινε με αυτόματο σύστημα από το ίδιο το πρόγραμμα [6]. Ήτσι το ασφαλτόμιγμα χωρίστηκε σε 3 τμήματα κατά ύψος, οι σταθεροποιημένες βάσεις σε 3 η κάθε μία και το έδαφος σε 5. Κατά μήκος έγινε χωρισμός όπως φαίνεται και στο σχέδιο δείγμα παρακάτω (σχήμα 5.1).



**Σχήμα 5.1** Το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε στην εξέταση με Michpave για 7500 (σχήμα 5.2).

Οι παραδοχές και οι περιορισμοί είναι οι εξής:

- Κάθε στρώση εκτείνεται απείρως στον οριζόντιο άξονα και η τελευταία στρώση θεωρείται απείρου βάθους.
- Παραδοχή και εδώ για πλήρη συνεργασία μεταξύ των στρώσεων ώστε να μην υπάρχουν σχετικές μετατοπίσεις των στρώσεων.
- Το φορτίο πρέπει να είναι πάντα μονού τροχού.
- Χρησιμοποιώντας την συμμετρία το πρόβλημα γίνεται αξονοσυμμετρικό.

## 5.4 Ανάλυση με το λογισμικό Capa3D

### 5.4.1 Σχεδίαση προβλήματος

Το Capa3D ήταν το πρόγραμμα με τις περισσότερες απαιτήσεις αφού ήταν και πιο πολύπλοκο. Επιπλέον υπήρχε η απαίτηση για μια μεγάλη βάση δεδομένων για την εκτενέστερη ανάλυση στη συνέχεια, όπως θα περιγραφεί λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο. Ήτσι επιλέχτηκε η περίπτωση της εξέτασης ταυτόχρονα πολλών διατομών μαζί.

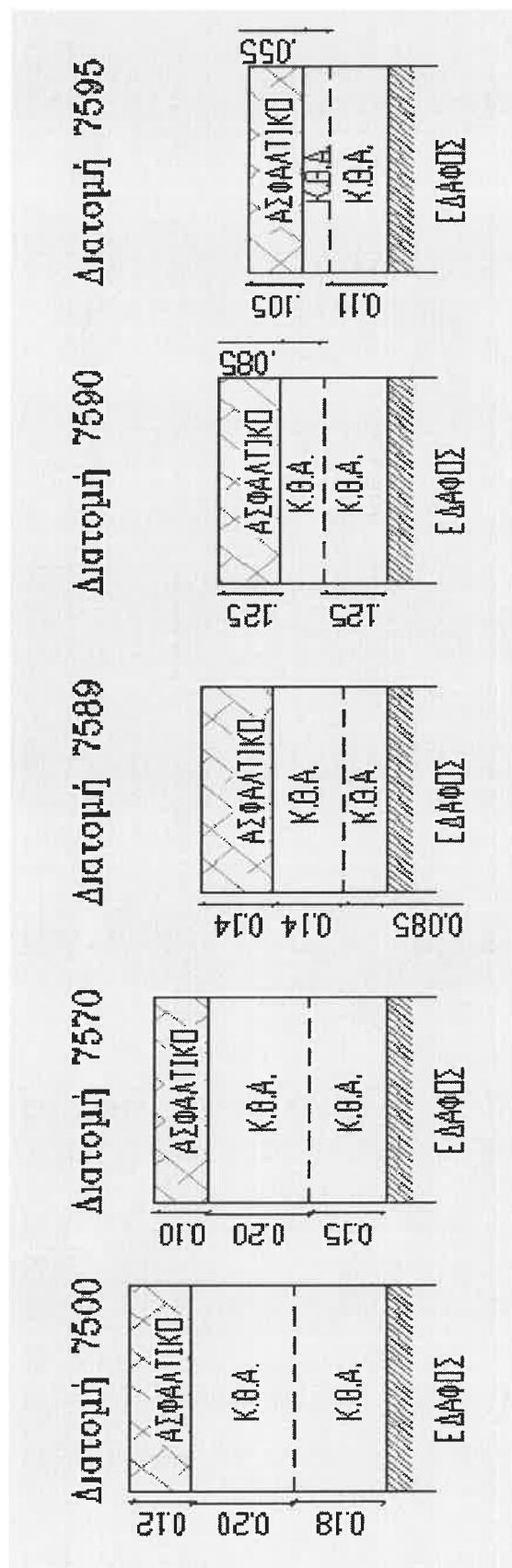
Τα γεωμετρικά στοιχεία των διατομών που εξετάστηκαν βασίζονται σε τυπικά μεγέθη που συναντώνται σε τμήματα του ελληνικού οδικού δικτύου και προέρχονται από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα Μ.Σ.Υ. Αποτελούν τυπική περίπτωση οδοστρωμάτων που δεν έχει τοποθετηθεί η αντιολισθηρή στρώση ασφαλτομίγματος αλλά αποτελούνται στις εξεταζόμενες περιπτώσεις από στρώση ασφαλτομίγματος, δύο στρώσεις σταθεροποιημένης βάσης κατεργασμένου θραυστού αμμοχάλικου (ΚΘΑ) και τη στρώση έδρασης, το έδαφος. Ως βάση αναφοράς χρησιμοποιείται η διατομή 7500 (σχήμα 5.2), ενώ όλες αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα στοιχείων που βρέθηκαν σε επιτόπου δοκιμές. Στα πλαίσια της σύγκρισης γίνεται η παραδοχή πως οι παραπάνω διατομές αποτελούν στοιχεία καινούριων τμημάτων οδοστρωμάτων αυτοκινητοδρόμου.

Όσον αφορά τις απαραίτητες παραμέτρους που περιγράφουν την μηχανική συμπεριφορά των υλικών, για το ασφαλτόμιγμα εξετάστηκε το εύρος τιμών 4000-6500 MPa για το μέτρο ελαστικότητάς του. Η διακύμανση αυτή θα μπορούσε να αντιπροσωπεύει την διαφορετική μελέτη συνθέσεως αλλά και τις διακυμάνσεις του μέτρου ελαστικότητας ανάλογα με την θερμοκρασία [10,11]. Το αντίστοιχο εύρος τιμών για ΕκθΑ ήταν 10000-20000 MPa. Το μέτρο ελαστικότητας για σταθεροποιημένη βάση σε ένα καινούριο οδόστρωμα μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ αυτών των τιμών σύμφωνα με σχετική βιβλιογραφία [7,8].

Σε όλες τις περιπτώσεις ο λόγος  $v_{poisson}$  ήταν 0.45 για το έδαφος, 0.2 για τη σταθεροποιημένη βάση [7] και 0.35 για το ασφαλτόμιγμα.

Τελικά επιλέχτηκαν οι περιπτώσεις του πίνακα 2. Στον ίδιο πίνακα φαίνεται και η κωδικοποίηση των διατομών.

## ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΤΟΜΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ



Σχήμα 5.2

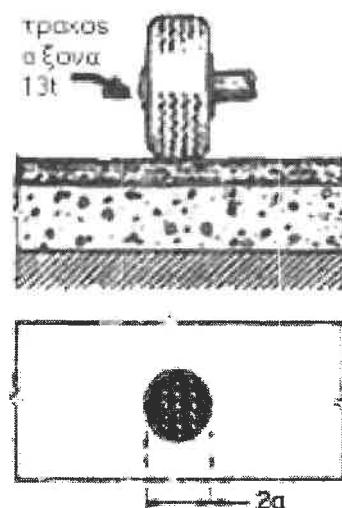
Ονομασία – κωδικός	$E_{ασφ}$ (MPa)	$E_{ΚΘΑ}$ (MPa)
A1	6500	20000
A2	6500	10000
B1	4000	20000
B2	4000	10000

Πίνακας 5.1 Κωδικοποίηση διατομών με βάση τα μέτρα ελαστικότητας

Συνεπώς, δημιουργήθηκαν 4 περιπτώσεις για κάθε διατομή με ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά, δηλαδή συνολικά 4x5 διατομές = 20 διαφορετικές διατομές υπό ανάλυση για την επίδραση του πάχους και των μέτρων ελαστικότητας. Οι 20 αυτές διατομές εκτιμήθηκαν αρκετές για την εξαγωγή παρατηρήσεων ώστε να προκύψουν τα προκαταρκτικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

#### 5.4.2 Λεπτομέρειες προσομοίωσης με το Capa3D

Η εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα και οι βασικές ρυθμίσεις ήταν ίδιες για όλες τις διατομές αλλάζοντας μόνο τα πάχη και τα εκάστοτε μέτρα ελαστικότητας ( $E$ ). Ως τυπική φόρτιση επιλέχτηκε το φορτίο άξονα 13t μονού τροχού, το οποίο δίνει 0.91 MPa κατανεμημένο κυκλικό φορτίο με ακτίνα  $a=150\mu m$ .



Κυκλική επιφάνεια επαφής του τροχού.

Οι τιμές που υπολογίστηκαν ήταν πάντα οριζόντιας τάσης και οι θέσεις στις οποίες εξετάστηκαν είναι:

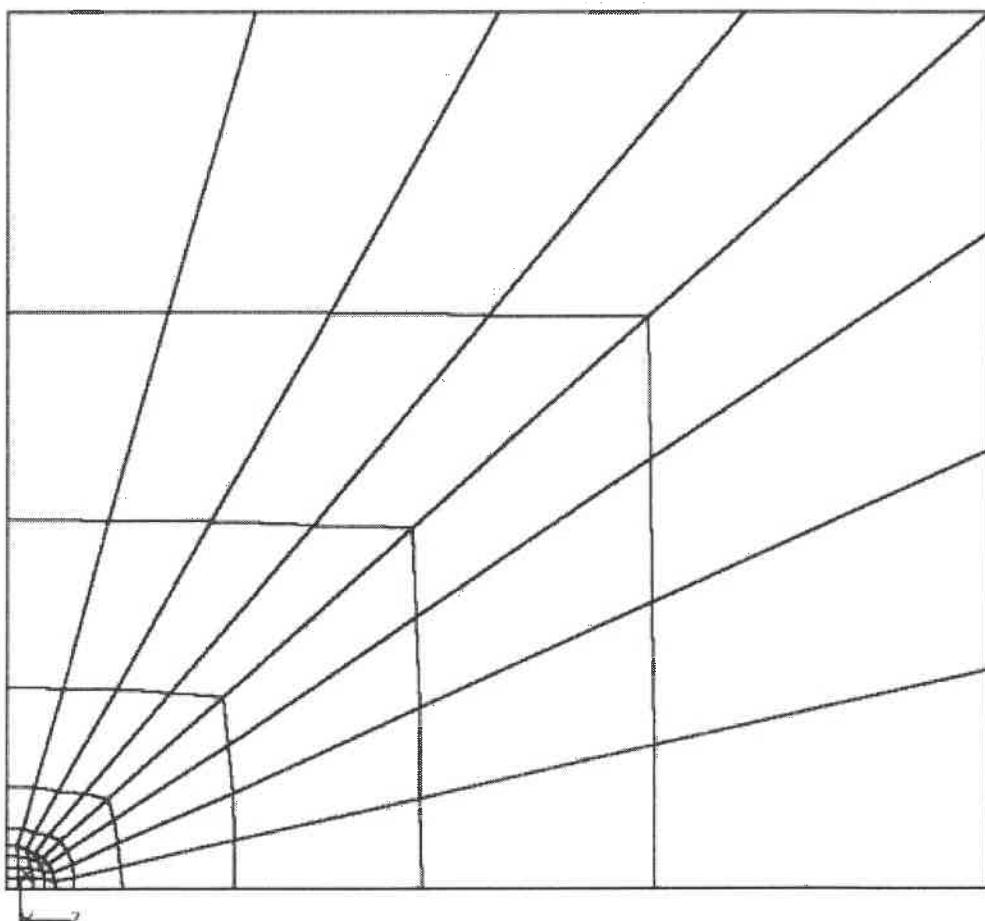
- η θέση στο πιθμένα ασφαλτομίγματος (θέση 3 σχήμα 4.1)
- η θέση στη διεπιφάνεια μεταξύ των κατεργασμένων βάσεων (θέση 2 σχήμα 4.1) όπου στο εξής θα ονομάζεται «θέση διεπιφάνειας ΚΘΑ-ΚΘΑ»

- και τέλος η θέση στο πυθμένα της υπόβασης κατεργασμένης βάσης (θέση 1 σχήμα 4.1) που στο εξής θα ονομάζεται «θέση πυθμένα ΚΘΑ»

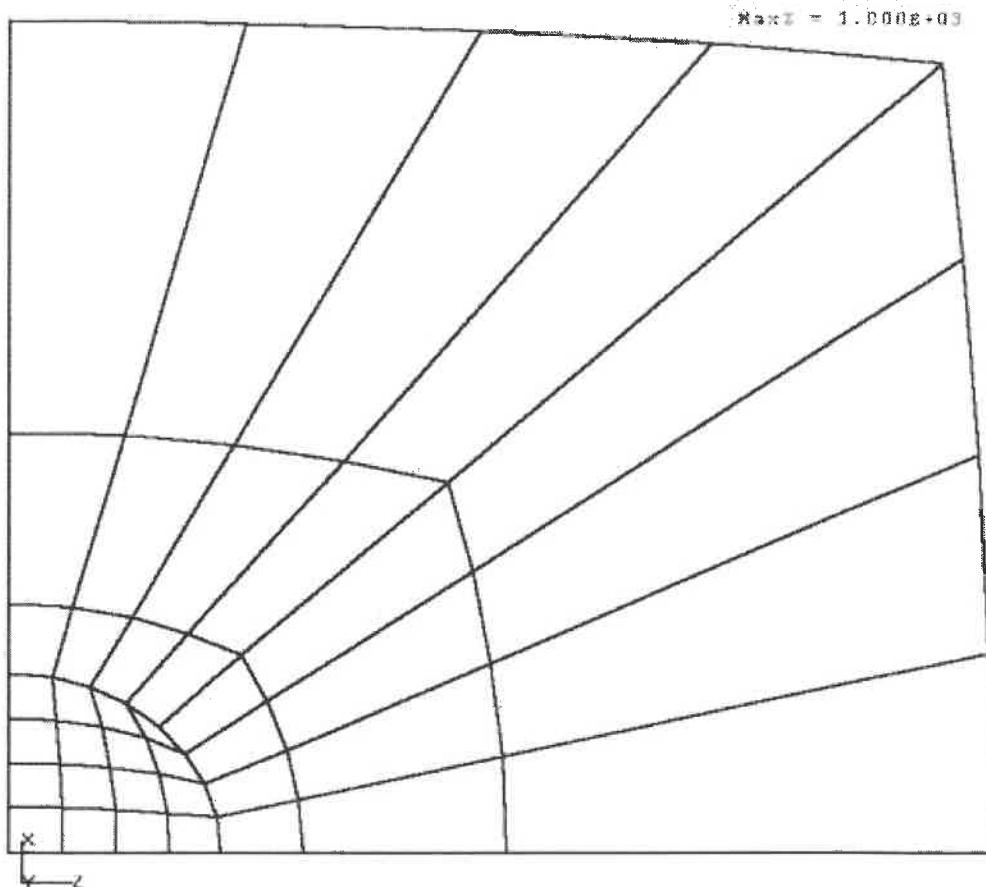
Οι τιμές πάντα υπολογίζονται στον κατακόρυφο άξονα που διέρχεται του κέντρου του κυκλικού φορτίου και είναι αρνητικές για θλίψη και θετικές για εφελκυσμό.

Δημιουργήθηκαν 12 υπερστοιχεία για κάθε διατομή με τρία υπερστοιχεία για κάθε στρώση (έδαφος – ΚΘΑ – ΚΘΑ – ασφαλτόμιγμα) με αρίθμηση από κάτω προς τα πάνω. Στο σχήμα 5.6 φαίνεται η παραπάνω διακριτοποίηση.

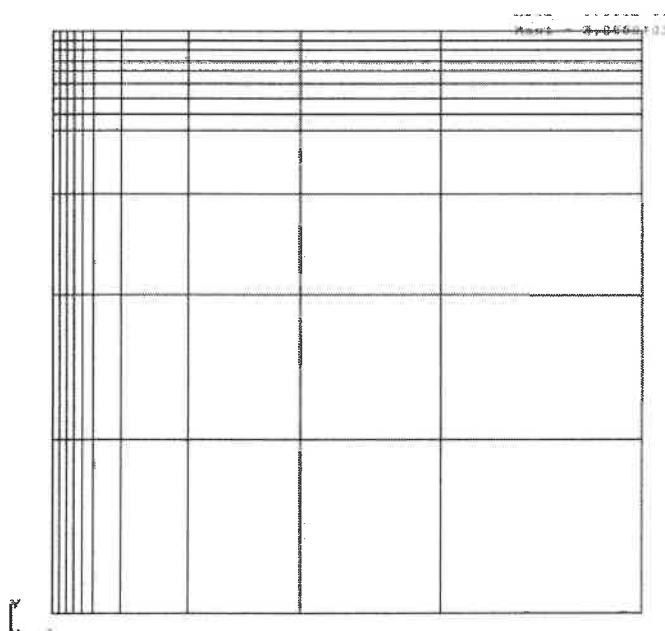
Δείγματα αντιπροσωπευτικά του τελικού χωρισμού κατά ύψος και στο οριζόντιο επίπεδο διακρίνεται στα σχήματα που ακολουθούν.



**Σχήμα 5.3** Κάτοψη όλου του πλέγματος (3x3μ) με εμφανή τον χωρισμό σε μικρά στοιχεία (elements) και πύκνωση στο χώρο του τεταρτημορίου του κυκλικού φορτίου.

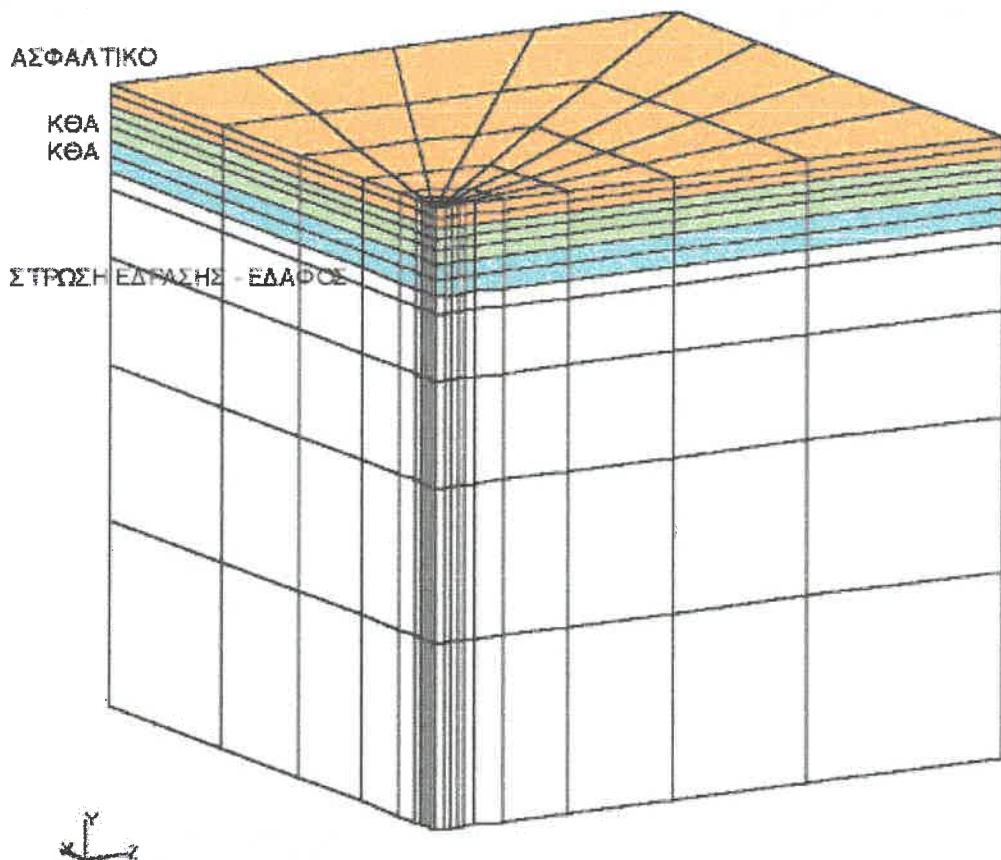


**Σχήμα 5.4** Λεπτομέρεια οριζόντιας διακριτοποίησης στο χώρο του φορτίου. Το συγκεκριμένο κομμάτι απεικονίζει μόνο επίπεδο 1x1 μέτρο.



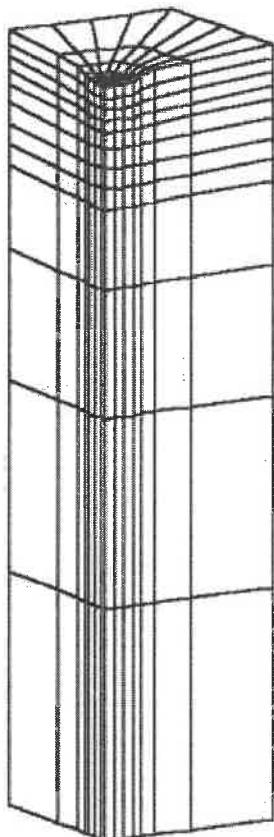
**Σχήμα 5.5** Ο χωρισμός κατά το ύψος και πλάτος από πλάγια όψη είναι αρκετά ομοιόμορφος και συμπυκνωμένος όσος χρειάζεται. Το φορτίο εδώ είναι στην πάνω αριστερή γωνία.

Επίσης παραθέτεται και σχήμα γενικής άποψης με τον τελικό χωρισμό στα επιμέρους στοιχεία. (σχήμα 5.6)

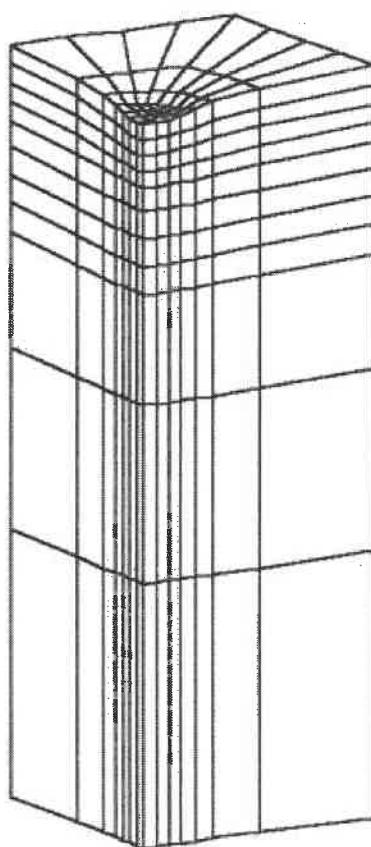


**Σχήμα 5.6** Γενική άποψη πεδίου ανάλυσης μετά την διακριτοποίηση.

Τέλος τα παρακάτω σχήματα 5.7, 5.8 είναι μια παρουσίαση του οδοοστρώματος μετά την επιβολή φορτίου με μεγέθυνση (x2000) των παραμορφώσεων, όπως μας δίνει την δυνατότητα παρουσίασης το Capa3D.



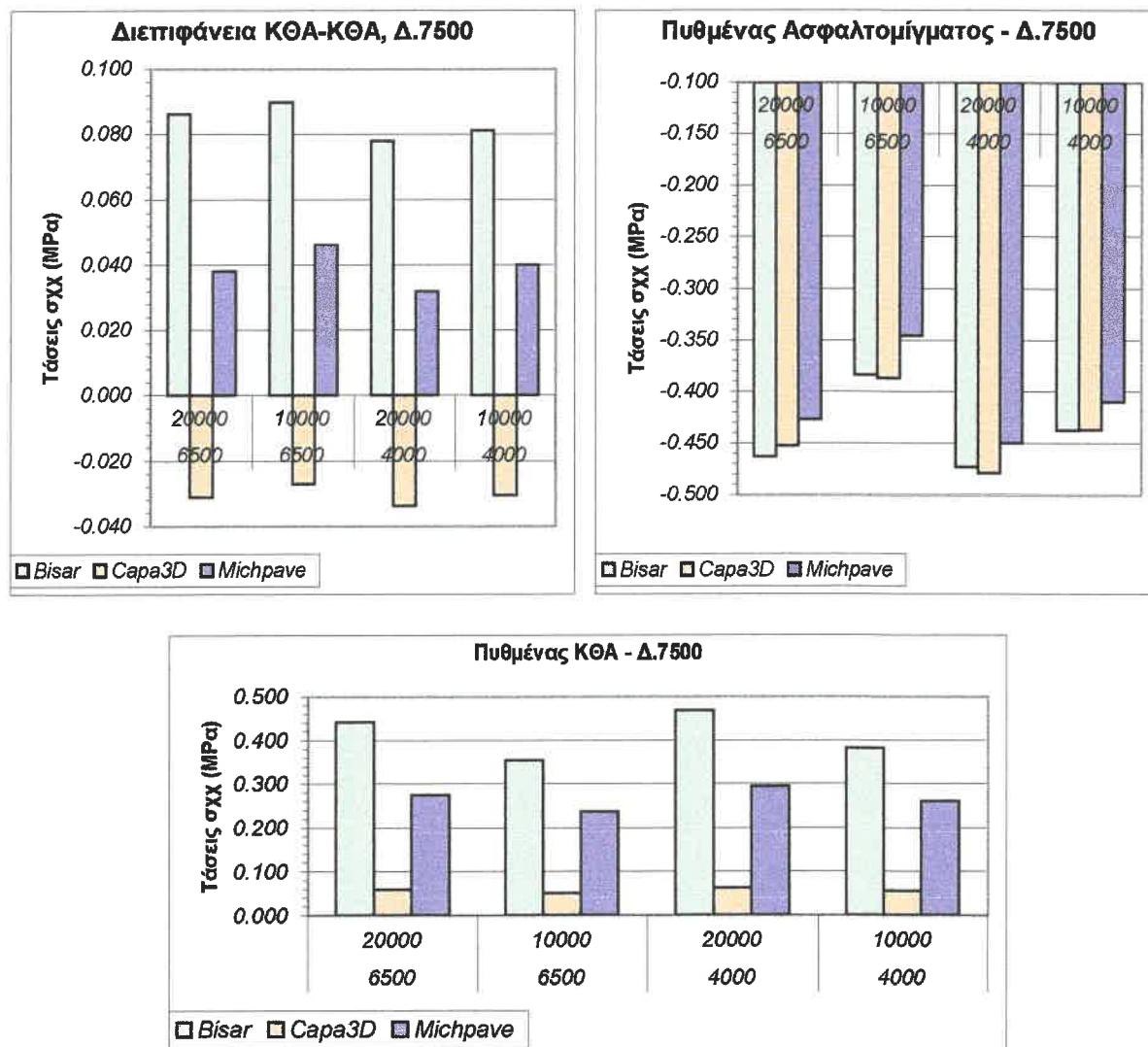
**Σχήμα 5.7** Όλη η διατομή κατά ύψος και ένα πεδίο ακτίνας περίπου 1 μέτρου από το φορτίο. Η μεγέθυνση είναι επί 2000. Διακρίνονται τα στρώματα που παραμορφώνονται από



**Σχήμα 5.8** Μερική διατομή κατά ύψος λεπτομέρεια του προηγούμενου σχήματος για καλύτερη κατανόηση. Η διατομή που διακρίνεται είναι ακτίνας 1 μέτρου αλλά το ύψος της είναι μικρότερο και δεν απεικονίζεται το τελευταίο οριζόντιο στρώμα διακριτοποίησης του εδάφους.

## 5.5 Αποτελέσματα – Παρατηρήσεις - Διαπιστώσεις

Το λογισμικό Capa3D υπερέχει σε τομείς όπως οι δυνατότητες παρουσίασης και οι δυνατότητες ανάλυσης με πολλές παραμέτρους. Το σημαντικό όμως είναι τα αποτελέσματα όπως αυτά τελικά διαμορφώθηκαν έπειτα από επεξεργασία. Στη συνέχεια παρατίθενται μερικά αντιπροσωπευτικά διαγράμματα. Αναλυτικότερα όλων των διατομών υπάρχουν στο παράρτημα.



**Διαγράμματα 5.1, 5.2, 5.3.** Στον Χ άξονα είναι οι περιπτώσεις διατομών με τους συνδυασμούς  $E_{κθα}$  και  $E_{ασφ}$  (π. Στον Υ οι τιμές οριζόντιας τάσης σε MPa).

Τα διαγράμματα δίνουν οριζόντιες τάσεις σε MPa και τα νούμερα στις στήλες είναι η βαθμονόμηση του άξονα Χ και αποτελούν τον συνδυασμό των μέτρων ελαστικότητας ασφαλτομίγματος και ΚΘΑ.

Για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων των διαφορετικών αναλύσεων αξιοποιήθηκε ένας τυπικός νόμος αστοχίας του Κ.Θ.Α. [7]. Ο νόμος αυτός είναι σύμφωνος με τις παραδοχές της προηγούμενης παραγράφου (5.4) και χρησιμοποιείται για την εκτίμηση του αριθμού επιτρεπομένων διελεύσεων σε βάση από σταθεροποιημένο υλικό. Ο νόμος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο:

$$\sigma_{xx}/f = 1 - 0.0833 \log N \quad (\text{σχέση 5.1})$$

Το  $f$  είναι η τιμή αντοχής σε κάμψη δοκιμίου 90 ημερών και έχουμε δεχτεί την τιμή 1.4MPa σύμφωνα με στοιχεία από δοκιμές στο εργαστήριο, η οποία είναι αποδεκτή και από την διεθνή βιβλιογραφία [7,8].

Έτσι προέκυψαν οι παρακάτω τιμές οριζόντιας τάσης για την διατομή αναφοράς (7500) στο πυθμένα του ΚΘΑ.

	Bisar	Capa 3D	Michpave	Εκτιμώμενες Διελεύσεις		
	Stress $\sigma_{xx}$ (MPa)	Stress $\sigma_{xx}$ (MPa)	Stress $\sigma_{xx}$ (MPa)	Bisar (2D) (N)	Capa 3D (N)	Michpave (N)
<b>A1</b>	0.442	0.059	0.275	1.63E+08	3.16E+11	4.43E+09
<b>A2</b>	0.356	0.051	0.237	9.03E+08	3.72E+11	9.39E+09
<b>B1</b>	0.469	0.062	0.295	9.64E+07	2.95E+11	2.99E+09
<b>B2</b>	0.382	0.055	0.260	5.38E+08	3.42E+11	5.96E+09

Είναι φανερές οι διαφορές των τριών προγραμμάτων σε πρακτικό επίπεδο αφού η αναμενόμενη διάρκεια ζωής της βάσης του ΚΘΑ σε ένα ημιάκαμπτο οδόστρωμα υπολογιζόμενη με το Capa3D είναι αισθητά μεγαλύτερη. Η διαφορά αυτή είναι ακόμη πιο ορατή υπολογίζοντας τους λόγους διελεύσεων για τα αποτελέσματα των λογισμικών.

Για τις άλλες διατομές που έχουν συνολικά μικρότερα πάχη στρώσεων οι διαφορές ήταν εκπληκτικά μεγαλύτερες. Πάντως σε περίπτωση μελέτης σχεδιασμού (όπου τα πάχη θα είναι ενδεχομένως μεγαλύτερα) οι διαφορές των προγραμμάτων πιθανών να αμβλυνθούν. Οι διαφορές αυτές στις τιμές των διελεύσεων σε περίπτωση ανάλυσης με το λογισμικό CAPA3D δείχνουν αυξημένη διάρκεια ζωής των υλικών της σταθεροποιημένης βάσης. Βέβαια, για

να γενικευτούν αυτά τα συμπεράσματα πρέπει να γίνει συστηματική έρευνα με παραμέτρους σχεδιασμού οι οποίες λαμβάνονται με εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές και να ελεγχθούν κατάλληλα με τα παραπάνω αποτελέσματα.

Τα γενικά συμπεράσματα από την μελέτη των διαγραμμάτων μετά την επεξεργασία όλων των διατομών είναι:

- 1.** Οι διαφορές των τιμών οριζόντιας τάσης των τριών λογισμικών είναι μεγάλες αριθμητικά αλλά και ποιοτικά. Στο πυθμένα του ασφαλτομίγματος οι τιμές είναι παραπλήσιες (για παράδειγμα διαφορές της τάξης 8% στην 7500, διάγραμμα 5.2). Οι διαφορές διαφέρουν λίγο ανάλογα με τα πάχη των στρώσεων.
- 2.** Και τα τρία λογισμικά αυξομειώνουν τις τιμές της οριζόντιας τάσης σε κάθε θέση από τις τρεις ανάλογα με τις τιμές  $E_{κθA}$  και  $E_{ασφ}$  κατά παραπλήσιο βαθμό και με το ίδιο ποιοτικό αποτέλεσμα.
- 3.** Εξετάζοντας τη διεπιφάνεια μεταξύ στρώσεων σταθεροποιημένης βάσης εδώ οι τιμές αριθμητικά και ποιοτικά αποκλίνουν. Σύμφωνα με το Bisar οι διατομές βρίσκονται σε κατάσταση εφελκυσμού ενώ με το Capa3D θλίψης (πάντα με πλήρη συνεργασία στρώσεων). Οι τιμές βέβαια είναι σχετικά μικρές (τάξης 0.08 για Bisar και -0.025 για Capa), η φυσική ερμηνεία τους όμως είναι εντελώς αντίθετη. Κατά το Bisar έχουμε φθορά στην διεπιφάνεια μεταξύ των ΚΘΑ αφού βρίσκεται υπό εφελκυσμό, ενώ κατά το Capa3D η ίδια διεπιφάνεια βρίσκεται υπό μικρή θλίψη. Το Michpave δίνει τιμές κάπου στο μέσο των άλλων δύο που κυμαίνονται γύρω από το μηδέν.
- 4.** Στην διεπιφάνεια ΚΘΑ – εδάφους έχουμε πολύ μεγάλες αριθμητικές διαφορές μεταξύ των προγραμμάτων (έως και 650%). Οι τιμές δε, του Bisar δείχνουν μάλλον υπερβολικές αφού για την διατομή 7595 η οριζόντια τάση στην περίπτωση B1 φτάνει τα 1.555MPa και οι εκτιμώμενες διελεύσεις σύμφωνα με τον παραπάνω νόμο τις  $0.0469 < 1(!)$  διελεύσεις. Αλλά και γενικά

για τις πιο λεπτές διατομές οι διελεύσεις με το Bisar κυμαίνονται κάτω των  $10^8$ . Ο νόμος αστοχίας που δεχτήκαμε ίσως να μην είναι ο κατάλληλος αλλά και οι τιμή του Bisar είναι πολύ μεγάλη. Το Michpave και στην Βάση ΚΘΑ δίνει τιμές μεταξύ των άλλων δύο αλλά συγκλίνει περισσότερο σε αυτές του Bisar.

Γενικά, σύμφωνα με τα παραπάνω, οι διαφορές στην συμπεριφορά των οδοστρωμάτων (και κυρίως στη διάρκεια ζωής) είναι εκπληκτικές χρησιμοποιώντας ένα καινούριο εργαλείο όπως τα πεπερασμένα στοιχεία 3D κάτι το οποίο ίσως προκαλέσει αλλαγές στα δεδομένα και τις παραδοχές για τη διαστασιολόγηση των οδοστρωμάτων στο μέλλον.

Συνολικά η εντύπωση που δίνεται είναι πως οι μεταβολές των μέτρων ελαστικότητας, τόσο του ασφαλτομίγματος όσο και του ΚΘΑ, επηρεάζουν σε παραπλήσιο βαθμό και τα τρία λογισμικά της δοκιμής. Κάτι το οποίο δεν ισχύει για τις μεταβολές του πάχους των επιμέρους στρώσεων. Ιδιαίτερα το Bisar φαίνεται να επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό στις διατομές μικρού πάχους όπου δίνει και υπερβολικές τιμές οριζόντιας τάσης στον πυθμένα του ΚΘΑ. Το Capa3D σε αυτό το σημείο, δίνει πιο «ρεαλιστικά» αποτελέσματα. Το Michpave συνολικά κυμαίνεται ανάμεσα στις τιμές των άλλων δύο και κοντά στο μέσον.

## 6. Διερεύνηση προσομοιώματος με τρισδιάστατα Π.Σ. (3D)

### 6.1 Εισαγωγή

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε σύγκριση τριών λογισμικών χρησιμοποιώντας κάποια προσομοιώματα ημιακάμπτων οδοστρωμάτων χωρίς ιδιαίτερη ανάλυση αυτών. Εκτιμήθηκαν οι διαφορές του CAPA3D από τα δύο άλλα λογισμικά και συνεχίζεται πλέον η διερεύνηση του ίδιου προσομοιώματος. Χρησιμοποιώντας μόνο το CAPA3D έγινε μια εκτενέστερη ανάλυση της προσομοίωσης ημιακάμπτου οδοστρώματος που εστίασε στις διαφορές που προκαλούν οι μεταβολές στα μέτρα ελαστικότητας καθώς και στα πάχη των στρώσεων σταθεροποιημένης βάσης και ασφαλτομίγματος. Τα παραπάνω συνδυάστηκαν με την ύπαρξη ή όχι ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων στα κεφάλαια 7 και 8.

Το προσομοίωμα έμεινε το ίδιο και ερευνήθηκαν οι ίδιες πέντε διατομές (σχήμα 5.2 και πίνακας 5.1) ενεργώντας βάσει των ίδιων παραδοχών με το κεφάλαιο 5. Υπενθυμίζεται πως η διερεύνηση για νέο οδόστρωμα και σε διατομές οι οποίες είναι γεωμετρικά σχεδιασμένες σύμφωνα με στοιχεία επιτόπου δοκιμών και τα μηχανικά χαρακτηριστικά περιγράφουν υλικά ακαταπόνητα.

Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία η διερεύνηση αυτή δεν μπορεί να έχει τον χαρακτήρα μίας διερεύνησης σχεδιασμού με διαφορετικά πάχη επιμέρους στρώσεων και μέτρα ελαστικότητας αυτών, δεδομένου ότι τα γεωμετρικά στοιχεία αφορούν κυρίως στοιχεία από επιτόπου καταγραφές και μετρήσεις και διακρίνονται από ανομοιομορφία. Ερευνήθηκαν επομένως διαφορές στην συμπεριφορά τις οποίες είναι πιθανό να συναντηθούν κατά μήκους το ίδιου δρόμου ή και εντός ενός οδικού δικτύου. Βέβαια, τα ποιοτικά συμπεράσματα των αναλύσεων, ενδεχομένως, μπορούν να αξιοποιηθούν και σε θέματα σχεδιασμού.

## 6.2 Οριζόντιες τάσεις στις διεπιφάνειες σε σχέση με πάχος και μέτρα ελαστικότητας

Σε αυτή την έρευνα δεν χρησιμοποιήθηκαν άλλα προγράμματα. Χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες 5 διατομές με όλες τις περιπτώσεις των μέτρων ελαστικότητας όπως και στα προηγούμενα (σχήμα 5.2). Η συνεργασία των στρώσεων έχει ληφθεί ως πλήρης.

Τα αποτελέσματα είναι συγκεντρωμένα και χωρισμένα σε τρεις πίνακες με βάση το σημείο ελέγχου των οριζόντιων τάσεων. Έτσι έχουμε πίνακα για τις τιμές στον πυθμένα του ασφαλτομίγματος, τις τιμές στη διεπιφάνεια ΚΘΑ – ΚΘΑ και τις τιμές στον πυθμένα ΚΘΑ. Οι τιμές οριζόντιας τάσης σε MPa για το πυθμένα ασφαλτομίγματος είναι:

Διατομή		7500	7589	7595
Σύνθεση Ασφ/ΚΘΑ/ΚΘΑ		12/20/18	14/14/8.5	10.5/5.5/11
<b>A1</b>	6500	20000	-0.452	-0.421
<b>A2</b>	6500	10000	-0.387	-0.348
<b>B1</b>	4000	20000	-0.479	-0.453
<b>B2</b>	4000	10000	-0.437	-0.404
<b>Εα(Ασφ)</b>				
<b>Εκ(ΚΘΑ)</b>				

**Πίνακας 6.1** Τιμές οριζόντιας τάσης στον πυθμένα του ασφαλτομίγματος.

Οι τιμές για την διεπιφάνεια Κ.Θ.Α. είναι:

Διατομή		7500	7570	7589	7590	7595
Σύνθεση Ασφ/ΚΘΑ/ΚΘΑ		12/20/18	10/20/15	14/14/8.5	12.5/8.5/12.5	10.5/5.5/11
<b>A1</b>	6500	20000	-0.031	-0.028	-0.012	-0.061
<b>A2</b>	6500	10000	-0.027	-0.024	-0.008	-0.046
<b>B1</b>	4000	20000	-0.034	-0.030	-0.015	-0.071
<b>B2</b>	4000	10000	-0.031	-0.027	-0.012	-0.058
<b>Εα(Ασφ)</b>						
<b>Εκ(ΚΘΑ)</b>						

**Πίνακας 6.2** Τιμές οριζόντιας τάσης στη διεπιφάνεια Κ.Θ.Α-ΚΘΑ.

Και οι τιμές για τον πυθμένα Κ.Θ.Α. είναι:

Διατομή		7500	7570	7589	7590	7595
Σύνθεση Ασφ/ΚΘΑ/ΚΘΑ		12/20/18	10/20/15	14/14/8.5	12.5/8.5/12.5	10.5/5.5/11
<b>A1</b>	6500	20000	0.059	0.075	0.130	0.157
<b>A2</b>	6500	10000	0.051	0.065	0.107	0.130
<b>B1</b>	4000	20000	0.062	0.079	0.142	0.170
<b>B2</b>	4000	10000	0.055	0.070	0.119	0.144
<b>Εα(Ασφ)</b>						
<b>Εκ(ΚΘΑ)</b>						

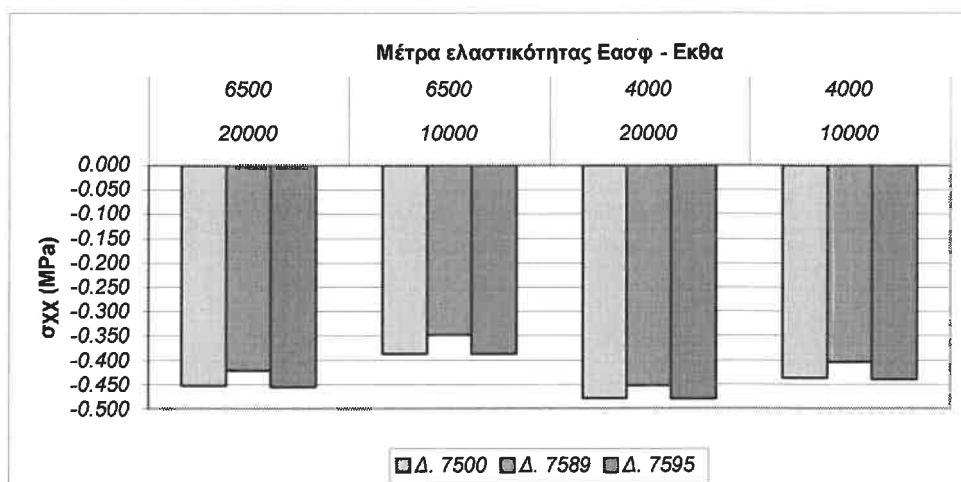
**Πίνακας 6.3 Τιμές οριζόντιας τάσης στον πυθμένα Κ.Θ.Α.**

Στους πίνακες 6.1, 6.2, 6.3 στην γραμμή «σύνθεση» αναγράφονται τα πάχη των στρώσεων ασφαλτομίγματος, βάσης Κ.Θ.Α. και υπόβασης Κ.Θ.Α. αντιστοίχως, σε εκατοστόμετρα. Τα A1, A2,... είναι η κωδικοποίηση των διατομών όπως έγινε σύμφωνα με τον πίνακα 5.1. Διαγράμματα για την απεικόνιση των πινάκων παρατίθονται μαζί με τα συμπεράσματα για ευκολότερη εποπτεία των τελευταίων.

### 6.3 Διαγράμματα – Παρατηρήσεις - Σχόλια

Τα αποτελέσματα της διερεύνησης για την επιρροή του πάχους στρώσεων και του μέτρου ελαστικότητας παρατίθενται συγκεντρωμένα σε διαγράμματα ως εξής:

Στον πυθμένα ασφαλτομίγματος:



**Διάγραμμα 6.1** Οριζόντιες Τάσεις στη βάση ασφαλτομίγματος. Επιρροές πάχους και μέτρου ελαστικότητας

Για βοήθεια δίνεται ο παρακάτω πίνακας γεωμετρικών χαρακτηριστικών:

Διατομή	7500	7589	7595
Ασφαλτόμιγμα (εκ.)	12.0	14.0	10.5
ΚΘΑ βάσης (εκ.)	20.0	14.0	5.5
ΚΘΑ υπόβασης (εκ.)	18.0	8.5	11.0

Παρατηρήσεις:

**1.** Στα διαγράμματα γενικά απεικονίζονται με διαφορετικά χρώματα οι εκάστοτε διατομές και σε κάθε ομάδα στηλών είναι οι τιμές για ένα μόνο συνδυασμό  $E_{ασφ}$  και  $E_{κθA}$  από τους 4 (πίνακας 5.1). Δεν δίνονται οι κωδικοί των διατομών για ευκολότερη εποπτεία των μέτρων ελαστικότητας. Τα παραπάνω ισχύουν για όλα τα διαγράμματα που θα ακολουθήσουν εφόσον δεν αναφέρεται διαφορετικά.

**2.** Οι τιμές είναι πάντα θλιπτικές και αυτό συμβαίνει, με την παραδοχή πλήρους συνεργασίας στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα που εξετάστηκαν. Εξαιτίας αυτού η παρατήρηση των δυσμενέστερων ή όχι καταστάσεων στο ασφαλτόμιγμα γίνεται με σύγκριση Θλιπτικών τάσεων. Είναι φανερό πως οι μεγαλύτερες θλιπτικές τάσεις είναι προτιμότερες από τις μικρότερες αφού οι τελευταίες υποδεικνύουν ότι προσεγγίζουμε στο θλιπτικό όριο των ημιακάμπτων πέραν του οποίου έχουμε εφελκυσμό.

**3.** Ένα οδόστρωμα με  $E_{ασφ}=6500$  έχει λίγο μικρότερες θλιπτικές τιμές στον πυθμένα ασφαλτομίγματος κατά μικρό ποσοστό (~5%) από ένα αντίστοιχο με 4000MPa. Τα αντίστοιχα για τα  $E_{κθA}$  είναι αντίθετα. Με μέτρο ελαστικότητας σταθεροποιημένης βάσης 20000 MPa οι τιμές οριζόντιας τάσης στο πυθμένα ασφαλτομίγματος είναι μεγαλύτερες από αυτές με 10000 (π.χ. στην διατομή 7589 οι τιμές έχουν αντιστοίχως -0.421, -0.348). Όσο μικρότερο λοιπόν, το  $E_{κθA}$  που έχει ένα οδόστρωμα τόσο δυσμενέστερες οι τάσεις που δέχεται το ασφαλτόμιγμα.

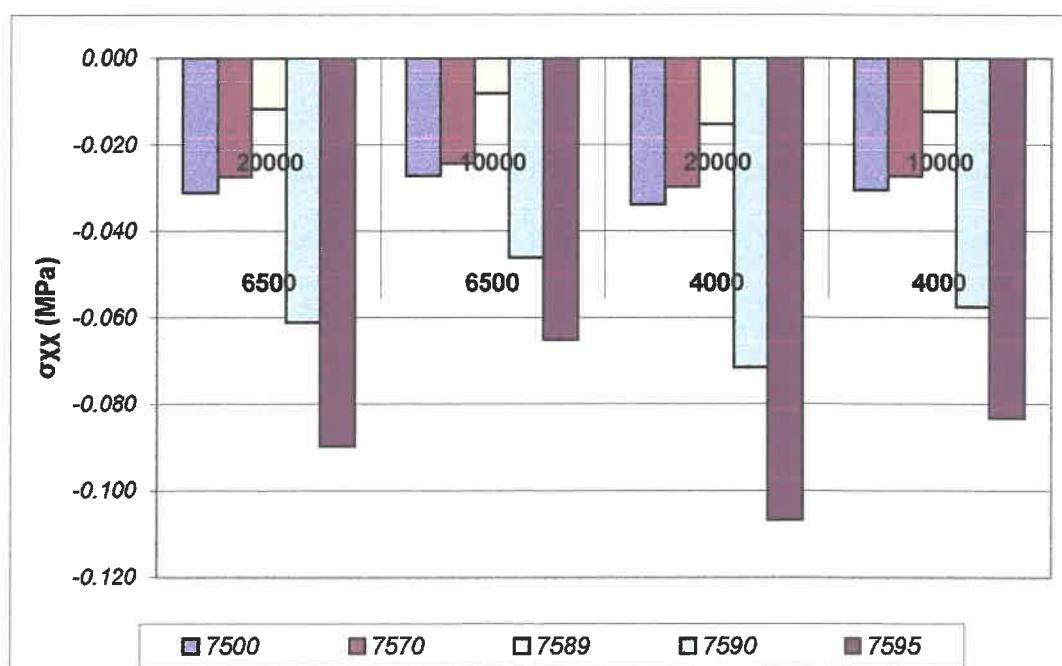
**4.** Η τάσεις πάντως στο ασφαλτόμιγμα δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από το πάχος ασφαλτομίγματος και σταθεροποιημένης βάσης σύμφωνα πάντα με τα δεδομένα που έχουμε. Το τελευταίο σημαίνει πώς η ανομοιομορφία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών ενός οδοστρώματος εξαιτίας τέτοιας κατασκευής δεν μεταβάλλει πρακτικά την εντατική κατάσταση στο πυθμένα του ασφαλτομίγματος. Παρόλα αυτά θα πρέπει να σημειωθεί πως το

εξεταζόμενο εύρος τιμών για το πάχος ασφαλτομίγματος είναι σχετικά μικρό (10-14εκ).

**5.** Τέλος ερμηνεύοντας όλα τα παραπάνω εξάγεται το συμπέρασμα πως οι διαφορές στην εντατική κατάσταση στον πυθμένα ασφαλτομίγματος εξαρτώνται κυρίως από τα μέτρα ελαστικότητας σταθεροποιημένης βάσης και ασφαλτομίγματος με μεγαλύτερη επιρροή το πρώτο, κάτι σημαντικό εφόσον θεωρήσουμε ότι μειώνεται στο βάθος χρόνου. Το πάχος του ασφαλτομίγματος και της όλης διατομής δεν εμφανίζει σημαντικές διαφορές στην εντατική κατάσταση του πυθμένα του ασφαλτομίγματος αφού δεν μεταβάλλει ιδιαίτερα τις τιμές.

Με βάση τα παραπάνω επιβεβαιώνεται ότι η βάση του ασφαλτομίγματος δεν είναι «κρίσιμη περιοχή» για ένα ημιάκαμπτο οδόστρωμα, ωστόσο έχουν ενδιαφέρονταν οι επιρροές στην συμπεριφορά. Στη συνέχεια στο κεφάλαιο 7 διερευνάται και η περίπτωση ολίσθησης ή μερικής συνεργασίας ασφαλτομίγματος-ΚΘΑ.

Εξετάζοντας την θέση στη διεπιφάνεια μεταξύ στρώσεων ΚΘΑ έχουμε:



**Διάγραμμα 6.2** Τάσεις στη διεπιφάνεια Κ.Θ.Α.- Κ.Θ.Α. Επιρροές πάχους και μέτρου ελαστικότητας των στρώσεων.

Για βοήθεια δίνεται ο παρακάτω πίνακας γεωμετρικών χαρακτηριστικών:

Διατομή	7500	7570	7589	7590	7595
Ασφαλτόμιγμα (εκ.)	12.0	10.0	14.0	12.5	10.5
ΚΘΑ βάσης (εκ.)	20.0	20.0	14.0	8.5	5.5
ΚΘΑ υπόβασης (εκ.)	18.0	15.0	8.5	12.5	11.0

Παρατηρήσεις:

**1.** Όπως και για τον πυθμένα ασφαλτομίγματος ισχύουν και εδώ τα ίδια όσον αφορά τα θλιπτικά φορτία.

**2.** Παρατηρείται πως η διατομή 7589 έχει μεγάλη απόκλιση από τις υπόλοιπες τέσσερις. Τα αίτια πιθανότατα ευρίσκονται στα γεωμετρικά στοιχεία της διατομής. Η εξεταζόμενη διεπιφάνεια είναι σε συγκριτικά μεγαλύτερο βάθος (28εκ από την επιφάνεια και 8εκ από το έδαφος) από τις άλλες διατομές, επομένως προσεγγίζει περισσότερο το όριο πέραν του οποίου οι τάσεις μεταβάλλονται σε εφελκυστικές. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ο μηχανισμός του προγράμματος ξεχωρίζει τις στρώσεις ως υλικά με διαφορετικά χαρακτηριστικά. Με την παραδοχή της πλήρης συνεργασίας, αν οι στρώσεις που έχουν δημιουργηθεί έχουν ίδια χαρακτηριστικά τότε το πρόγραμμα ουσιαστικά περιγράφει μία μεγάλη στρώση συνολικού πάχους το άθροισμα τους.

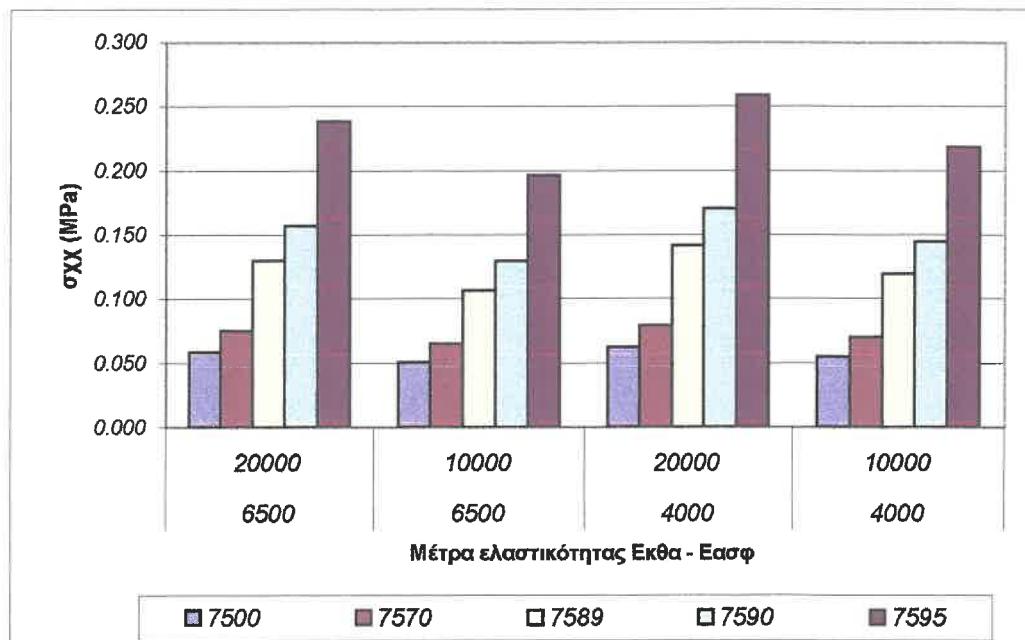
Οι διαφορές επομένως, πολλές φορές έχουν να κάνουν κυρίως με τη σχετική θέση της διεπιφάνειας μεταξύ των ΚΘΑ σε σχέση με το συνολικό πάχος ΚΘΑ και ως έτσι είναι καλύτερο να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα. Ίσως με αυτόν τον τρόπο, είναι ευκολότερο να ερμηνευτεί το φαινόμενο των τάσεων που γίνονται δυσμενέστερες όσο μικραίνει το πάχος της υπόβασης ΚΘΑ (όσο δηλαδή βρισκόμαστε πιο κοντά στο έδαφος). Σύμφωνα με το παραπάνω η κατάσταση γίνεται δυσμενέστερη στις τάσεις της διεπιφάνειας μεταξύ των δύο Κ.Θ.Α., όταν μικρού πάχους υπόβαση ΚΘΑ και μεγαλύτερη βάση. Γενικά πάντως, στη διεπιφάνεια ΚΘΑ έχουμε ικανές διαφορές κατά την μεταβολή του πάχους στρώσεων αλλά όχι εφελκυσμό.

**3.** Το μέτρο ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος δεν επηρεάζει ουσιαστικά τις τελικές οριζόντιες τάσεις στη διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ. Οι μεταβολές στις τάσεις εξαιπτίας του μέτρου ελαστικότητας της σταθεροποιημένης βάσης έχουν αρκετά μεγαλύτερη επιρροή. Παρατηρούμε πως ένα οδόστρωμα με  $E_{κθα}$  κοντά στο 20000MPa εμφανίζει ελαφρά ευμενέστερες τάσεις στην υπό εξέταση επιφάνεια από ένα αντίστοιχο που το μέτρο ελαστικότητάς του βρίσκεται πλησιέστερα στο 10000.

Γενικά, παρατηρούμε πως για τις τάσεις στη διεπιφάνεια των στρώσεων ΚΘΑ σε αντίθεση με το ασφαλτόμιγμα τα πάχη και τα  $E_{κθα}$  είναι αυτά που κυρίως μεταβάλουν την συμπεριφορά και όχι τα μέτρα ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος. Στην προκειμένη περίπτωση ο βαθμός ανομοιομορφίας κατά μήκους ενός οδοστρώματος είναι ίσως σημαντικός για τις οριζόντιες τάσεις στη διεπιφάνεια μεταξύ των δύο ΚΘΑ και υποδεικνύει τμηματική διαφοροποίηση στις φθορές ενός ενιαίου δρόμου.

Παρόλα αυτά, τα συμπεράσματα σε αυτή την θέση έχουν να κάνουν περισσότερο με την σχετική θέση της εξεταζόμενης διεπιφάνειας σε σχέση με τα άνω και κάτω όρια του ΚΘΑ και όχι με τα πάχη των στρώσεων όπως εξηγήθηκε στο 2.

Τέλος οι οριζόντιες τιμές τάσεων στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης έχουν ως εξής:



**Διάγραμμα 6.3** Τιμές οριζόντιας τάσης στον πυθμένα Κ.Θ.Α. Επιρροές από πάχη και μέτρα ελαστικότητας στρώσεων.

Για βοήθεια δίνεται, ο παρακάτω πίνακας γεωμετρικών χαρακτηριστικών:

Διατομή	7500	7570	7589	7590	7595
Ασφαλτόμιγμα (εκ.)	12.0	10.0	14.0	12.5	10.5
ΚΘΑ βάσης (εκ.)	20.0	20.0	14.0	8.5	5.5
ΚΘΑ υπόβασης (εκ.)	18.0	15.0	8.5	12.5	11.0

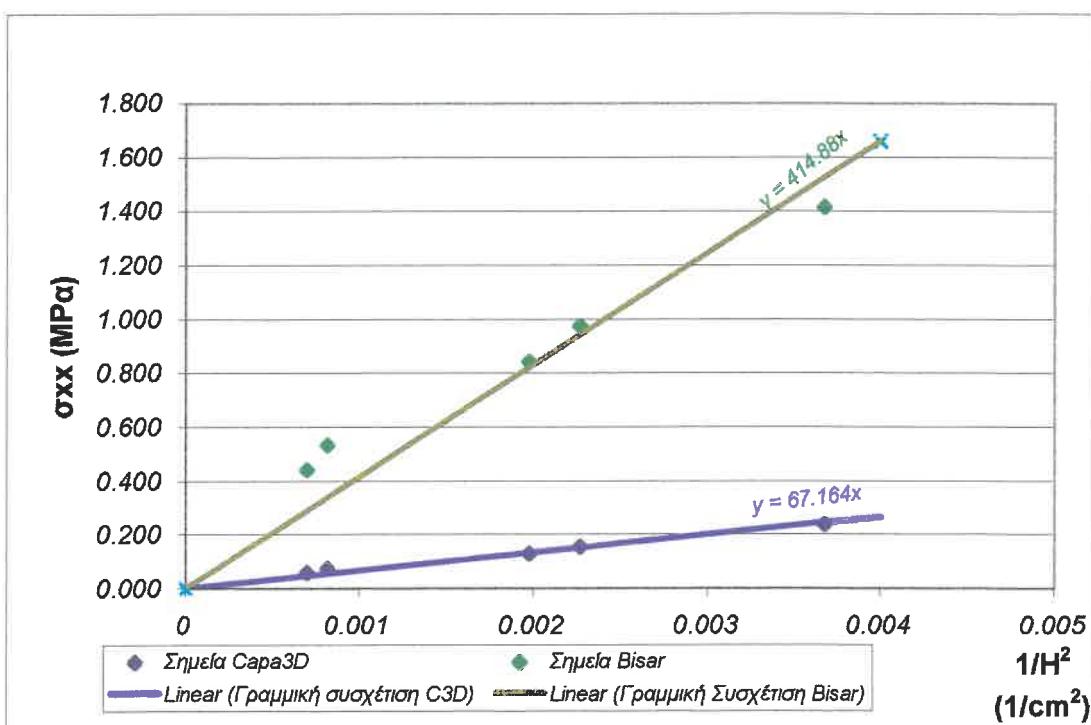
Παρατηρήσεις:

- Στην περίπτωση αυτή οι τιμές της οριζόντιας τάσης καθορίζουν την κόπωση της βάσης του οδοστρώματος (πυθμένας ΚΘΑ). Είναι εφελκυστικές και πρακτικά δεν επηρεάζονται κατ' αρχήν από το  $E_{ασφ}$ . Το  $E_{ΚΘΑ}$ , όπως και είναι αναμενόμενο έχει το ρόλο του και όσο μεγαλύτερο είναι, τόσο μεγαλύτερες και οι εφελκυστικές οριζόντιες τάσεις που δέχεται ο πυθμένας του ΚΘΑ. (Η παραδοχή της πλήρης συνεργασίας δεν πρέπει να λησμονείται).

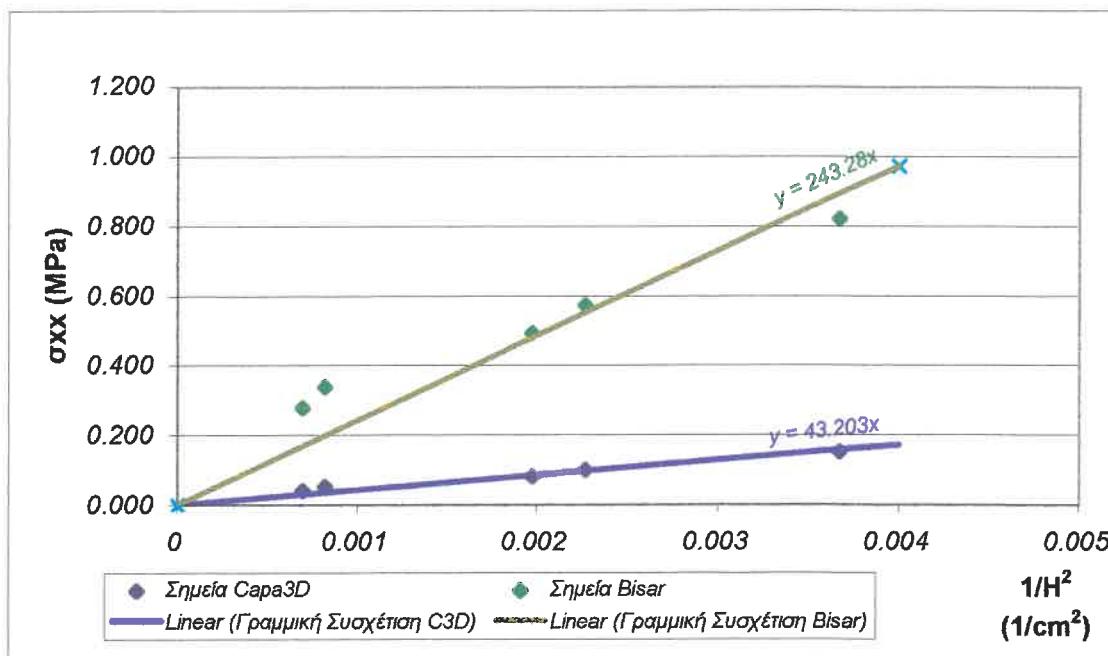
**2.** Χαρακτηριστικά, οι τιμές είναι ανάλογες του συνολικού πάχους διατομής (άσφαλτος+ΚΘΑ+ΚΘΑ) και κυρίως, ανάλογη του συνολικού πάχους ΚΘΑ. Ακολουθεί ιδιαίτερη διερεύνηση.

#### 6.4 Διερεύνηση αναλογίας $H_{ΚΘΑ}^2 \sim σ_{xx}$

Από το διάγραμμα 6.3 φαίνεται πως οι οριζόντιες τάσεις στην βάση ασφαλτομίγματος είναι ανάλογες με το συνολικό πάχος σταθεροποιημένης βάσης. Υπάρχει σχετική θεωρία η οποία εξάρτα αυτές τις δύο παραμέτρους [8], και μάλιστα ισχυρίζεται πως το αντίστροφο του τετραγώνου του πάχους του στρώματος ΚΘΑ σε ένα ημιάκαμπτο οδόστρωμα είναι ανάλογο των οριζοντίων τάσεων που εμφανίζονται στον πυθμένα του. Προσπαθώντας να εξεταστεί η αναλογία αυτή συσχετίσθηκε η τιμή της οριζόντιας τάσης που βρήκαμε με το Capa3D και το Bisar με το αντίστροφο του τετραγώνου του πάχους ΚΘΑ και στις 5 διατομές για δύο περιπτώσεις μέτρων ελαστικότητας ( $E_{ασφ}$ ,  $E_{ΚΘΑ}$ ). Παρατίθενται τα διαγράμματα και των δύο περιπτώσεων με σύγχρονη απεικόνιση των τιμών Capa3D και Bisar για σύγκριση.



Διάγραμμα 6.4 Έλεγχος αναλογίας  $\sigma_{xx} \sim 1/H^2$  με  $E_{ΚΘΑ}=20000$  και  $E_{ασφ}=6500$  MPa.



**Διαγράμματα 6.5** Έλεγχος αναλογίας  $\sigma_{xx} \sim 1/H^2$ , με  $E_{κεΑ}=10000$  και  $E_{σσφ}=6500$  MPa.

Γενικά και τα δύο προγράμματα επιβεβαιώνουν την παραπάνω θεωρία ότι το αντίστροφο του τετραγώνου του συνολικού πάχους ΚΘΑ ενός ημιακάμπου οδοστρώματος είναι ανάλογο με τις οριζόντιες τάσεις που εμφανίζει κατά την φόρτισή του στη βάση του ΚΘΑ. Οι διαφορές στην κλίση των ευθειών (διάγραμμα 6.4, 6.5) δείχνουν ότι το Bisar επηρεάζεται περισσότερο από το πάχος του ΚΘΑ από το Capa3D κάτι που φάνηκε και από τις τιμές των οριζόντιων τάσεων που είναι πολύ μεγάλες.

Τέλος με βάση τα παραπάνω η ανομοιομορφία κατασκευής ενός οδοστρώματος παρουσιάζεται ιδιαίτερα σημαντική για την διάρκεια ζωής του έργου αλλά κυρίως για τμήματα του έργου. Είναι σαφές ότι κατά μήκος του οδοστρώματος θα υπάρχουν τμήματα που θα αστοχούν αρκετά νωρίτερα. Θα έχουμε δηλαδή μια κόπωση διαφορετική από τμήμα σε τμήμα.

## 7. Διερεύνηση ειδικού προσομοιώματος με ολίσθηση σε διεπιφάνειες

### 7.1 Γενικά περί συνεργασίας

Οι στρώσεις σε ένα οδόστρωμα συνεργάζονται μεταξύ τους σε κάποιο βαθμό ο οποίος εξαρτάται από την φύση των υλικών αλλά και από τον τρόπο κατασκευής τους. Ένα οδόστρωμα δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μονολιθικό σώμα. Παρόλα αυτά στις αναλύσεις συχνά χρησιμοποιείται η θεώρηση πλήρης συνεργασίας στις διεπιφάνειες δεδομένου ότι πολλά λογισμικά δεν έχουν την δυνατότητα υπολογισμού με πλήρη ή μερική ολίσθηση.

Η επίδραση της ύπαρξης μερικής ή πλήρης ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων σταθεροποιημένης βάσης δεν είναι αμελητέα στην συμπεριφορά ημιακάμπτων οδοστρωμάτων σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία [7,8]. Η διαστασιολόγηση ενός οδοστρώματος βασίζεται σε συσχέτιση αποτελεσμάτων πλήρης συνεργασίας και πλήρης ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων σταθεροποιημένης βάσης με ανάλογες σχέσεις. Μια ολοκληρωμένη διερεύνηση επομένως, δεν θα ήταν αρκετό να περιοριστεί μόνο σε αποτελέσματα πλήρους συνεργασίας μεταξύ των στρώσεων. Έγινε προσπάθεια, λοιπόν, να ερευνηθεί και η περίπτωση ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων ΚΘΑ με χρήση των προγραμμάτων Capa3D και Bisar, δεδομένου ότι το Michpave δεν έχει την δυνατότητα προσομοίωσης ολίσθησης μεταξύ στρώσεων. Σημειώνεται ότι τόσο το Bisar όσο και το Capa3D παρέχουν την δυνατότητα της προσομοίωσης της συνεργασίας σε οποιοδήποτε ποσοστό με παραπλήσιο μηχανισμό.

Η δυνατότητα αυτή στηρίζεται και στις δύο περιπτώσεις στη μέθοδο συμβιβαστού ελατηρίου για διάτμηση στις διεπιφάνειες και δεν πρέπει να συγχέεται με την γνωστή τριβή [9]. Η τριβή προϋποθέτει μετακίνηση κάτι που δεν είναι αποδεκτό από τα προγράμματα αυτά αφού διακόπτει στην συνέχεια του συστήματος. Για αυτό το λόγο εισέρχεται ένα ενδιάμεσο στοιχείο

διεπιφάνειας (interface) πολύ μικρού πάχους το οποίο έχει την ικανότητα σαν ελατήριο να αντιστοιχεί τις διατμητικές τάσεις με παραμορφώσεις διεπιφάνειας και συνεπώς, σχετική μεταξύ της άνω και κάτω επιφάνειας.

Η συσχέτιση αυτή πραγματοποιείται με σχέσεις οι οποίες για το Bisar διατίθενται στο εγχειρίδιο που το υποστηρίζει [9]. Ο φυσικός προσδιορισμός του συμβιβαστού ελατηρίου (AK) δίνεται από τον τύπο,

$$AK = \frac{\text{σχετική οριζόντια μετατόπιση των στρώσεων}}{\text{τάσεις που ενεργούν στη διεπιφάνεια}} \quad [\text{m}^3/\text{N}] \quad \text{και} \quad \eta \quad \text{σχετική}$$

συνεργασία υπολογίζεται από τον τύπο:  $\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1+\nu}{E} \cdot r}$  όπου το  $r$  η ακτίνα του κυκλικού φορτίου,  $E$  το μέτρο ελαστικότητας του υπερκείμενου στρώματος,  $\nu$  ο λόγος poisson του ίδιου στρώματος και  $a$  ο συντελεστής συνεργασίας ( $a=0 \approx$  πλήρης συνεργασία,  $a=1 \approx$  πλήρης ολίσθηση)[9]. Η δημιουργία ολίσθησης συνεπώς είναι μία παράμετρος εισαγωγής που απλώς πρέπει να υπολογιστεί.

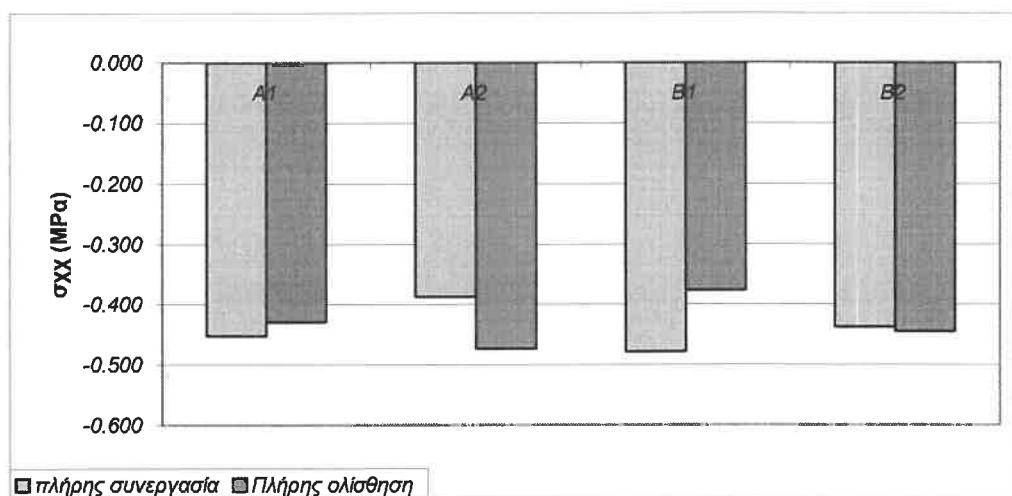
Στο Capa3D και γενικά στα Π.Σ., η προσομοίωση μιας διεπιφάνειας δεν είναι απλή και αποτελεί πολυπαραμετρικό πρόβλημα. Ο διαχωρισμός μεταξύ των στρώσεων γίνεται όπως αναφέρθηκε με την είσοδο «διασυνδετικού» υπερστοιχείου (interface element) και το οποίο έχει την δυνατότητα σχετικής ολίσθησης χωρίς να «σπάει» το πλέγμα. Αυτό το διασυνδετικό στοιχείο μπορεί να δεχτεί διαφορετικά μέτρα ελαστικής παραμόρφωσης που εκφράζουν τη συνεργασία (ελατήριο) σε κάθε διάσταση ώστε να προσομοιώνει καλύτερα την εκάστοτε περίπτωση συνεργασίας (σημείωση ότι το Bisar δεν έχει αντίστοιχη δυνατότητα προσομοίωσης σε όλες τις διευθύνσεις). Για τον προσδιορισμό ωστόσο, του βαθμού ολίσθησης απαιτείται πρώτα μελέτη ευαισθησίας ώστε να προσδιοριστεί στο ποσοστό που επιδρούν.

Τέλος έγινε και δειγματοληπτική ανάλυση με συνθήκες πλήρους και μερικής ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων ασφαλτομίγματος-ΚΘΑ με στόχο την

ενδεικτική καταγραφή της πιθανής επίδρασής της στη συμπεριφορά του οδοστρώματος.

## 7.2 Ολίσθηση μεταξύ στρώσεων σταθεροποιημένης βάσης

Σύμφωνα με τα προηγούμενα των κεφαλαίων 5, 6 το προσομοίωμα διερευνήθηκε και σε συνθήκες περιορισμένης συνεργασίας χρησιμοποιώντας τις ίδιες παραδοχές για τις διατομές και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών. Με τα αποτελέσματα των αναλύσεων, προέκυψαν οι παρακάτω τιμές οριζόντιας τάσης σε τρεις θέσεις, όπως και στα προηγούμενα, για την τυπική διατομή (7500) με προϋποθέσεις πλήρης ολίσθησης ανάμεσα στα ΚΘΑ οι οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα ασφαλτομίγματος είναι:



**Διάγραμμα 7.1** Οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα Ασφαλτομίγματος Δ.7500 με Ολίσθηση στρώσεων ΚΘΑ

Παρατίθεται για ευκολία των διαγραμμάτων ο πίνακας 5.1:

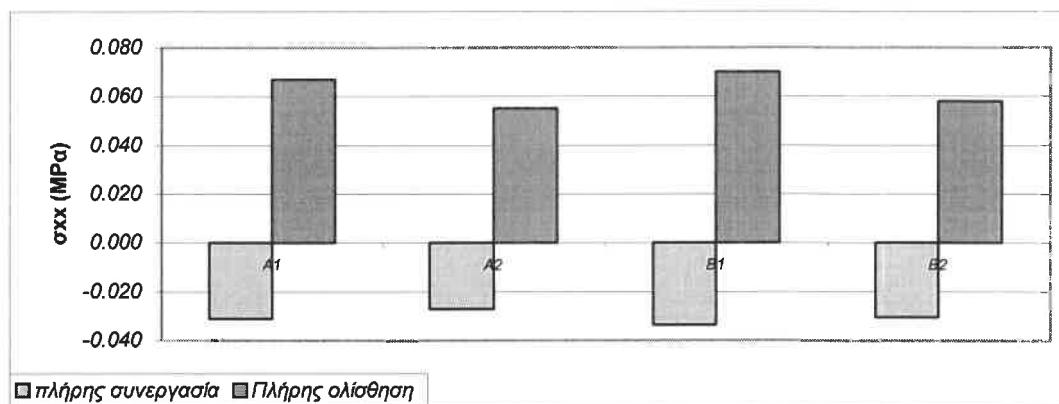
Ονομασία – κωδικός	E <sub>ασφ</sub> (MPa)	E <sub>ΚΘΑ</sub> (MPa)
A1	6500	20000
A2	6500	10000
B1	4000	20000
B2	4000	10000

**Πίνακας 5.1** Κωδικοποίηση διατομών με βάση τα μέτρα ελαστικότητας

Οι τάσεις στον πυθμένα ασφαλτομίγματος είναι ελάχιστα δυσμενέστερες εξαιτίας της μη συνεργασίας και αναλογικά με ότι προηγούμενο για τα μέτρα

ελαστικότητας. Επομένως δεν υπάρχει διαφοροποίηση ιδιαίτερη σε αυτό το σημείο είτε έχουν είτε δεν έχουν συνεργασία τα δύο ΚΘΑ.

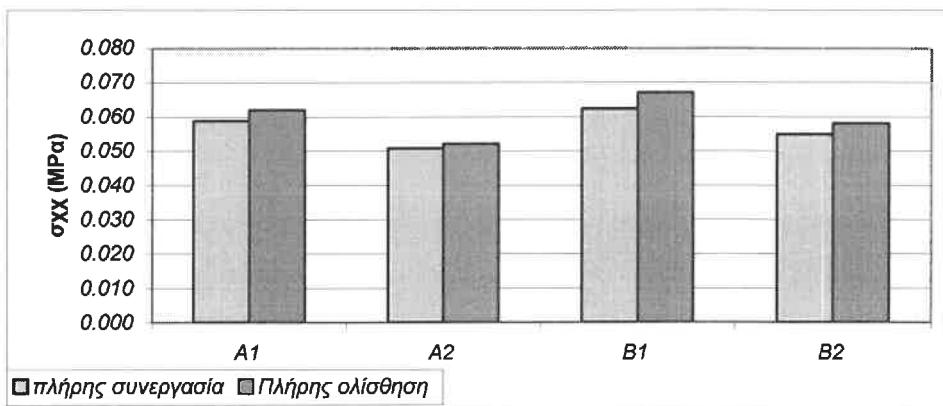
Οι αντίστοιχες τάσεις στη διεπιφάνεια μεταξύ ΚΘΑ-ΚΘΑ είναι:



**Διάγραμμα 7.2** Οριζόντιες τιμές έντασης στη διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ Δ. 7500 με ολίσθηση στρώσεων ΚΘΑ

Στη διεπιφάνεια των ΚΘΑ όπου υπάρχει και το "interface" υπάρχουν μεγάλες διαφορές. Με την παραδοχή της πλήρους συνεργασίας η διεπιφάνεια βρισκόταν οριακά υπό θλίψη. Σε συνθήκες όμως πλήρους ολίσθησης βρίσκεται υπό εφελκυσμό. Το παραπάνω κρίνεται λογικό αφού η διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ δεν μεταδίδει οριζόντιες τάσεις στο υποκείμενο στρώμα. Με αυτές τις τιμές πάντως υπάρχει εφελκυσμός στη διεπιφάνεια μεταξύ των ΚΘΑ και οι τιμές μεταβάλλονται ανάλογα με το πάχος των διατομών. Επομένως με αυτές τις συνθήκες η ανομοιομορφία κατά μήκος ενός οδοοστρώματος παιζει το ρόλο της και στον μηχανισμό αστοχίας τμημάτων της κατασκευής στην διεπιφάνεια ΚΘΑ.

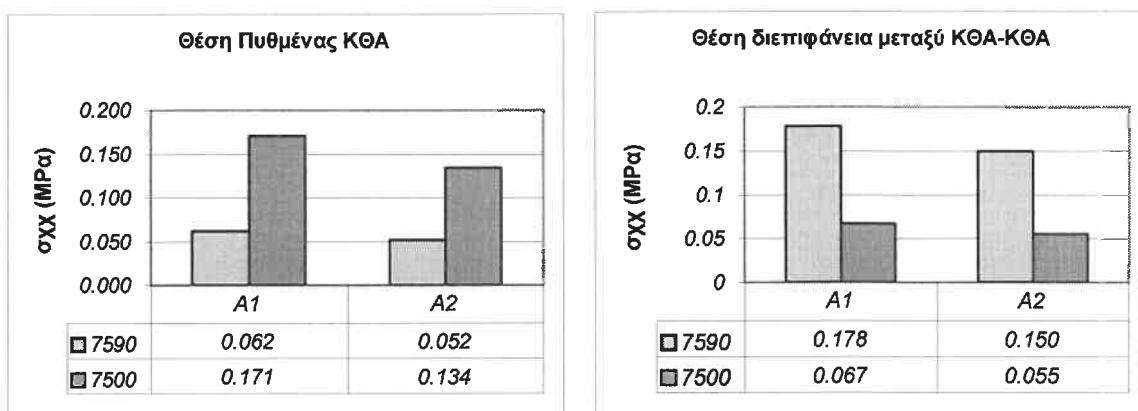
Τέλος στη διεπιφάνεια ΚΘΑ-έδαφος:



**Διάγραμμα 7.3** Τιμές οριζόντιας τάσης στον πυθμένα ΚΘΑ, Δ.7500 με ολίσθηση στρώσεων ΚΘΑ

Στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης παρατηρείται πως οι τάσεις πρακτικά αυξάνουν ελάχιστα. Η συνεργασία των δύο ΚΘΑ ισχύει για την κατακόρυφη διεύθυνση επομένως μεταφέρονται κατακόρυφες τάσεις οι οποίες δημιουργούν ελαφρά μεγαλύτερες οριζόντιες στη βάση ΚΘΑ. Αυτό ενδεχομένως μπορεί να εξηγηθεί από το ότι η κάτω στρώση κάμπτεται ανεξάρτητα από την άνω. Δηλαδή, το διασυνδετικό στοιχείο χωρίζει σε δύο «σώματα» το οδόστρωμα, τα οποία δεν μετατοπίζονται μαζί κατά την οριζόντια αλλά μόνο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

Σε αυτό το σημείο ένα συγκριτικό διάγραμμα για τις τιμές με πλήρη ολίσθηση σε δύο διατομές (7500, 7590) είναι απαραίτητο για την εποπτεία των μεταβολών λόγω ανομοιομορφίας και σε συνθήκες έλλειψης συνεργασίας.



**Διάγραμμα 7.4 α,β** Οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα ΚΘΑ και διεπιφάνεια ΚΘΑ -ΚΘΑ – Ολίσθηση στρώσεων ΚΘΑ

Είναι φανερές για μία ακόμη φορά πως οι μεταβολές των γεωμετρικών χαρακτηριστικών και μέτρων ελαστικότητας δημιουργούν μεγάλες αποκλίσεις τιμών οριζόντιας τάσεις στις κρίσιμες θέσεις ημιακάμπτου οδοστρώματος και με συνθήκες πλήρης ολίσθησης.

Επίσης έγινε ενδεικτική σύγκριση του Capa με το Bisar με συνθήκες ολίσθησης. Οι οριζόντια ένταση σε MPa στην τυπική διατομή 7500 με Ε<sub>κεΑ</sub> και E<sub>ασφ</sub> 20000 και 6500MPa αντίστοιχα ήταν:

	Ολίσθηση	CAPA3D	BISAR
ΠΥΘΜΕΝΑΣ ΚΘΑ	ΟΧΙ	0.059	0.442
	ΝΑΙ	0.062	0.617
ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΘΑ-ΚΘΑ	ΟΧΙ	-0.031	0.086
	ΝΑΙ	0.067	0.047
ΠΥΘΜΕΝΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	ΟΧΙ	-0.453	-0.463
	ΝΑΙ	-0.445	0.211

Πίνακας 7.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων BISAR – CAPA3D στην διατομή 7500-A1.

Οι διαφορές των δύο προγραμμάτων συνεχίζουν να είναι μεγάλες ακόμα και σε περιπτώσεις ολίσθησης μεταξύ των ΚΘΑ. Οι τιμές στο πυθμένα ΚΘΑ με ολίσθηση με το Bisar, είναι σε πλήρη αναλογία με τις τιμές πλήρης συνεργασίας χρησιμοποιώντας το ίδιο πρόγραμμα. Σημαντική διαφορά στον πυθμένα ασφαλτομίγματος όπου το Bisar δίνει εφελκυσμό σε σχέση με το Capa3D όπου συνεχίζει να δίνει θλίψη. Επίσης ενδιαφέρον, παρουσιάζουν οι τιμές του Bisar μεμονωμένες γιατί υπάρχει μια αυξομείωση της οριζόντιας τάσης όχι ανάλογη με το βάθος και αυτή η ανακατανομή των τάσεων έχει πολύ ιδιαίτερη μορφή.

Ενδιαφέρον σημείο είναι πως αν μία διαστασιολόγηση για την διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ γίνει με χρήση του μέσου όρου των τιμών για συνεργασία ή όχι με το Bisar δίνει τα ίδια αποτελέσματα με την τιμή που υπολογίζει το CAPA3D απευθείας για ολίσθηση. Η ολοκλήρωση ωστόσο, ενός τέτοιου σχολιασμού πρέπει να περιλαμβάνει και προβλέψεις διάρκεια ζωής και τάσεων σχεδιασμού.

Το Bisar γενικά επηρεάζεται πολύ περισσότερο από το Capa3D με την ύπαρξη ολίσθησης μεταξύ των ΚΘΑ-ΚΘΑ, η οποία μπορεί να εξηγηθεί ως διαφορά προσομοίωσης της ολίσθησης των δύο προγραμμάτων ή διαφορά στο πώς αντιμετωπίζεται μια τέτοια κατάσταση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε τρεις διαστάσεις.

Τελικά με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει συνεργασία μεταξύ των στρώσεων ΚΘΑ δεν φαίνεται να υπάρχει σημαντική αλλαγή στις τιμές στη βάση ασφαλτομίγματος και ΚΘΑ αλλά η διαφορά στη συμπεριφορά εστιάζεται κυρίως στη διεπιφάνεια του ΚΘΑ όπου μπορούν να δημιουργούνται πλέον εφελκυστικές δυνάμεις.

### 7.2.1 Συνθήκες μερικής ολίσθησης

Είναι γνωστό ότι στην πραγματικότητα οι θεωρήσεις της πλήρης συνεργασίας ή πλήρης ολίσθησης μεταξύ στρώσεων δεν ισχύουν. Στις διεπιφάνειες επικρατούν γενικά συνθήκες μερικής συνεργασίας. Προς τούτο έγινε η προκαταρκτική διερεύνηση συνθηκών μερικής ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων ΚΘΑ-ΚΘΑ αλλά και ασφαλτομίγματος-ΚΘΑ.

Οι υπολογισμοί έγιναν με ενδεικτικό βαθμό συνεργασίας μεταξύ ΚΘΑ-ΚΘΑ περίπου 50% ο οποίος προσδιορίστηκε με δοκιμές ευαισθησίας και στην ουσία αποτελεί μια πρώτη εκτίμηση.

Πιθανώς οι τιμές με 50% ολίσθηση προσεγγίζουν πιο ρεαλιστικά τις επιτόπου συνθήκες σε σχέση με 0 ή 100%. Η ακριβής εκτίμηση ρεαλιστικού ποσοστού θα μπορούσε να αποτελέσει

Πυθμένας Ασφαλτομίγματος Δ.7500

	Συνεργασία	100%	D=100	0%
A1	20000	-0.453	-0.447	-0.445
A2	10000	-0.388	-0.381	-0.376

Διεπιφάνεια ΚΘΑ Δ.7500

	Συνεργασία	100%	D=100	0%
A1	20000	-0.031	0.010	0.067
A2	10000	-0.027	-0.002	0.055

Πυθμένας ΚΘΑ Δ.7500

	Συνεργασία	100%	D=100	0%
A1	20000	0.059	0.059	0.062
A2	10000	0.051	0.050	0.052

αντικείμενο μιας άλλης εργασίας. Πρακτικά οι τιμές με μερική συνεργασία βρίσκονται κάπου ανάμεσα σε αυτές με πλήρη ή καμία συνεργασία όπως είναι και το πιο λογικό.

Μια «συνολική» άμεση σύγκριση του CAPA3D με το Bisar παρατίθεται στο παρακάτω πίνακα 7.2. Ισχύουν τα ίδια με τη 7.2 παράγραφο για τις συνθήκες υπολογισμού. Αριστερά είναι θέση υπολογισμού.

ΠΥΘΜΕΝΑΣ ΚΘΑ	Συνεργασία	CAPA3D	BISAR
	100%	0.059	0.442
	50%	0.059	0.654
	0%	0.062	0.617
ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΘΑ-ΚΘΑ	100%	-0.031	0.086
	50%	0.010	0.164
	0%	0.067	0.047
ΠΥΘΜΕΝΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΑΜΤΟΣ	100%	-0.453	-0.463
	50%	-0.447	0.226
	0%	-0.445	0.211

Πίνακας 7.2 Σύγκριση μερικής συνεργασίας CAPA3D-BISAR

Είναι σαφής η διαφορά αντιμετώπισης της ολίσθησης από τα δύο προγράμματα με το CAPA3D να μην επηρεάζεται στον ίδιο βαθμό με το BISAR που μεταβάλει αρκετά τις τάσεις στο οδόστρωμα. Οι τιμές στο πυθμένα ασφαλτομίγματος και ΚΘΑ με το Capa πρακτικά δεν μεταβάλλονται και επιρροή διαφαίνεται μόνο στη διεπιφάνεια ΚΘΑ όπου από θλίψη αλλάζουν σε εφελκυσμό. Με το Bisar όμως, υπάρχει γενικά μεγάλη επιρροή και αποτελεί νέα δυνατότητα έρευνας για να εξηγηθεί.

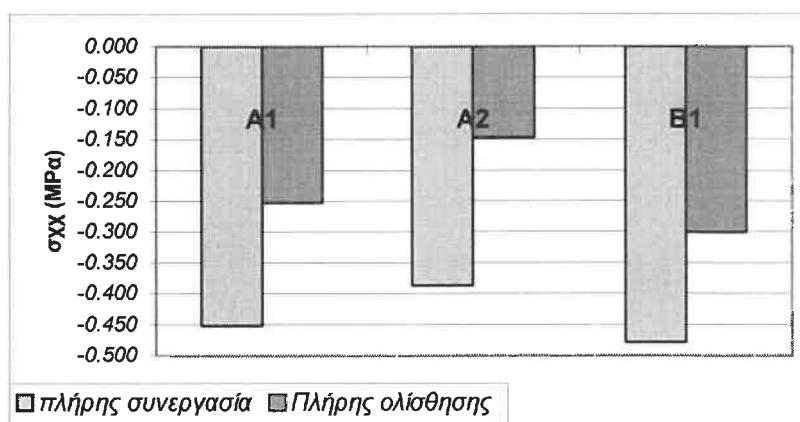
Θα πρέπει να επισημανθεί πως η περίπτωση ολίσθησης με το CAPA3D είναι ένα πολύπλοκο πρόβλημα και όχι απλώς μια εισαγωγή παραμέτρου όπως στο Bisar. Επομένως, η ολίσθηση με Π.Σ. σε τρεις διαστάσεις, όπως και με το Bisar, χρήζει περισσότερης και εκτενέστερης έρευνας.

### 7.3 Ολίσθηση στη διεπιφάνεια ασφαλτομίγματος-ΚΘΑ

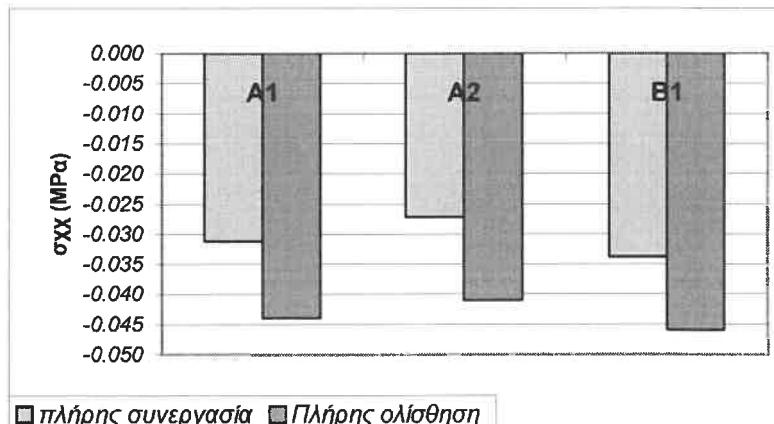
Αν και γενικά στην πράξη παρατηρείται σχετικά υψηλός βαθμός συνεργασίας στη συγκεκριμένη διεπιφάνεια, η τελευταία δεν μπορεί να είναι ποτέ 100%, όπως συχνά λαμβάνεται σε παρόμοιες αναλύσεις. Η λεπτομέρεια αυτή ίσως να

είναι σημαντική σε οριακές περιπτώσεις, όπως προκύπτει από την παρούσα δειγματοληπτική διερεύνηση, αλλά είναι απαραίτητη μια πολύ πιο συστηματική έρευνα για να καθοριστεί επακριβώς.

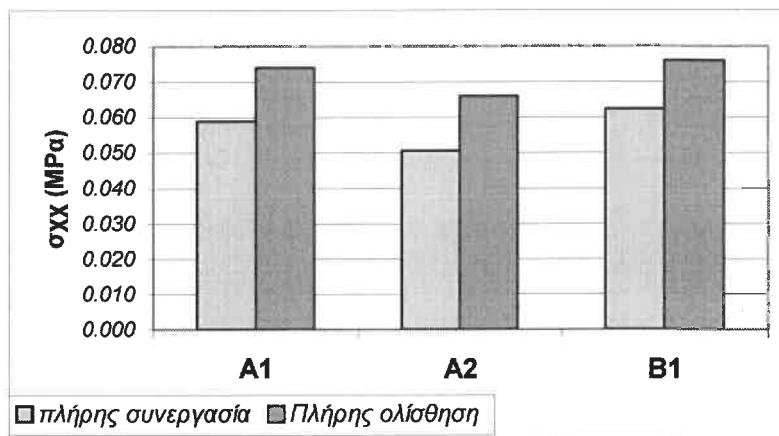
Επίσης η πλήρης ολίσθηση είναι μια προσπάθεια ενδεικτικής διερεύνησης της επιδρασης της περίπτωσης αποκόλλησης του ασφαλτομίγματος από το ΚΘΑ. Τέτοιες περιπτώσεις είναι δυνατό να εμφανιστούν τοπικά και στην πράξη (π.χ. σε περιοχές αρμών εργασίας του ΚΘΑ, ασυνεχειών κ.α.). Έγιναν οι υπολογισμοί στην τυπική διατομή (7500) με «interface» ανάμεσα στο ασφαλτόμιγμα και στο ΚΘΑ. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ενδιαφέροντα και παρατίθενται παρακάτω.



**Διάγραμμα 7.5** Οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα Ασφαλτομίγματος Δ.7500-Ολίσθηση Ασφ-ΚΘΑ



**Διάγραμμα 7.6** Οριζόντιες τάσεις στη Διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ Δ. 7500-Ολίσθηση Ασφ-ΚΘΑ

**Διάγραμμα 7.7** Οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα ΚΘΑ Δ. 7500-Ολίσθηση Ασφ-ΚΘΑ

Παρατηρήσεις:

Είναι φανερό πως με την ολίσθηση ανάμεσα στο ασφαλτόμιγμα και ΚΘΑ ουσιαστικά το οδόστρωμά αλλάζει συμπεριφορά. Οι οριζόντιες τάσεις, που μεταφέρονται κάτω από το ασφαλτόμιγμα είναι πολύ λιγότερες και το ασφαλτόμιγμα δέχεται πρακτικά μικρότερη καταπόνηση. Η επιρροή δείχνει μικρή σε αναλογία με τι θα περίμενε κάποιος αναλυτής, οπότε και εδώ απαιτείται περισσότερη διερεύνηση.

Σε σχέση με το BISAR έχουμε:

ΠΥΘΜΕΝΑΣ ΚΘΑ	Ολίσθηση	CAPAZD	BISAR
	ΟΧΙ	0.059	0.442
	ΝΑΙ	0.074	0.561
ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΘΑ-ΚΘΑ	ΟΧΙ	-0.031	0.086
	ΝΑΙ	-0.044	0.800
ΠΥΘΜΕΝΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	ΟΧΙ	-0.453	-0.463
	ΝΑΙ	-0.253	-0.486

Η ανακατανομή των τάσεων με ολίσθηση στη διεπιφάνεια ΚΘΑ-ασφαλτομίγματος είναι φανερή και με τα δύο προγράμματα. Το Bisar ωστόσο, δίνει πολύ μεγάλες αποκλίσεις στις τιμές ύπαρξης ή όχι πλήρους ολίσθησης. Είναι ενδιαφέρουσα η τιμή της οριζόντιας τάσης στη διεπιφάνεια ΚΘΑ -0.8MPa-

μία ιδιαίτερα μεγάλη τιμή καθώς και η υπολογιζόμενη τάση στον πυθμένα ασφαλτομίγματος όπου με το Bisar είναι λίγο ευμενέστερη.

### 7.3.1 Συνθήκες μερικής ολίσθησης ασφαλτομίγματος-ΚΘΑ

Σε αντιστοίχηση με αυτά που έγιναν για την μερική ολίσθηση των σταθεροποιημένων βάσεων υπολογίστηκαν και οι τιμές οριζόντιας τάσης στο πυθμένα ασφαλτομίγματος σε περίπτωση συνεργασίας (πρώτης εκτίμησης) 75% ασφαλτομίγματος-ΚΘΑ. Πραγματοποιήθηκε και εδώ μια αντίστοιχη μελέτη ευαισθησίας. Ήτσι έχουμε:

Από τον πίνακα διαφαίνονται μειωμένες οι θλιπτικές τιμές στη

Πυθμένας Ασφαλτικού Δ.7500 ολίσθηση ασφ-ΚΘΑ			
	Εα/Συνεργασία	100%	75%
A1	6500	-0.453	-0.324
B1	4000	-0.437	-0.368
	0%	-0.253	-0.309

βάση ασφαλτομίγματος σε περίπτωση 75% συνεργασίας σε σχέση με πλήρη συνεργασία.

Διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ Δ.7500 ολίσθηση ασφ-ΚΘΑ			
	Εα/Συνεργασία	100%	75%
A1	6500	-0.031	-0.032
B1	4000	-0.034	-0.035
	0%	-0.044	-0.046

Πάντως οι διαφορές κάτω του ασφαλτομίγματος είναι αμελητέες και επομένως η μερική ολίσθηση δεν μεταβάλλει την συμπεριφορά του οδοστρώματος κάτω από το ασφαλτόμιγμα.

Πυθμένας ΚΘΑ Δ.7500 ολίσθηση ασφ-ΚΘΑ			
	Εα/Συνεργασία	100%	75%
A1	6500	0.059	0.060
B1	4000	0.062	0.063
	0%	0.074	0.076

Τα αντίστοιχα με το Bisar είναι:

ΠΥΘΜΕΝΑΣ ΚΘΑ	Συνεργασία	CAPA3D	BISAR
	100%	0.059	0.442
	75%	0.060	0.561
	0%	0.074	0.632
ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΚΘΑ-ΚΘΑ	100%	-0.031	0.086
	75%	-0.032	0.800
	0%	-0.044	0.875
ΠΥΘΜΕΝΑΣ ΑΣΦΑΛΤΟΜΙΓΜΑΤΟΣ	100%	-0.453	-0.463
	75%	-0.324	-0.232
	0%	-0.253	-0.486

Οι τιμές των οριζόντιων τάσεων είναι αρκετά διαφορετικές. Το Bisar δίνει τιμές παραπλήσιες με αυτές που δίνει για πλήρη ολίσθηση ενώ θα περιμένει κανείς να

είναι κοντά στην πλήρη συνεργασία. Επίσης, η τιμή (-0.232) για την οριζόντια τάση στη βάση του ασφαλτομίγματος έρχεται σε αντίθεση με την τιμή για πλήρη ολίσθηση, όντας η τελευταία ίση με αυτήν της πλήρης συνεργασίας. Ίσως αυτή η συμπεριφορά να είναι αρκετά «περίεργη» και αντίθετη με τα άλλα αποτελέσματα, επομένως απαιτείται εκτενέστερη έρευνα.

## **8. Προσομοίωση και διερεύνηση ασυνέχειας στο υλικό σταθεροποιημένης βάσης**

### **8.1 Εισαγωγή**

Η ρωγμάτωση στη σταθεροποιημένη βάση στα ημιάκαμπτα οδοστρώματα είναι αποτέλεσμα διαφόρων αιτιών όπως κόπωση υλικού, συστολής ξήρανσης, αστοχίες, κατασκευαστικών αρμών κλπ. Η ύπαρξή τους γενικά προκαλεί προβλήματα στο σύνολο ή σε μέρη του οδοστρώματος. Ο τρόπος δημιουργίας των ρωγμών δεν είναι το αντικείμενο αυτής της μελέτης. Η μελέτη έγινε σε καθαρά ερευνητικό επίπεδο για μια πρώτη εκτίμηση (περισσότερο ποιοτική) των διαφορών στις τάσεις που εμφανίζονται στο οδόστρωμα πριν και μετά την ύπαρξη κάποιας ρωγμής. Κάτι το οποίο ίσως αποβεί χρήσιμο στη μελέτη συμπεριφοράς ενός οδοστρώματος σε βάθος χρόνου αφού η ύπαρξη πιθανής ρωγμής, όπως φαίνεται και στη συνέχεια, αλλάζει σε μεγάλο βαθμό τα οριζόντια εντατικά μεγέθη, επομένως και τη φθορά σε σχέση με το χρόνο.

Έχουμε πολλάν ειδών ρωγμές όπως, επιφανειακές από πάνω προς τα κάτω, ρωγμές που ξεκινούν από τη βάση προς τα πάνω και στο ΚΘΑ (όχι απαραίτητα σε όλο το ύψος). Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια προσομοίωσης ρωγμής/ασυνέχειας σε όλο το πάχος των σταθεροποιημένων στρώσεων.

### **8.2 Παρουσίαση, ανάλυση και μεταφορά στο Capa3D**

Η προσομοίωση μιας ασυνέχειας είναι γενικά επίπονη με ένα πρόγραμμα Π.Σ. Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων πλεονεκτεί στην μελέτη ασυνεχειών αφού η γεωμετρία των πλεγμάτων και οι συνθήκες δεσμών των στοιχείων μπορούν να καθοριστούν ανάλογα με τις επιθυμίες του ερευνητή. Στη δεδομένη περίπτωση απλώς χρησιμοποιούμε έτσι το πλέγμα και την συνέχεια του ΚΘΑ ώστε να δημιουργήσουμε ασυνέχεια. Η ρωγμή ουσιαστικά αποτελεί ένα είδος ασυνέχειας. Η απλοποίηση λοιπόν, που χρησιμοποιήθηκε τελικά ήταν να μελετηθεί μία απλή ασυνέχεια του ΚΘΑ όπου ουσιαστικά λειτουργεί και ως ρωγμή με παραδοχές [βλέπε και 2.3 παράγραφο], [3]. Η ασυνέχεια ξεκινά από

την κάτω επιφάνεια της σταθεροποιημένης υπόβασης και εκτείνεται έως την άνω επιφάνεια της βάσης, δηλαδή σε όλο το ύψος του στρώματος ΚΘΑ.

Η ασυνέχεια θεωρείται πως είναι στο κέντρο του πεδίου, το φορτίο συμμετρικό ως προς αυτή και εκτείνεται σε όλο το μήκος των έξη μέτρων του πλέγματος. Εφαρμόζοντας την συμμετρία και αναλύοντας το  $\frac{1}{4}$  του φορέα, η ρωγμή συμπίπτει με τον άξονα X στην μία πλευρά του υπό ανάλυση πεδίου. Η παραπάνω τοποθέτηση του συστήματος αξόνων έγινε σκόπιμα αφού απλοποιεί υπερβολικά την διαδικασία δημιουργίας του μητρώου από τον υπολογιστή και κυρίως από το χρήστη και δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα στην ανάλυση. Με ελευθέρωση των κόμβων του στρώματος ΚΘΑ που βρίσκονται πάνω στον άξονα X, δημιουργείται ασυνέχεια στο υλικό του ΚΘΑ από την μία πλευρά του πεδίου. Τελικό αποτέλεσμα, μια επιφάνεια ασυνέχειας στο ΚΘΑ από την μία πλευρά, κατά τον άξονα των X, η οποία προσομοιάζει μία ρηγμάτωση του.

Δεν έχει εξεταστεί η παράμετρος πλήρωσης της ρωγμής (ασυνέχειας) με κάποιο υλικό, αλλά έχει εξεταστεί η συμπεριφορά της ως ασυνέχεια και μόνο υλικού. Μία ρωγμή έχει υλικό πλήρωσης και μία κάποια συνεργασία των παρειών της από τριβές μεταξύ των, άρα όχι πλήρης ασυνέχεια. Αυτές μάλιστα οι τριβές φθείρουν το υλικό των παρειών και δημιουργούν ένα λεπτόκοκκο υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται ως υλικό πλήρωσης και επιδρά στην όλη συμπεριφορά του συστήματος (ρωγμή-οδόστρωμα). Το υλικό πλήρωσης μπορεί να αποτελείται και από εξωτερικό υλικό όπως εδαφικό που ανέρχεται μέσω της ρωγμής. Επίσης δεν έχει ληφθεί υπόψη η πιθανότητα πλήρωσης της ασυνέχειας και με νερό και η επίδραση αυτού.

Ο προσανατολισμός της ασυνέχειας σε σχέση με την κίνηση του τροχού δεν έχει νόημα σε μία στατική ανάλυση αφού δεν υπάρχει κίνηση. Το είδος της κατεύθυνσή της, κατά μήκος της κίνησης ή εγκάρσια σε αυτή, έχει σημασία αν υπάρχει κίνηση, αλλά στην προκειμένη περίπτωση δεν μπορεί να διευκρινιστεί η διαφορά. Έχοντας το παραπάνω υπόψη, δεν ελέγχθηκε μία διεύθυνση

τάσεων αλλά και οι δύο και στα αποτελέσματα απλώς χρησιμοποιήθηκε η δυσμενέστερη.

Η ρωγμή η οποία εξετάστηκε θεωρείται κατά μήκος του δρόμου και πάνω στην τροχιά των τροχών των οχημάτων. Μία τέτοια ρωγμή μπορεί να είναι αποτέλεσμα κόπωσης (με την διάρκεια των χρόνων) αλλά και κατασκευαστικού αρμού (πριν κυκλοφορηθεί ο δρόμος). Γι' αυτό τον λόγο το εύρος τιμών του μέτρου ελαστικότητας σταθεροποιημένης βάσης μπορεί πλέον να είναι ίσο με το αρχικό αλλά μπορεί και να είναι αποδυναμωμένο σε κάποιο βαθμό σύμφωνα με την θεωρία πως το ΚΘΑ αποδυναμώνεται με την πάροδο του χρόνου [8]. Έτσι επιλέχτηκε ως μέγιστο το 20000MPa και ως ελάχιστη τιμή τα 5000MPa (πίνακας 8.1a). Οι διατομές πλέον, δεν αντιπροσωπεύουν αρχική κατάσταση αλλά μία κατάσταση υφισταμένου για αρκετά χρόνια οδοστρώματος. Για τον παραπάνω λόγο, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο νόμος αστοχίας (σχέση 5.1) και οι συγκρίσεις θα γίνουν μόνο με τις οριζόντιες τάσεις,

Ονομασία – κωδικός	$E_{ασφ}$ (MPa)	$E_{ΚΘΑ}$ (MPa)
A1	6500	20000
A2	6500	10000
A3	6500	5000
B1	4000	20000
B2	4000	10000
B3	4000	5000

Πίνακας 8.1a Κωδικοποίηση διατομών για την διερεύνηση με ασυνέχεια

Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο Capa3D το μόνο που άλλαξε για τις προϋπάρχουσες διατομές ήταν η πρόσθεση της ασυνέχειας ή ουσιαστικά η αποδέσμευση των κατάλληλων κόμβων του πλέγματος. Όλα τα άλλα χαρακτηριστικά διατηρήθηκαν τα ίδια για να έχουμε άμεσα συγκριτικά αποτελέσματα με τα προηγούμενα χωρίς ασυνέχεια.

## 8.3 Αποτελέσματα - Παρατηρήσεις

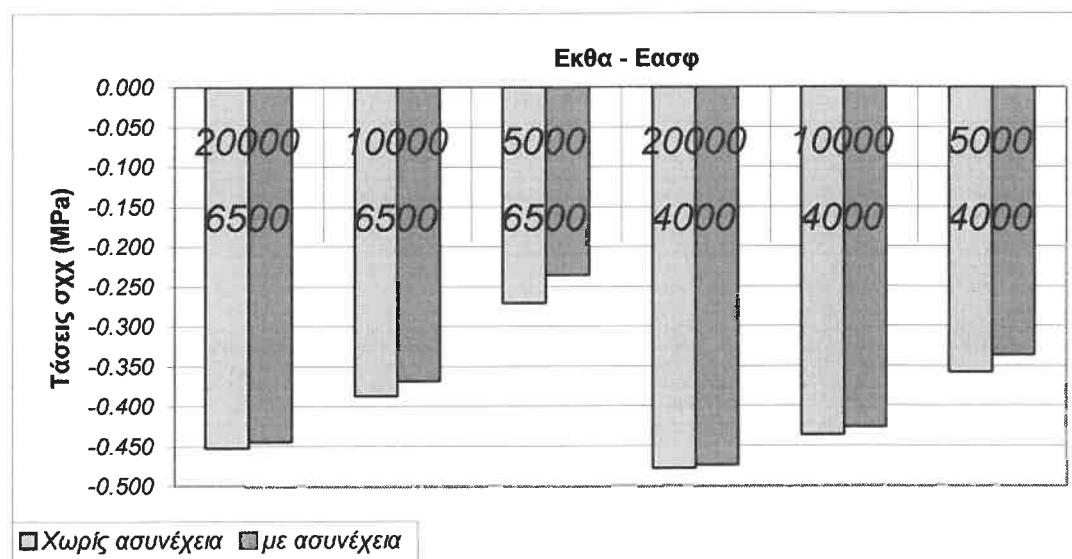
Θα χρησιμοποιηθεί και εδώ η ίδια παρουσίαση των αποτελεσμάτων και των παρατηρήσεων όπως και στα προηγούμενα. Δηλαδή θα χωριστούν σε τρεις ομάδες (πυθμένας ασφαλτομίγματος – διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ – πυθμένας ΚΘΑ) ξεκινώντας από τον πυθμένα ασφαλτομίγματος.

### 8.3.1 Πλήρης συνεργασία στρώσεων

Οι δοκιμές έγιναν για τρεις διατομές τις 7500, 7589, 7595 (σχήμα 5.2). Η 7500 είναι και η διατομή αναφοράς και τα αποτελέσματα αναλυτικά παρατίθονται στη συνέχεια (πίνακας 8.1 και διάγραμμα 8.1):

Δ.7500	Εασφ	ΕΚΘΑ	Χωρίς	Με
			ασυνέχεια	Ασυνέχεια
A1	6500	20000	-0.453	-0.455
A2	6500	10000	-0.388	-0.386
A3	6500	5000	-0.272	-0.260
B1	4000	20000	-0.479	-0.481
B2	4000	10000	-0.437	-0.439
B3	4000	5000	-0.359	-0.356

**Πίνακας 8.1** Αποτελέσματα στη βάση ασφαλτομίγματος της διατομής 7500.



**Διάγραμμα 8.1** Οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα Ασφαλτομίγματος Δ.7500 με ή χωρίς ασυνέχεια.

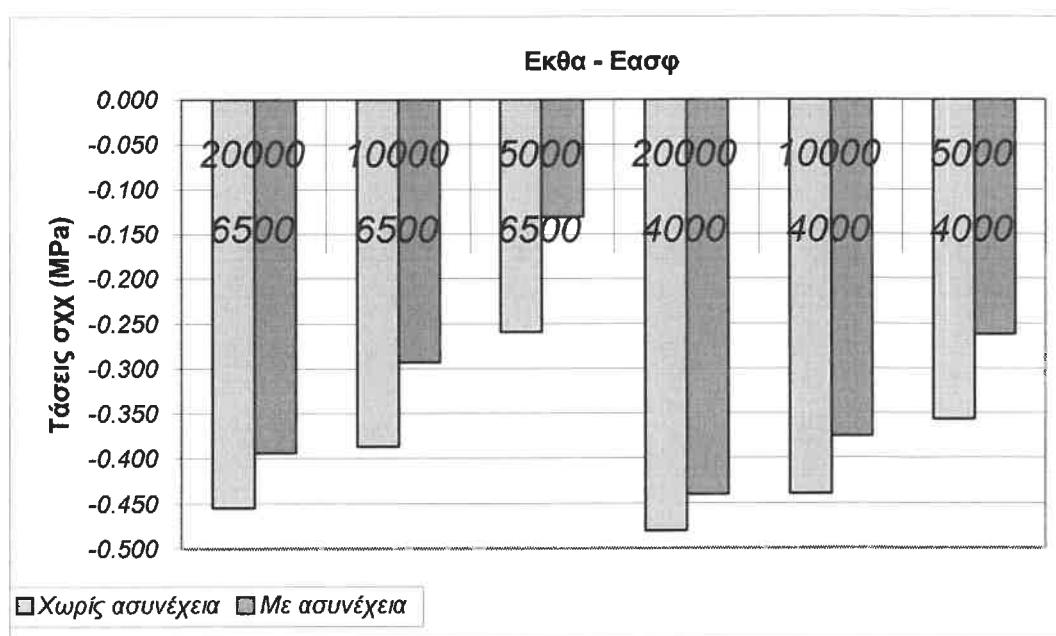
Οι τιμές στους άξονες X, Z δεν είναι ίδιες λόγω της ασυνέχειας, για αυτό γενικά, χρησιμοποιούνται μόνο οι δυσμενέστερες τιμές της οριζόντιας τάσης (σxx ή σzz), αφού δεν έχει ενδιαφέρον να γίνουν δεκτές οι τιμές μόνο από ένα

άξονα. Παρατηρούμε πως οι τιμές με την ύπαρξη ασυνέχειας είναι ελαφρά δυσμενέστερες για τον πυθμένα του ασφαλτομίγματος. Οι διαφορές εξαιτίας ύπαρξης ασυνέχειας είναι πολύ μικρές της τάξεως του 2-14%. Οι διαφορές μεγαλώνουν όσο παλιώνει το οδόστρωμα και μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας των στρώσεων και ειδικά του Κ.Θ.Α.

Αναλυτικότερα για τη διατομή 7595 που είναι αυτή με τα μικρότερα πάχη στρώσεων είναι:

Δ.7595	Εασφ	ΕΚΘΑ	Χωρίς	Με
			Ασυνέχεια	Ασυνέχεια
A1	6500	20000	-0.455	-0.446
A2	6500	10000	-0.387	-0.358
A3	6500	5000	-0.259	-0.198
B1	4000	20000	-0.481	-0.479
B2	4000	10000	-0.439	-0.428
B3	4000	5000	-0.357	-0.324

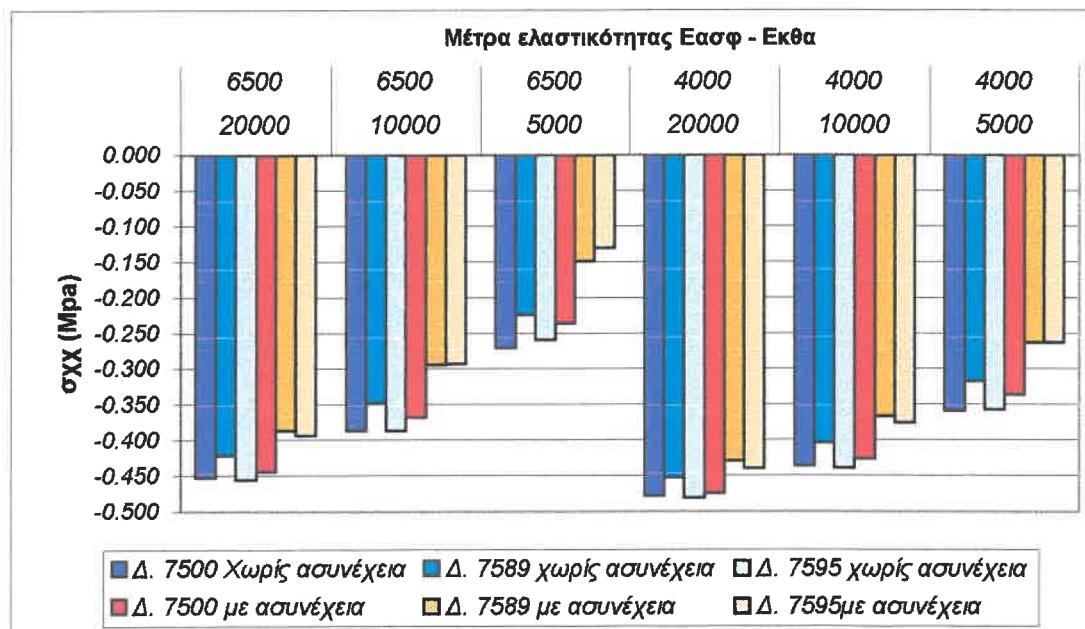
**Πίνακας 8.2** Αποτελέσματα στον πυθμένα ασφαλτομίγματος για την διατομή 7595.



**Διάγραμμα 8.2** Οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα ασφαλτομίγματος Δ.7595 με ή χωρίς ασυνέχεια.

Τα αποτελέσματα της 7595 σε σχέση με αυτά της 7500 είναι αρκετά ενδιαφέροντα. Οι διαφορές εδώ είναι πολύ μεγαλύτερες από πριν, της τάξεως του 10-50%, αλλά πάντα δυσμενέστερες. Ένα οδόστρωμα μάλιστα, με

$E_{ασφ}=6500 \text{ MPa}$  και ισχνή σταθεροποιημένη βάση από την πάροδο του χρόνου ( $E_{κθΑ}=5000$ ) έχει μια μείωση των θλιπτικών φορτίων κατά 50%, δηλαδή οι τάσεις μειώνονται στο μισό. Σε ότι έχει να κάνει με τα μέτρα ελαστικότητας ισχύουν τα ίδια με την 7500. Είναι φανερό πως η συγκεκριμένη διατομή επηρεάζεται πολύ περισσότερο από την τυπική και η διαφορά τους έγκειται στα διαφορετικά πάχη των επιμέρους στρώσεων. Για τον λόγο αυτό στη συνέχεια παρατίθεται ένα διάγραμμα με στοιχεία και από τις τρεις διατομές με ή χωρίς ρωγμή και σε όλους τους συνδυασμούς  $E_{ασφ}$ - $E_{κθΑ}$ . Ο πίνακας των τιμών μπορεί να βρεθεί στο παράρτημα.



Διάγραμμα 8.3 Επίδραση ασυνέχειας σε όλες τις διατομές με όλα τα μέτρα ελαστικότητας.

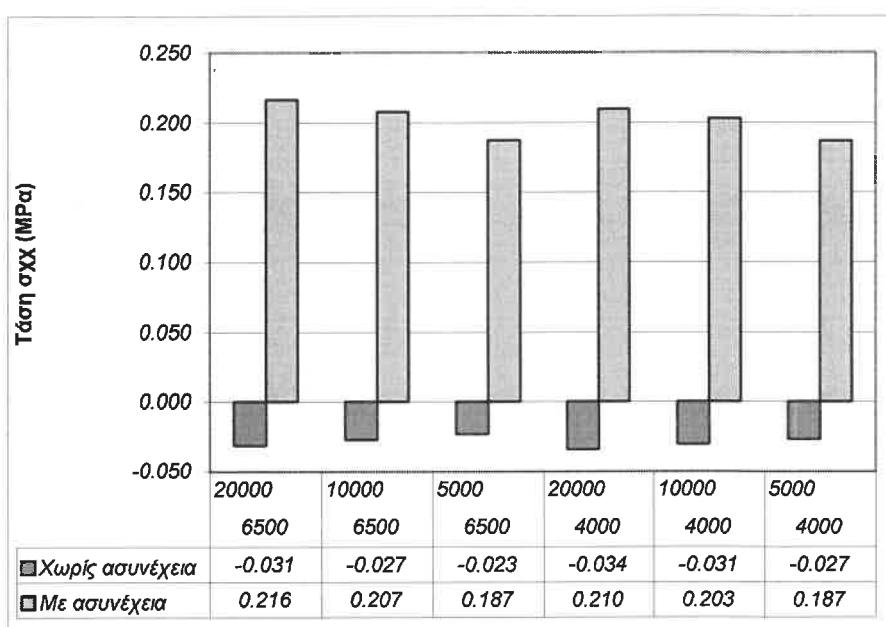
Στο παραπάνω διάγραμμα είναι διακριτή η επιρροή του πάχους (ιδιαίτερα του Κ.Θ.Α.) στις μεταβολές των τιμών λόγω της ύπαρξης ασυνέχειας. Όσο μειώνεται το συνολικό πάχος του Κ.Θ.Α. η επιρροή (πάντα δυσμενής) αυξάνεται. Από το διάγραμμα μπορούμε να καταλήξουμε πως για τα μέτρα ελαστικότητας ισχύουν ότι προαναφέρθηκε στη διατομή αναφοράς, δηλαδή όσο μικραίνουν τα μέτρα ελαστικότητας τόσο μεγαλώνουν οι διαφορές και ειδικά για το ΕκθΑ. Συνολικά λοιπόν, οι μειωμένων διαστάσεων διατομές θα βρεθούν σε δυσμενέστερη κατάσταση όταν και αν ρηγματωθούν με την πάροδο του χρόνου ή αν έχουν κάποια ρωγμή κατά την κατασκευή. Στην

προσομοίωση που γίνεται και είναι δεδομένο ότι αυτές οι διαφορές δεν αντιστοιχίζονται σε διαφορετικά οδοστρώματα αλλά κατά μήκος ίδιου.

Εξετάζοντας την θέση στη διεπιφάνεια Κ.Θ.Α.-Κ.Θ.Α. έγιναν τα παρακάτω:

Για τις τιμές του ΚΘΑ χρησιμοποιήθηκαν όλες οι διατομές (5) και τα αποτελέσματα αναλυτικά για όλες υπάρχουν στο παράρτημα. Αναφορικά παρατίθονται οι τιμές για την 7500 που έχουν ως εξής:

Στα παρακάτω διαγράμματα οι πίνακες έχουν ενσωματωθεί και αναφέρονται στη δυσμενέστερη οριζόντια τάση. Έχουν χρησιμοποιηθεί παραπλήσια χρώματα για τις τιμές με ασυνέχεια που διαχωρίζουν τις διατομές και το ίδιο και για τις τιμές χωρίς ασυνέχεια.



**Διάγραμμα 8.4** Αποτελέσματα στη διεπιφάνεια ΚΘΑ για την διατομή 7500

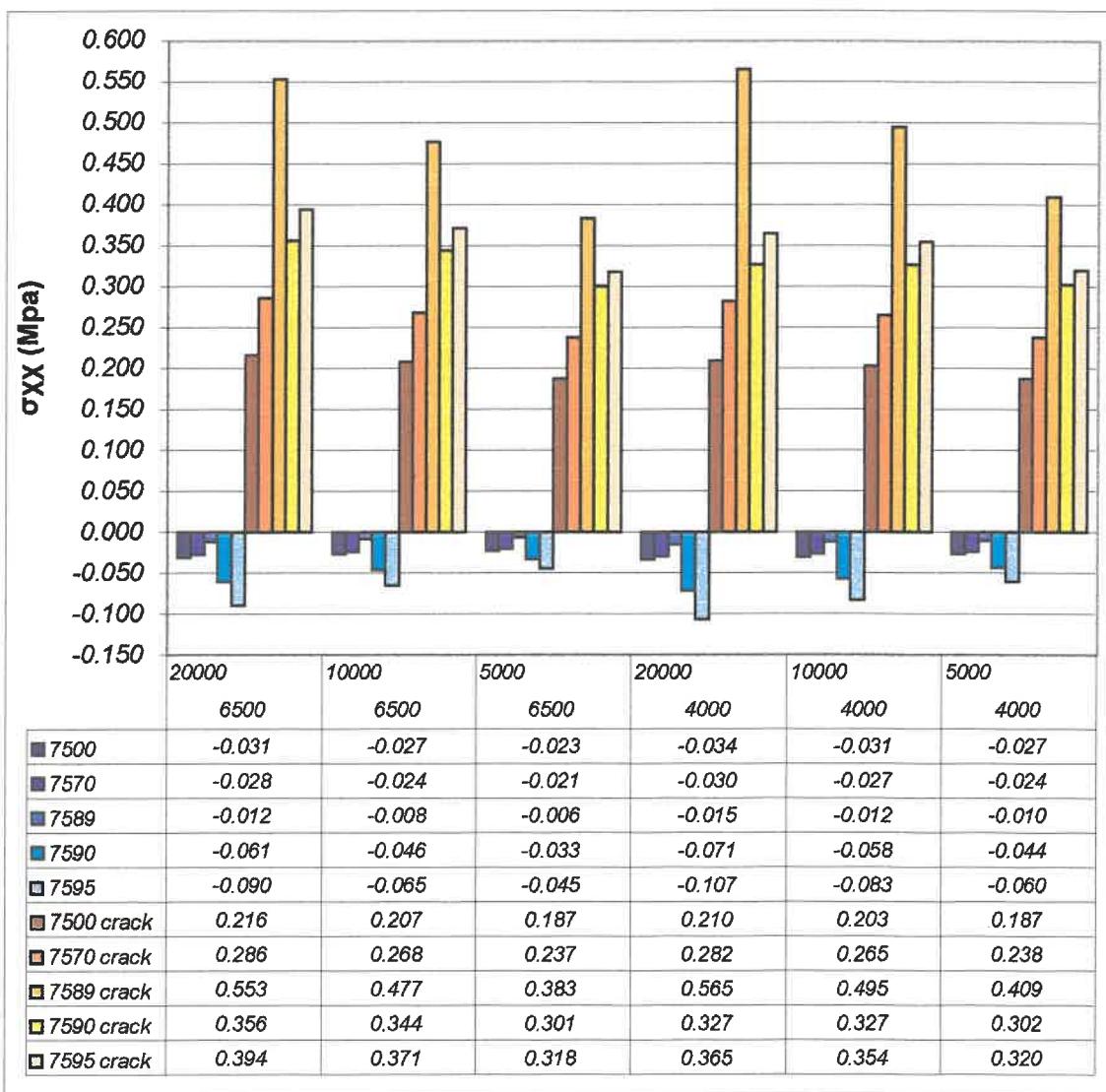
Στη διεπιφάνεια μεταξύ των σταθεροποιημένων βάσεων όπως φαίνεται και στην τυπική διατομή (διάγραμμα 8.4) είναι χαρακτηριστικές οι διαφορές στις τιμές των οριζόντιων τάσεων. Οι μεταβολές είναι τεράστιες σε σχέση με τις μεταβολές που βρέθηκαν για το ασφαλτόμιγμα. Ενώ χωρίς ασυνέχεια η διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ για κάθε συνδυασμό  $E_{ασφ}}-E_{κθα}$  ήταν σε κατάσταση

εφελκυσμού, με την ασυνέχεια οι τάσεις πια είναι εφελκυστικές και αρκετά μεγάλες.

Από τις προηγούμενες παραγράφους (6.1.2) ήταν γνωστό το γεγονός πως τα μέτρα ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος στη διεπιφάνεια του ΚΘΑ, δεν μεταβάλουν τις τάσεις σε ικανό σημείο ώστε να μπορεί κανείς να ισχυρίζεται επιρροή από αυτά. Το παραπάνω ισχύει και με την ύπαρξη ασυνέχειας, όπου στην ουσία δεν παρατηρείται σχετική διαφορά στις τάσεις των τιμών ΚΘΑ με ασυνέχεια, εξαιτίας των μέτρων ελαστικότητας ασφαλτομίγματος και επομένως και τον διαφορετικών εποχών σε ένα χρόνο. Οι διαφορές που μπορεί να κάνει η αποδυνάμωση του ΚΘΑ στις οριζόντιες τάσεις, με την πάροδο του χρόνου είναι αισθητές και μάλιστα ευμενέστερες.

Όσον αφορά τα πάχη των στρώσεων και πως αυτά επηρεάζουν τις μεταβολές της συμπεριφοράς της προσομοίωσης με την ύπαρξη ή όχι ασυνέχειας υπολογίστηκαν:(Διάγραμμα 8.5)

Το συγκεντρωτικό διάγραμμα (8.5) βοηθάει στην κατανόηση της επιρροής του πάχους σε σχέση με τις διαφορές που κάνει η ύπαρξη της ασυνέχειας. Είναι χαρακτηριστικό ότι η ρωγμή επηρεάζει περισσότερο τις διατομές με μικρά πάχη (7595, 7590) από τις διατομές με μεγαλύτερα (7500, 7570) στη διεπιφάνεια των ΚΘΑ.

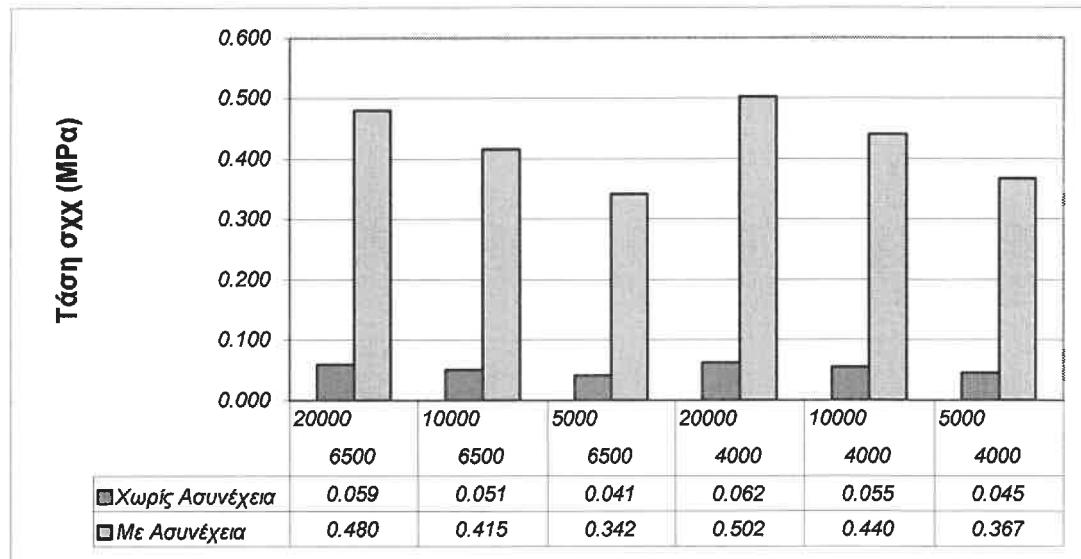


**Διάγραμμα 8.5** Οριζόντιες τάσεις με και χωρίς ασυνέχεια στη διεπιφάνεια ΚΘΑ.

Γενικά, οι τιμές στη διεπιφάνεια των ΚΘΑ ενώ πριν την ρωγμή ήταν θλιπτικές με την ύπαρξη ρωγμής, όχι μόνο γίνονται εφελκυστικές αλλά παίρνουν σχετικά μεγάλες τιμές (μέχρι και 0.565MPa). Σημειώνεται επίσης ότι οι τιμές αυτές είναι με παραδοχή πλήρης συνεργασίας μεταξύ στρώσεων και πλήρης ασυνέχειας υλικού για το ΚΘΑ χωρίς ύπαρξη υλικού πλήρωσης.

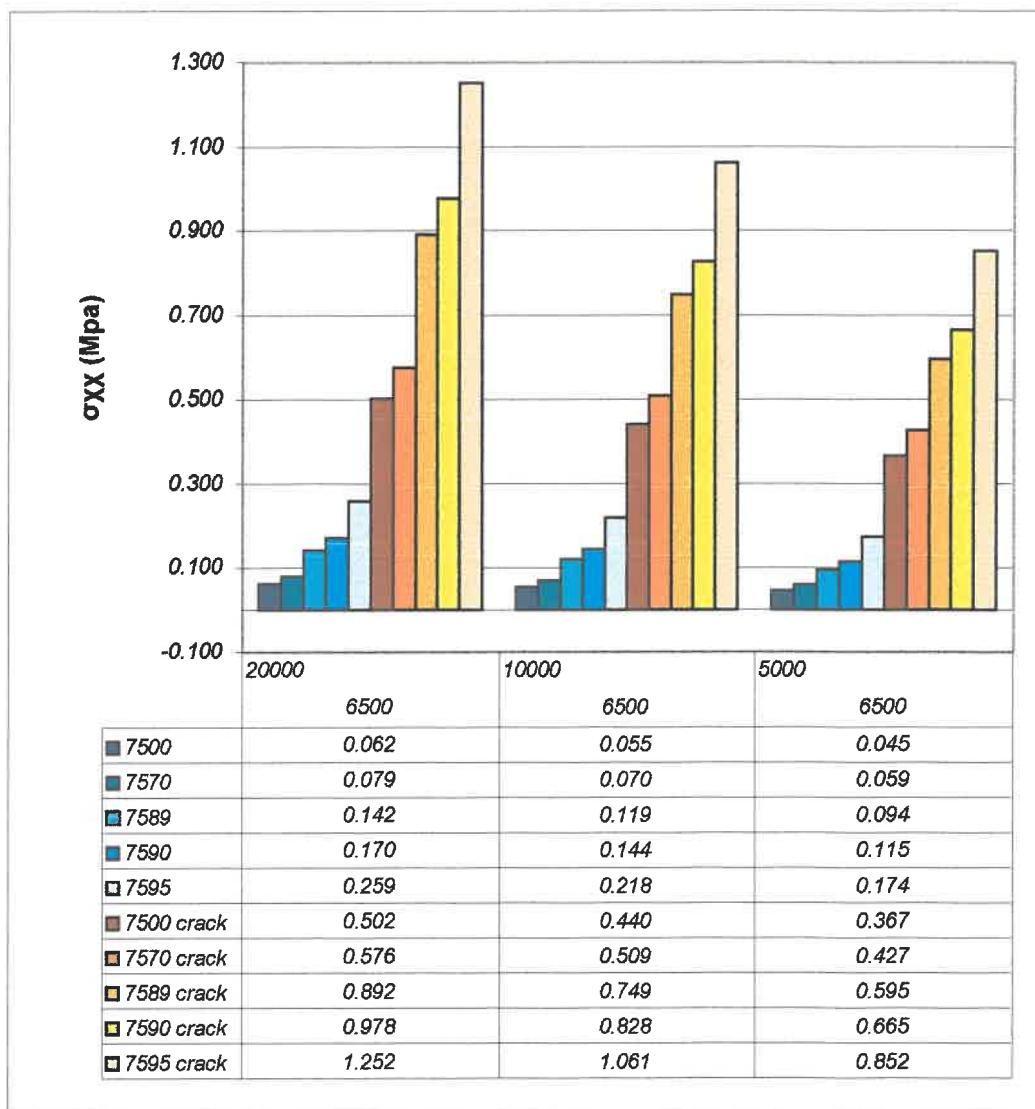
Συνεχίζοντας την διερεύνηση στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης υπολογίστηκαν οι οριζόντιες τάσεις στην υπόβαση ΚΘΑ το οποίο είναι ένα «κρίσιμο σημείο» για το οδόστρωμα. Είναι όλες εφελκυστικές και από πριν έχουμε δει πως δεν επηρεάζονται από τις διακυμάνσεις του μέτρου ελαστικότητας του ασφαλτομίγματος το οποίο μπορεί να προέρχεται από

θερμοκρασιακές μεταβολές. Στην διατομή αναφοράς οι τιμές έχουν ως εξής: (αναλυτικότερα στο παράρτημα)



**Διάγραμμα 8.6** Οριζόντιες τάσεις τυπικής διατομής (7500) με και χωρίς ασυνέχεια στον πυθμένα ΚΘΑ

Για το μέτρο ελαστικότητας της σταθεροποιημένης βάσης φαίνεται, αρχικά, πως όσο μεγαλύτερο είναι τόσο αυξάνεται και η μεταβολή προς το δυσμενέστερο για τις τιμές οριζόντιας εντατικής κατάστασης της βάσης ΚΘΑ. Ωστόσο μια ανάλυση των αποτελεσμάτων δίνει πως η αύξηση των εφελκυστικών τάσεων στη βάση του ΚΘΑ εξαιτίας ασυνέχειας για την διατομή 7500 είναι σταθερή και περίπου 800% σε όλους τους συνδυασμούς Εασφ-Εκθα. Για την επιρροή του πάχους των στρώσεων (κυρίως ΚΘΑ) βοηθάει το παρακάτω συγκεντρωτικό διάγραμμα. Έχουν παραληφθεί οι τιμές για  $E_{ασφ}=4000$  MPa (B1, B2, B3) αφού οι διαφορές με  $E_{ασφ}=6500$  είναι αμελητέες.



**Διάγραμμα 8.7** Οριζόντιες τάσεις με και χωρίς ασυνέχεια στον πυθμένα ΚΘΑ.

Το πάχος της σταθεροποιημένης βάσης επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το ποσοστό μεταβολής των τιμών που δημιουργεί η ασυνέχεια. Στην διατομή αναφοράς (7500) η αύξηση, λόγω ρωγμής, είναι της τάξης του 800% ενώ στην διατομή με τις μικρότερες διαστάσεις 7595, η αύξηση αυτή πέφτει στα επίπεδα του 500%. Διαφορά μεταξύ των ακραίων περιπτώσεων είναι υπαρκτή και στις άλλες διατομές οι τιμές των οποίων κυμαίνονται ανάμεσα σε αυτά τα επίπεδα αύξησης ανάλογα με το πάχος ΚΘΑ.

Μετά από όλους αυτούς τους υπολογισμούς και συγκρίσεις πρέπει να σταθεί κανείς στα παρακάτω τρία σημαντικά σημεία: (Είναι βασικό να τονιστεί ότι οι παρατηρήσεις αυτές βασίζονται σε τιμές που υπολογίστηκαν με την παραδοχή

πλήρης συνεργασίας των στρώσεων και την παραδοχή της ρωγμής ως πλήρης ασυνέχειας χωρίς υλικό πλήρωσης.)

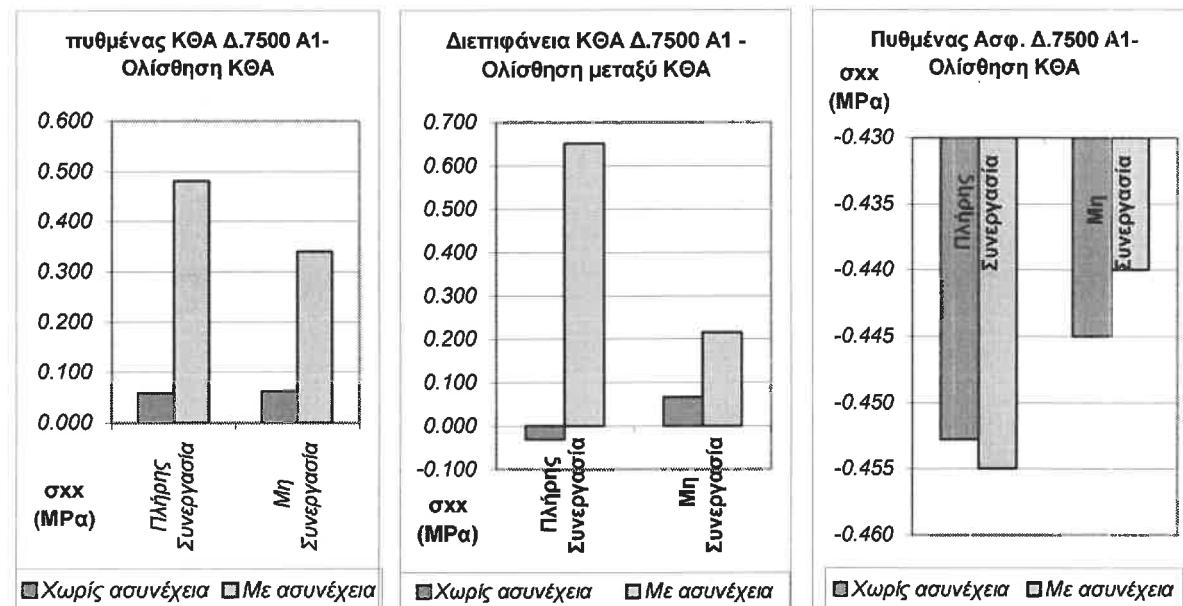
**1.** Η ύπαρξη ρωγμής δημιουργεί δυσμενέστερα οριζόντια εντατικά μεγέθη σε όλα τα σημεία που εξετάστηκαν όπως πυθμένας ασφαλτομίγματος, διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ και πυθμένας ΚΘΑ. Η επιρροή στον πυθμένα ασφαλτομίγματος είναι πολύ μικρή αλλά όσο εισχωρούμε βαθύτερα μεγαλώνει ώσπου στον πυθμένα του ΚΘΑ φτάνει να αυξάνει τα εφελκυστικά φορτία έως και 800%. Το παραπάνω σημαίνει πως ένα οδόστρωμα στο οποίο έχει ρηγματωθεί το στρώμα ΚΘΑ, για οποιοδήποτε λόγο, υπόκειται σε σημαντικά υψηλότερα οριζόντια φορτία από το ίδιο αρηγμάτωτο και αυτό επηρεάζει την συμπεριφορά του στο βάθος χρόνου.

**2.** Παρατηρήθηκε πως το πάχος της σταθεροποιημένης βάσης παιζει αρκετά σημαντικό ρόλο στο ποσοστό αύξησης της επιρροής στις οριζόντιες τάσεις της συγκεκριμένης ρωγμής. Στον πυθμένα του ασφαλτομίγματος έχουμε μικρή επιρροή όταν το ΚΘΑ έχει μεγάλο πάχος. Αντιθέτως στο πυθμένα του ΚΘΑ ύστερα από ανάλυση οι διατομές μικρού πάχους έχουν μικρότερη αύξηση των εφελκυστικών οριζοντίων τάσεων από αυτές μεγάλου πάχους.

**3.** Όσον αφορά τα μέτρα ελαστικότητας και πώς αυτά μεταβάλλουν την επίδραση της ρωγμής είναι μάλλον σαφές πως αυτό του ασφαλτομίγματος έχει αμελητέα επίδραση ενώ του ΚΘΑ δεν επιδρά σε ικανό ποσοστό στις μεταβολές εξαιτίας ρωγμών. Δηλαδή σε ένα οδόστρωμα στο οποίο μειώνεται σταδιακά με το χρόνο το μέτρο ελαστικότητας της σταθεροποιημένης βάσης του, οι τιμές οριζόντιων τάσεων σε περίπτωση που υπάρχει ρωγμή, δεν μεταβάλλονται ικανά ώστε να δημιουργούν δυσμενέστερες καταστάσεις και το κυριότερο πρόβλημα είναι το πάχος αυτών το οποίο είναι από ότι φαίνεται καθοριστικής σημασίας ιδιαίτερα στην προκειμένη περίπτωση που αποτελούν στοιχεία κατά μήκους ίδιου οδοστρώματος. Το παραπάνω θα πρέπει να υπολογιστεί και με συνθήκες περιορισμένης συνεργασίας.

### 8.3.2 Πλήρης ολίσθηση μεταξύ στρώσεων

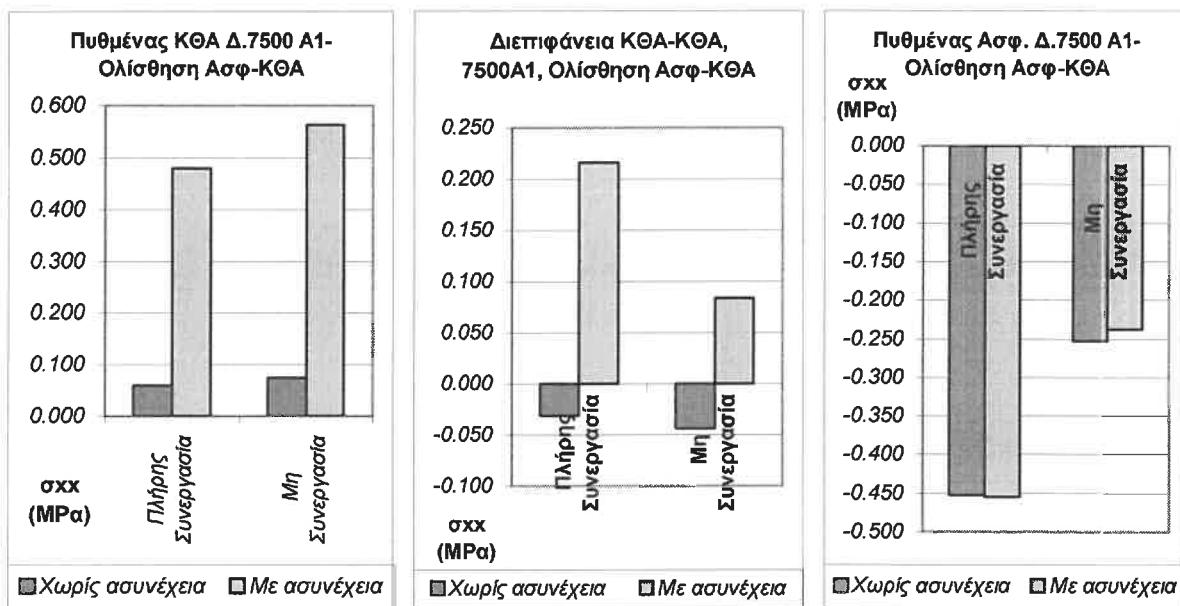
Στην περίπτωση έλλειψης συνεργασίας των στρώσεων της σταθεροποιημένης βάσης και σε συνδυασμό με την ύπαρξη ασυνέχειας τα αποτελέσματα για την τυπική διατομή (7500) με μέτρο ελαστικότητας  $E_{ΚΘΑ}=10000$  και  $E_{ασφ}=6500 \text{ MPa}$  (A1) είναι τα εξής:



Διαγράμματα 8.8, 8.9, 8.10

Σε περίπτωση ασυνέχειας του Κ.Θ.Α. και με την προϋπόθεση μη συνεργασίας των στρώσεων της σταθεροποιημένης βάσης οι οριζόντιες τάσεις στη διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ και τον πυθμένα ΚΘΑ μειώνονται. Ένα οδόστρωμα δηλαδή το οποίο έχει ρηγματωθεί αναπτύσσει μικρότερες εφελκυστικές τάσεις στις κρίσιμες θέσεις όταν υπάρχει ολίσθηση μεταξύ των στρώσεων ΚΘΑ. Η επιρροή της ρωγμής λοιπόν είναι ασθενέστερη σε περίπτωση έλλειψης συνεργασίας. Το αντίστροφο συμβαίνει για τις τάσεις στον πυθμένα ασφαλτομίγματος αλλά σε μικρότερο βαθμό. Αυτά είναι και τα πιο ενδιαφέροντα από τους υπολογισμούς με ασυνέχεια και μη συνεργασία.

Χρησιμοποιώντας πλήρη ολίσθηση μεταξύ ασφαλτομίγματος-ΚΘΑ στην τυπική πάλι διατομή με συνδυασμό μέτρων ελαστικότητας A1 έχουμε:



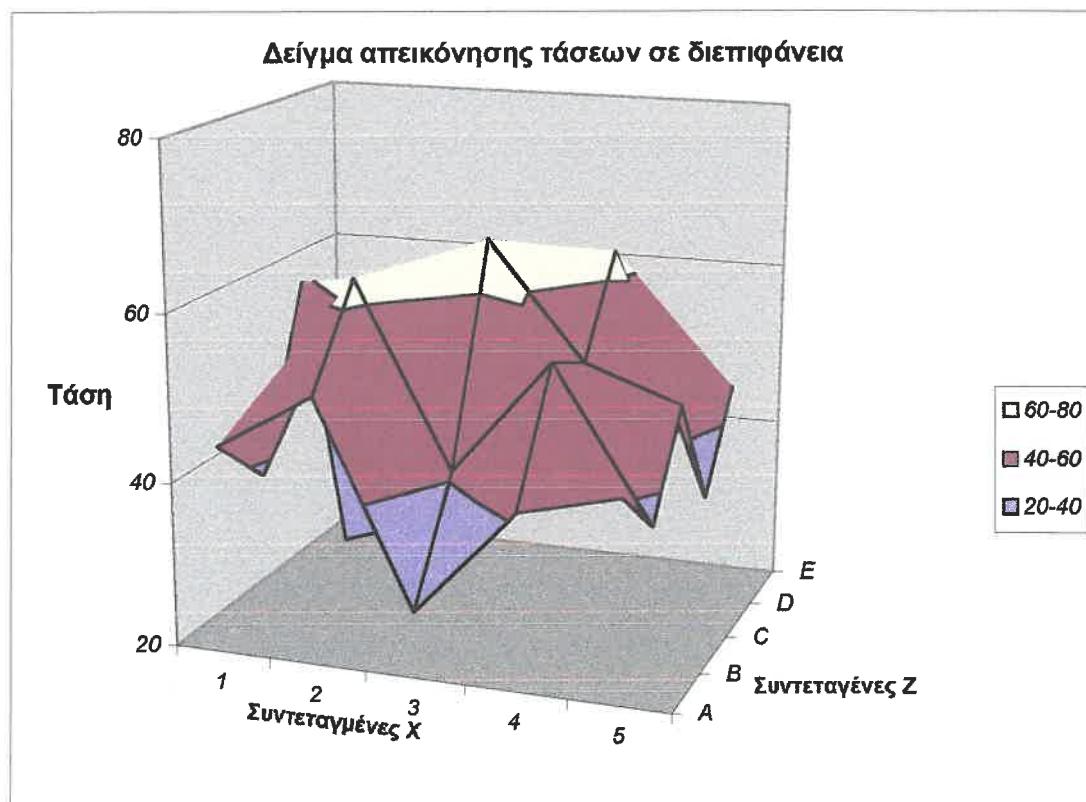
#### Διαγράμματα 8.11, 8.12, 8.13

Πρακτικό ενδιαφέρον σε αυτή την ανάλυση παρουσιάζει η θέση στον πυθμένα του ασφαλτομίγματος και πως επηρεάζεται από την ασυνέχεια με συνθήκες ολίσθησης της ίδιας διεπιφάνειας. Δεν παρατηρείται, ωστόσο ουσιαστική διαφορά στις οριζόντιες τάσεις και τις μεταβολές αυτών από την ύπαρξη ασυνέχειας. Στη διεπιφάνεια ΚΘΑ-ΚΘΑ η επίδρασή της, μειώνεται, όπως και προηγουμένως εξαιτίας της περιορισμένης συνεργασίας. Αντιθέτως στο πυθμένα του ΚΘΑ η ασυνέχεια εντείνει την δυσμενή κατάσταση. Όσον αφορά τα μέτρα ελαστικότητας και πάχη στρώσεων και πως αυτά επηρεάζουν όταν δεν έχουμε πλήρη συνεργασία δεν υπάρχουν διαφορές με τα προηγούμενα και οι επιρροές είναι αναλογικές.

#### 8.4 Ισοτασικά γραφήματα στον πυθμένα ασφαλτομίγματος

Οι ισοτασικές γραμμές είναι γραμμές που ενώνουν σημεία ενός φορέα τα οποία έχουν ίσο το ίδιο εντατικό μέγεθος. Είναι το αντίστοιχο με τις ισοϋψείς σε ένα τοπογραφικό χάρτη αν σκεφτεί κανείς ένα γράφημα με το εντατικό μέγεθος στον άξονα Y και στους οριζόντιους άξονες X,Z οι συντεταγμένες των σημείων μιας επιφάνειας που μελετούμε. Τότε η γραμμή που συνδέει τα σημεία με ίδιο ποσό εντατικού μεγέθους είναι ισοϋψής ως προς αυτό το σύστημα απεικόνισης

εφόσον δούμε τον άξονα των Y ως ύψη τιμών. Το σχήμα παρακάτω είναι δείγμα μιας τέτοιας ανάγλυφης απεικόνισης τάσεων σε μία υποτιθέμενη διεπιφάνεια.

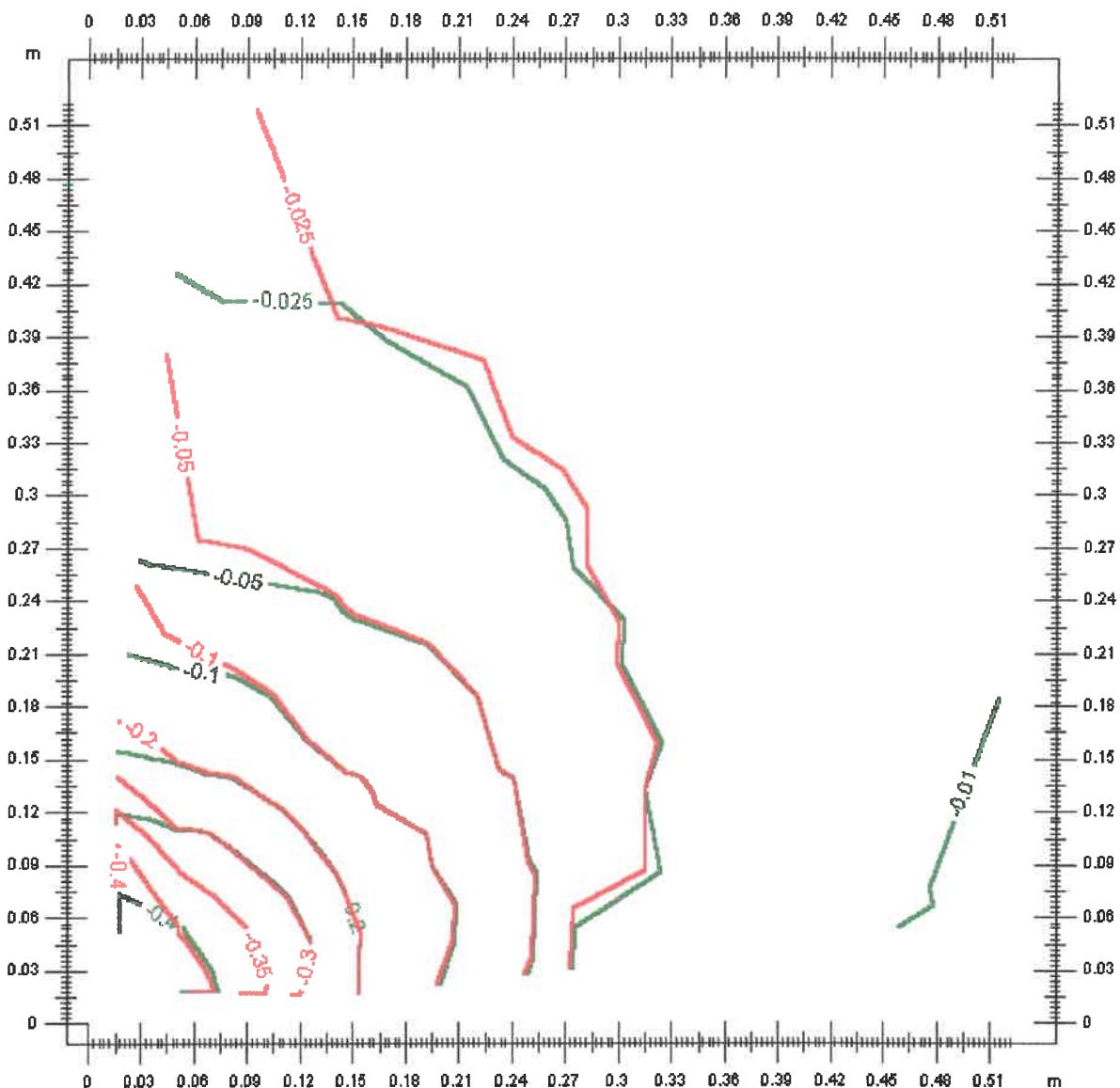


Στο πλαίσιο της ανάλυσης ημιακάμπου οδοστρώματος έγινε και η προσπάθεια για απεικόνιση των ισοτασικών γραμμών ή περιοχών στην βάση του ασφαλτομίγματος.

Κάνοντας χρήση του λογισμικού Capa3D έγινε προσπάθεια απεικόνισης της μεταβολής στις τάσεις στον πυθμένα του ασφαλτομίγματος από την ύπαρξη ρωγμής στο Κ.Θ.Α. πήραμε τιμές οριζόντιων τάσεων σχχ, σzz και δημιουργήσαμε τις ισοτασικές επιφάνειες με την βοήθεια των ισοτονικών γραμμών. Οι τιμές που εξετάστηκαν ήταν οριζόντιες τάσεις του πυθμένα του ασφαλτομίγματος στη διεπιφάνεια ασφαλτομίγματος – Κ.Θ.Α. Η δημιουργία του γραμμών έγινε με την βοήθεια του προγράμματος για H/Y, «isolines».

Τα γραφήματα που κατασκευάστηκαν κρίνονται λογικά και αναμενόμενα, σύμφωνα με την υπάρχουσα εμπειρία. Οι διαφορές μεταξύ σχχ και σzz είναι επίσης πολύ λογικές, αφού οι τιμές που δίνει το Capa3D είναι πάντα με σταθερό σύστημα αξόνων και επομένως δεν είναι οι κύριες τάσεις αλλά πάντα κάποιες συνιστώσες αυτών, εκτός των τιμών στην διαγώνιο που λογικότατα τα σχχ και σzz συμπίπτουν. Μερικά χαρακτηριστικά γραφήματα παραθέτονται παρακάτω. Η επιρροή της φόρτισης δεν είναι μεγάλη κατά τον οριζόντιο άξονα αλλά βλέπουμε πώς 0.5μ από το κέντρο φόρτισης οι τιμές οριζόντιας τάσης στον πυθμένα ασφαλτομίγματος είναι τόσο μικρές που μπορεί κανείς να τις θεωρήσει αμελητέες. Σε απόσταση δηλαδή 3a (a= ακτίνα κυκλικού φορτίου = 0.15μ) όντως οι τιμές τείνουν να γίνουν αμελητέες.

Το γράφημα (8.14) δείχνει την επιρροή του φορτίου σε οριζόντιες τάσεις (σzz) στον πυθμένα του ασφαλτομίγματος στην τυπική διατομή και συμπίπτει με την κάτοψη του πλέγματος. Οι πράσινες γραμμές είναι οι ισοτασικές σε ένα τυπικό ημιάκαμπτο οδόστρωμα με τη παραδοχή πλήρους συνεργασίας στρώσεων. Οι κόκκινες ισοτασικές είναι με αυτές που προέκυψαν ύστερα από ανάλυση με ασυνέχεια στη σταθεροποιημένη βάση. Το φορτίο είναι στο (0,0) με ακτίνα 15εκ και η ασυνέχεια συμπίπτει με τον αριστερό κατακόρυφο άξονα του γραφήματος.



**Γράφημα 8.14** Απεικόνιση ισοτασικών γραμμών στο πιθμένα ασφαλτομίγματος με ασυνέχεια (κόκκινο) ή όχι (πράσινο).

Παρατηρούμε ότι στην περιοχή της ασυνέχειας οι οριζόντιες τάσεις αυξάνουν οπότε η επιρροή του φορτίου κατά μήκος της ασυνέχειας, και σε μια περιοχή κοντά σε αυτή, αυξάνεται σε μια μεγαλύτερη περιοχή από το κέντρο του φορτίου. Δηλαδή με την ύπαρξη της ασυνέχειας είναι σαφές πως η συμπεριφορά του οδοστρώματος σε μια περιοχή κοντά σε αυτή αλλάζει.

## 9. Τελικά συμπεράσματα – Επεκτάσεις

### 9.1 Τελικά Συμπεράσματα

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η διερεύνηση προσομοιώματος ημιακάμπτου οδοστρώματος με χρήση πεπερασμένων στοιχείων σε τρεις διαστάσεις. Οι σχετικές αναλύσεις περιλαμβάνουν τόσο την διερεύνηση του μεμονωμένου προσομοιώματος όσο και την συγκριτική διερεύνηση του με κλασσικά προσομοιώματα που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ημιακάμπτων οδοστρωμάτων.

Στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε σύγκριση του προσομοιώματος που προέκυψε από την εφαρμογή της μεθόδου των Π.Σ. σε τρεις διαστάσεις -μέσω του προγράμματος Capa3D- με αντίστοιχα πεπερασμένων στοιχείων δύο διαστάσεων (Michpave) και επαλλήλων ελαστικών στρώσεων (μέσω του λογισμικού Bisar).

Σε πρώτη φάση διερευνήθηκε η επιρροή στην εντατική του κατάσταση, παραμέτρων όπως το πάχος και το μέτρο ελαστικότητας των επιμέρους στρώσεων, καθώς και του βαθμού συνεργασίας μεταξύ των στρώσεων. Ακολούθως πραγματοποιήθηκε και προκαταρκτική διερεύνηση ειδικών περιπτώσεων προσομοίωσης με ασυνέχεια στη σταθεροποιημένη βάση.

Όσον αφορά την πρώτη φάση, η σχετική διερεύνηση οδήγησε στα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Το Capa3D διαφέρει από τα Michpave και Bisar (ιδιαίτερα) και φαίνεται να δίνει πιο λογικές τιμές σε περιπτώσεις ακραίων συνθηκών (όπως πολύ μικρού πάχους διατομών). Οι συγκρίσεις που διεξάχθηκαν δεν δείχνουν ποιοτικά διαφορετικά αποτελέσματα μεταξύ των τριών προγραμμάτων αλλά συμβαδίζουν με τις γενικές αρχές για τα ημιάκαμπτα οδοστρώματα [7]. Ιδιαίτερη περίπτωση, οι τάσεις στον πυθμένα της σταθεροποιημένης βάσης όπου οι διαφορές ήταν πολύ μεγάλες αριθμητικά και ιδιαίτερα ανάμεσα στο

Capa3D και το Bisar. Συνεπώς στην περίπτωση που κάποιος ερευνητής επιχειρούσε να αξιοποιήσει 3D Π.Σ. για την ανάλυση διατομής σχεδιασμού, τα αποτελέσματα πιθανώς να ήταν αρκετά διαφορετικά από τα συνήθη που προκύπτουν από προσομοιώσεις με βάση την θεωρία ελαστικών επαλλήλων στρώσεων. Προς τούτο για την εφαρμογή της μεθόδου σε αυτό το πλαίσιο κρίνεται απαραίτητη συστηματική έρευνα και βαθμονόμηση με κατάλληλα δεδομένα σχεδιασμού τα οποία μπορούν να προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα και επιτόπου δοκιμές.

Σημαντικά πλεονεκτήματα του Capa3D ως τρισδιάστατο, είναι η δυνατότητα αξιοποίησης μεγαλύτερου αριθμού παραμέτρων (λεπτομέρειες προσομοίωσης) και η καλύτερη εποπτεία. Ιδιαίτερα η δυνατότητα εισαγωγής του ποσοστού συνεργασίας διεπιφανείων και στις τρεις διαστάσεις είναι σημαντική δεδομένου ότι προσφέρει ευελιξία και ακρίβεια.

- Οι τιμές οριζόντιας τάσης στον πυθμένα του ασφαλτομίγματος είναι γενικά θλιπτικές και δεν επηρεάζονται σε ικανό βαθμό από τις μεταβολές (εντός των ορίων του διαστήματος που διερευνήθηκε) των μέτρων ελαστικότητας ή γεωμετρικών στοιχείων της διατομής. Η πιθανή ανομοιομορφία, δηλαδή, των διατομών σε αυτό το σημείο δεν επιφέρει προβλήματα. Παρόλα αυτά θα πρέπει να διερευνηθεί περισσότερο η προσομοίωση της μειωμένης συνεργασίας μεταξύ των επιμέρους στρώσεων, όπου υπό προϋπόθεση (π.χ. ολίσθησης) είναι ενδεχόμενο να εμφανιστούν και εφελκυστικές τάσεις.
- Η εξέταση στα κρίσιμα σημεία ενός ημιακάμπτου οδοστρώματος με την βοήθεια των πεπερασμένων στοιχείων (3D) επαλήθευσε ως σημαντικότερες παραμέτρους για την διάρκεια ζωής των οδοστρωμάτων αυτών, το πάχος των επιμέρους στρώσεων και το μέτρο ελαστικότητας της σταθεροποιημένης βάσης. Ιδιαίτερα οι διαφορές του πάχους των επιμέρους στρώσεων (και περισσότερο της σταθεροποιημένης βάσης) είναι, όπως ήταν αναμενόμενο, η

πιο σημαντική παράμετρος για την διακύμανση των οριζόντιων εντατικών μεγεθών.

- Διερευνήθηκε και επιβεβαιώθηκε χρησιμοποιώντας και το Capa3D και το Bisar ότι οι οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα της κατεργασμένης βάσης είναι ανάλογες του αντιστρόφου του τετραγώνου του συνολικού πάχους σταθεροποιημένης βάσης σε οδόστρωμα. ( $\sigma_r \sim \frac{1}{h_{\text{ΚΘΑ}}^2}$ ).
- Οι ακραίες περιπτώσεις πλήρους συνεργασίας και καθόλου συνεργασίας μεταξύ των διεπιφανειών ασφαλτομίγματος-ΚΘΑ-ΚΘΑ πιθανότερα δεν ισχύουν στην πράξη. Σε περίπτωση ολίσθησης των στρώσεων σταθεροποιημένης βάσης οι οριζόντιες τάσεις δεν μεταφέρονται στο υποκείμενο ΚΘΑ με σημαντικότερο αποτέλεσμα την αλλαγή της εντατικής κατάστασης στη διεπιφάνεια από θλίψη σε εφελκυσμό. Αντίστοιχα συμβαίνουν σε περίπτωση ολίσθησης μεταξύ ασφαλτομίγματος-ΚΘΑ, χωρίς όμως την εναλλαγή της εντατικής κατάστασης του πυθμένα του ασφαλτομίγματος από θλίψη σε εφελκυσμό στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν.

Πλέον των παραπάνω, από την ανάλυση της δεύτερης φάσης προέκυψαν τα ακόλουθα προκαταρκτικά συμπεράσματα:

- Η ύπαρξη ασυνέχειας στη σταθεροποιημένη βάση σε σχέση με την κατάσταση χωρίς αυτή, είναι σε όλες τις θέσεις δυσμενέστερη κυρίως στα «κρίσιμα σημεία» της κατεργασμένης βάσης.
- Σύμφωνα με το Capa3D οι διατομές μικρού πάχους αυξάνουν λιγότερο τις εφελκυστικές τάσεις στον πυθμένα του ΚΘΑ εξαιτίας της ασυνέχειας, από ότι αυτές μεγάλου πάχους. Επομένως τα πάχη των επιμέρους στρώσεων, και ειδικότερα του ΚΘΑ, επηρεάζουν σε ικανό βαθμό την μεταβολή της εντατικής κατάστασης του οδοστρώματος, εξαιτίας εμφάνισης ασυνέχειας.

- Ενδιαφέρον αποτέλεσμα, αν και ενδεικτικό, και το γεγονός πως με την ύπαρξη ασυνέχειας οι συνθήκες ολίσθησης, όπως αυτές προσομοιώθηκαν μεταξύ των σταθεροποιημένων στρώσεων, μειώνουν σε αρκετό βαθμό την επίδραση της ρωγμής στις οριζόντιες τάσεις στο ΚΘΑ. Με την παραδοχή λοιπόν περιορισμένης συνεργασίας μεταξύ των στρώσεων ΚΘΑ η επίδραση της ασυνέχειας είναι ηπιότερη. Για την ακριβή εκτίμηση αυτής είναι αναγκαία η περαιτέρω εμβάθυνση της σχετικής διερεύνησης.
- Η πιθανή μεταβολή των μέτρων ελαστικότητας της κατεργασμένης βάσης δεν επιδρά στις διαφοροποιήσεις που επιφέρει η ύπαρξη ασυνέχειας. Για παράδειγμα οι οριζόντιες τάσεις στον πυθμένα του ασφαλτικού όταν υπάρχει ασυνέχεια αυξάνουν κατά (περίπου) το ίδιο ποσοστό οποιαδήποτε και αν είναι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του ΚΘΑ.
- Ο πυθμένας του ασφαλτομίγματος ακόμη και με την ύπαρξη ρωγμής στο ΚΘΑ δέχεται θλιπτικά φορτία σύμφωνα με τα στοιχεία που εξετάστηκαν. Στις υπό εξέταση διατομές τόσο με συνθήκες πλήρους συνεργασίας όσο και ολίσθησης μεταξύ των στρώσεων ασφαλτομίγματος – ΚΘΑ, στην θέση του πυθμένα του ασφαλτομίγματος, δεν είχαμε εμφάνιση εφελκυστικών τάσεων. Η περίπτωση αυτή πιθανότατα δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα αφού δεν εξηγείται έτσι η μετάδοση των ρωγμών στην επιφάνεια του οδοστρώματος. Συνεπώς για την επιβεβαίωση αυτού απαιτείται περαιτέρω έρευνα.

## 9.2 Επεκτάσεις

Η έρευνα η οποία διεξήχθη αποτελεί μια προκαταρκτική διερεύνηση της συμπεριφοράς των ημιακάμπτων οδοστρωμάτων και με ποιον τρόπο αυτή επηρεάζεται από παραμέτρους όπως πάχος και μέτρο ελαστικότητας στρώσεων, συνεργασία διεπιφανειών και ενδεχόμενες ασυνέχειες. Τα αποτελέσματα αυτής είναι έναυσμα για περαιτέρω έρευνα σε όλα τα μέτωπα

με ένα καινούριο εργαλείο όπως τα πεπερασμένα στοιχεία σε τρεις διαστάσεις, Η έρευνα δεν σταματά εδώ αλλά μπορεί να συνεχιστεί σε τομείς όπως:

- Έλεγχος του προσομοιώματος και των αποτελεσμάτων του Capa3D με επιτόπου δοκιμές (π.χ. Real Loading Time) ή εργαστηριακές δοκιμές (π.χ. Accelerated Loading Time).
- Πολύ μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο προσδιορισμός του βαθμού συνεργασίας μεταξύ των στρώσεων ημιακάμπτου οδοστρώματος που μπορεί να γίνει με το Capa3D αλλά και σε συνδυασμό με εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές ώστε να αποδοθούν όσο καλύτερα τα εντατικά μεγέθη στο εσωτερικό ενός οδοστρώματος. Η δυνατότητα του Capa3D να μεταβάλλει την συνεργασία και στις τρεις διευθύνσεις είναι σπουδαίο εργαλείο για μία σχετική έρευνα.
- Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε μια έρευνα με καλύτερη προσομοίωση της ασυνέχειας χρησιμοποιώντας «διασυνδετικά» στοιχεία (interface elements) ώστε να μπορεί ο μελετητής να χρησιμοποιήσει την συνεργασία των παρειών της ρωγμής και την ύπαρξη υλικού πλήρωσης.
- Για περαιτέρω έρευνα θα μπορούσε να διεξαχθεί και μια εκτενής ανάλυση στα πλαίσια οδοστρώματος σχεδιασμού με το Capa3D και να συγκριθεί με αποτελέσματα από άλλα λογισμικά που υπάρχουν στη διεθνή βιβλιογραφία.
- Πρακτικό και επιστημονικό ενδιαφέρον αποτελεί το θέμα της συντήρησης/ενίσχυσης με επικάλυψη (overlay) στο ασφαλτόμιγμα και της αποτελεσματικότητας αυτού αναλύοντάς το με τα Π.Σ. σε τρεις διαστάσεις.
- Το Capa σε δύο διαστάσεις είχε την δυνατότητα του αυτοματοποιημένου υπολογισμού της εξάπλωσης προς τα άνω μιας ρωγμής στο πλέγμα. Σε συνδυασμό με άλλες έρευνες που έχουν γίνει με Capa2D [12] παρουσιάζει πολύ ενδιαφέρον η δημιουργία πλέγματος και προσομοίωσης μιας τέτοιας κατάστασης με το Capa3D ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα.

- Το Capa3D θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τέλος και στην έρευνα τις επιδρασης των ρωγμών εξ' ανακλάσεως σε συνδυασμό με το προηγούμενο.

Τα προγράμματα όμως Π.Σ. σε τρεις διαστάσεις έχουν τα μειονεκτήματα της νεότητας ακόμα, αφού η εξέλιξή τους είναι συνεχής. Η αλήθεια είναι πως απαιτούν χρήστη εξοικειωμένο με τους Η/Υ και χρονοβόρες διαδικασίες εισαγωγής αλλά και εξαγωγής δεδομένων. Ωστόσο, όπως σοφά έλεγαν οι πρόγονοι μας «ουδέν κακόν αμιγές καλού». Η ιδιαιτερότητα των 3D Π.Σ. να αναπαριστούν φορείς σε όλες τις διαστάσεις ανοίγουν ένα μεγάλο πεδίο ερευνών αφού οι περισσότερες καταπονήσεις και ιδιαιτερότητες μπορούν να προσομοιωθούν με λιγότερες παραδοχές.

## Βιβλιογραφία – Παραπομπές

- [1] S. HELWANY, J. DYER, J. LEIDY, "Finite Element Analyses Of Flexible Pavements", **Journal Of Transportation Engineering ASCE**, SEP/OCT 1998 vol. 124
- [2] AMADEUS, Guidelines for Users, TRL 1999
- [3] A. SCARPAS, A.H. DE BOND, A.A.A. MOLENAAR, J. BLAAUWENDRAAD, "Capa: A modern tool for the analysis and design of pavements", Reflective Cracking in Pavements. State of the Art and Design Recommendations, E&FN SPON publications, RILEM Conference, Liege, 10–12 March 1993
- [4] Γ. ΤΣΑΜΑΣΦΥΡΟΣ-Ε.Ε. ΘΕΟΤΟΚΟΓΛΟΥ, «Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων», Εκδόσεις Συμεών, 1989.
- [5] Μ. ΠΑΠΑΔΡΑΚΑΚΗΣ, «Ανάλυση Φορέων με την Μέθοδο των Πεπερασμένων Στοιχείων», Ε.Μ.Π. Αθήνα 1996
- [6] R. S. HARICHANDRAN, G. Y. BALADI, "MICHPAVE User's Manual", Version 1.2 for DOS, Michigan State University, December 1997
- [7] Σ. ΚΟΛΙΑΣ-Α. ΛΟΙΖΟΣ, «Σημειώσεις οδοστρωμάτων», Ε. Μ. Πολυτεχνείο, Αθήνα 1996.
- [8] PIARC, "Semi – Rigid Pavements", Technical Committee Report, PIARC/AIRCR, 1997
- [9] D.L. DE JONG, M.F.G. PEUTZ and A.R. KORWAGEN, "Layered systems under normal and tangential surface loads", Computer Program BISAR AMSR.0006.73., 1973.
- [10] Σ. ΚΟΛΙΑΣ, Μ. ΚΑΤΣΑΚΟΥ, Ε. ΚΥΡΚΙΛΗ, «Μέτρηση Μέτρου Δυσκαμψίας Ελληνικών Ασφαλτομιγμάτων», 1<sup>o</sup> Πανελλήνιο συνέδριο οδοποιίας Τόμος I, Λάρισα, 4–7 Οκτωβρίου 1995
- [11] Α. ΛΟΙΖΟΣ, Σ. ΚΟΛΙΑΣ, Ε. ΚΥΡΚΙΛΗ, «Διερεύνηση της Δυνατότητας Εφαρμογής των Θεωριών Αστοχίας της Μηχανικής στην Ανάλυση των Εύκαμπτων Οδοστρωμάτων», Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση Τ.Ε.Ε., Επιστημονική Περιοχή Α, Ιούλιος-Σεπτέμβριος 1993, τόμος 13, τεύχος 3.
- [12] A. SCARPAS, A.H. DE BOND, A.A.A. MOLENAAR, G. GAARKEUKEN, "Finite Elements Modeling Cracking in Pavements", Reflective Cracking in Pavements. Design and Performance of overlay systems, E&FN SPON publications, RILEM Conference Maastricht, 2–4 October 1996

# ПАРАРТНМА

## Παράρτημα

### Αποτελέσματα Σύγκρισης των Bisar-Capa3D-Michpave

(Οι τιμές των αποτελεσμάτων σε όλους τους πίνακες είναι οριζόντιες τάσεις σε Mpa.)

Διατομή αναφοράς

7500

#### 2. Διεπιφάνεια ασφαλτομίγματος - Κ.Θ.Α.

Βαθος z=12.0 cm

	E1 (ασφ.)	E2 (Κ.Θ.Α.)
A1	6500	20000
A2	6500	10000
A3	6500	5000
B1	4000	20000
B2	4000	10000
B3	4000	5000

#### 3. Διεπιφάνεια στρώσεων Κ.Θ.Α.

Βαθος z=32.0 cm

	E1 (ασφ.)	E2 (Κ.Θ.Α.)
A1	6500	20000
A2	6500	10000
A3	6500	5000
B1	4000	20000
B2	4000	10000
B3	4000	5000

#### 4. Διεπιφάνεια Κ.Θ.Α. - στρώσης έδρασης

Βαθος z=50.0 cm

	E1 (ασφ.)	E2 (Κ.Θ.Α.)
A1	6500	20000
A2	6500	10000
A3	6500	5000
B1	4000	20000
B2	4000	10000
B3	4000	5000

Bisar	Capa 3D	Michpave
Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)
-0.463	-0.452	-0.427
-0.384	-0.387	-0.346
-0.190	-0.271	-0.163
-0.473	-0.479	-0.450
-0.437	-0.437	-0.410
-0.327	-0.358	-0.302

Bisar	Capa 3D	Michpave
Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)
0.086	-0.031	0.038
0.090	-0.027	0.046
0.089	-0.023	0.052
0.078	-0.034	0.032
0.081	-0.031	0.040
0.082	-0.027	0.047

Εκπιμόμενες Διελεύσεις *		
Bisar (2D)	Capa 3D	Capa 3D
(N)	(N)	(N)
1.84E+11	Y.Θ.	4.77E+11
1.71E+11	Y.Θ.	4.08E+11
1.73E+11	Y.Θ.	3.62E+11
2.17E+11	Y.Θ.	5.38E+11
2.04E+11	Y.Θ.	4.59E+11
1.99E+11	Y.Θ.	4.00E+11

Bisar	Capa 3D	Michpave
Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)
0.442	0.059	0.275
0.356	0.051	0.237
0.280	0.041	0.197
0.469	0.062	0.295
0.382	0.055	0.260
0.301	0.045	0.219

Εκπιμόμενες Διελεύσεις *		
Bisar (2D)	Capa 3D	Michpave
(N)	(N)	(N)
1.63E+08	3.16E+11	4.43E+09
9.03E+08	3.72E+11	9.39E+09
4.05E+09	4.49E+11	2.07E+10
9.64E+07	2.95E+11	2.99E+09
5.38E+08	3.42E+11	5.96E+09
2.67E+09	4.12E+11	1.34E+10

\* Νόμος αστοχίας ΚΘΑ

$$\sigma_{xx}/f_k = 1 - 0.0833 \log N \quad \text{με } f_k = 1.4 \text{ MPa}$$

## Διατομή 7570

### 3. Διεπιφάνεια στρώσεων Κ.Θ.Α.

$z=30.0 \text{ cm}$

	<b>E1 (ασφ.)</b>	<b>E2 (Κ.Θ.Α.)</b>
<b>A1</b>	6500	20000
<b>A2</b>	6500	10000
<b>A3</b>	6500	5000
<b>B1</b>	4000	20000
<b>B2</b>	4000	10000
<b>B3</b>	4000	5000

<b>Bisar</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>Stress</b>	<b>Stress</b>
<b>XX</b>	<b>XX</b>
<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
0.130	-0.028
0.125	-0.024
0.118	-0.021
0.123	-0.030
0.118	-0.027
0.111	-0.024

<b>Εκτιμώμενες Διελεύσεις *</b>	
<b>Bisar (2D)</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>(N)</b>	<b>(N)</b>
$7.81E+10$	Y.Θ.
$8.57E+10$	Y.Θ.
$9.90E+10$	Y.Θ.
$8.84E+10$	Y.Θ.
$9.86E+10$	Y.Θ.
$1.12E+11$	Y.Θ.

### 4. Διεπιφάνεια Κ.Θ.Α. - στρώσης έδρασης

$z=45.0 \text{ cm}$

	<b>E1 (ασφ.)</b>	<b>E2 (Κ.Θ.Α.)</b>
<b>A1</b>	6500	20000
<b>A2</b>	6500	10000
<b>A3</b>	6500	5000
<b>B1</b>	4000	20000
<b>B2</b>	4000	10000
<b>B3</b>	4000	5000

<b>Bisar</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>Stress</b>	<b>Stress</b>
<b>XX</b>	<b>XX</b>
<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
0.533	0.075
0.431	0.065
0.340	0.054
0.562	0.079
0.461	0.070
0.364	0.059

<b>Εκτιμώμενες Διελεύσεις *</b>	
<b>Bisar (2D)</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>(N)</b>	<b>(N)</b>
$2.72E+07$	$2.30E+11$
$2.05E+08$	$2.79E+11$
$1.23E+09$	$3.51E+11$
$1.52E+07$	$2.12E+11$
$1.14E+08$	$2.53E+11$
$7.62E+08$	$3.17E+11$

\* Νόμος αστοχίας ασφαλτικού:

\* Νόμος αστοχίας ΚΘΑ:

$$\sigma/f_k = 1 - 0.0833 \log N \quad \text{με } f_k=1.4 \text{ Mpa}$$

## Διατομή 7589

### 2. Διεπιφάνεια ασφαλτικού - Κ.Θ.Α.

$z=14.0 \text{ cm}$

	<b>E1 (ασφ.)</b>	<b>E2 (Κ.Θ.Α.)</b>
<b>A1</b>	6500	20000
<b>A2</b>	6500	10000
<b>A3</b>	6500	5000
<b>B1</b>	4000	20000
<b>B2</b>	4000	10000
<b>B3</b>	4000	5000

### 3. Διεπιφάνεια στρώσεων Κ.Θ.Α.

$z=28.0 \text{ cm}$

	<b>E1 (ασφ.)</b>	<b>E2 (Κ.Θ.Α.)</b>
<b>A1</b>	6500	20000
<b>A2</b>	6500	10000
<b>A3</b>	6500	5000
<b>B1</b>	4000	20000
<b>B2</b>	4000	10000
<b>B3</b>	4000	5000

### 4. Διεπιφάνεια Κ.Θ.Α. - στρώσης έδρασης

$z=36.5 \text{ cm}$

	<b>E1 (ασφ.)</b>	<b>E2 (Κ.Θ.Α.)</b>
<b>A1</b>	6500	20000
<b>A2</b>	6500	10000
<b>A3</b>	6500	5000
<b>B1</b>	4000	20000
<b>B2</b>	4000	10000
<b>B3</b>	4000	5000

<b>Bisar</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>Stress</b>	<b>Stress</b>
<b>XX</b>	<b>XX</b>
<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
-0.451	-0.421
-0.329	-0.348
-0.079	-0.224
-0.472	-0.453
-0.412	-0.404
-0.258	-0.317

<b>Bisar</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>Stress</b>	<b>Stress</b>
<b>XX</b>	<b>XX</b>
<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
0.324	-0.012
0.288	-0.008
0.248	-0.006
0.321	-0.015
0.285	-0.012
0.248	-0.010

<b>Εκτιμώμενες Διελεύσεις *</b>	
<b>Bisar (2D)</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>(N)</b>	<b>(N)</b>
$1.67E+09$	Y.Θ.
$3.42E+09$	Y.Θ.
$7.51E+09$	Y.Θ.
$1.79E+09$	Y.Θ.
$3.64E+09$	Y.Θ.
$7.54E+09$	Y.Θ.

<b>Bisar</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>Stress</b>	<b>Stress</b>
<b>XX</b>	<b>XX</b>
<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
0.843	0.130
0.649	0.107
0.494	0.082
0.925	0.142
0.715	0.119
0.541	0.094

<b>Εκτιμώμενες Διελεύσεις *</b>	
<b>Bisar (2D)</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>(N)</b>	<b>(N)</b>
$5.94E+04$	$7.74E+10$
$2.76E+06$	$1.23E+11$
$5.92E+07$	$2.01E+11$
$1.18E+04$	$6.18E+10$
$7.52E+05$	$9.56E+10$
$2.31E+07$	$1.58E+11$

## Διατομή 7590

### 3. Διεπιφάνεια στρώσεων Κ.Θ.Α.

$z=21.0\text{ cm}$

	<b>E1 (ασφ.)</b>	<b>E2 (Κ.Θ.Α.)</b>
<b>A1</b>	6500	20000
<b>A2</b>	6500	10000
<b>A3</b>	6500	5000
<b>B1</b>	4000	20000
<b>B2</b>	4000	10000
<b>B3</b>	4000	5000

<b>Bisar</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>Stress</b>	<b>Stress</b>
<b>XX</b>	<b>XX</b>
<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
0.088	-0.061
0.146	-0.046
0.170	-0.033
0.030	-0.071
0.099	-0.058
0.141	-0.044

<b>Εκτιμώμενες Διελεύσεις *</b>	
<b>Bisar (2D)</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>(N)</b>	<b>(N)</b>
$1.79E+11$	Y.Θ.
$5.66E+10$	Y.Θ.
$3.50E+10$	Y.Θ.
$5.58E+11$	Y.Θ.
$1.43E+11$	Y.Θ.
$6.24E+10$	Y.Θ.

### 4. Διεπιφάνεια Κ.Θ.Α. - στρώσης έδρασης

$z=33.5\text{ cm}$

	<b>E1 (ασφ.)</b>	<b>E2 (Κ.Θ.Α.)</b>
<b>A1</b>	6500	20000
<b>A2</b>	6500	10000
<b>A3</b>	6500	5000
<b>B1</b>	4000	20000
<b>B2</b>	4000	10000
<b>B3</b>	4000	5000

<b>Bisar</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>Stress</b>	<b>Stress</b>
<b>XX</b>	<b>XX</b>
<b>(MPa)</b>	<b>(MPa)</b>
0.976	0.157
0.752	0.130
0.573	0.101
1.068	0.170
0.826	0.144
0.626	0.115

<b>Εκτιμώμενες Διελεύσεις *</b>	
<b>Bisar (2D)</b>	<b>Capa 3D</b>
<b>(N)</b>	<b>(N)</b>
$4.33E+03$	$4.56E+10$
$3.62E+05$	$7.83E+10$
$1.24E+07$	$1.39E+11$
$7.03E+02$	$3.51E+10$
$8.36E+04$	$5.86E+10$
$4.33E+06$	$1.05E+11$

## Ιατομή 7595

Διεπιφάνεια ασφαλτικού - Κ.Θ.Α.  
=10.5 cm

	E1 (ασφ.)	E2 (Κ.Θ.Α.)
A1	6500	20000
A2	6500	10000
A3	6500	5000
B1	4000	20000
B2	4000	10000
B3	4000	5000

Bisar	Capa 3D	Michpave
Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)
-0.603	-0.455	-0.577
-0.474	-0.387	-0.463
-0.174	-0.259	-0.175
-0.606	-0.481	-0.590
-0.555	-0.439	-0.551
-0.385	-0.357	-0.392

Διεπιφάνεια στρώσεων Κ.Θ.Α.  
=16 cm

	E1 (ασφ.)	E2 (Κ.Θ.Α.)
A1	6500	20000
A2	6500	10000
A3	6500	5000
B1	4000	20000
B2	4000	10000
B3	4000	5000

Bisar	Capa 3D	Michpave
Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)
-0.011	-0.090	-0.008
0.125	-0.065	0.114
0.194	-0.045	0.186
-0.128	-0.107	-0.109
0.033	-0.083	0.031
0.136	-0.060	0.135

Εκτιμώμενες Διελεύσεις *		
Bisar (2D)	Capa 3D	Michpave
(N)	(N)	(N)
Y.Θ.	Y.Θ.	Y.Θ.
8.52E+10	Y.Θ.	1.06E+11
2.21E+10	Y.Θ.	2.57E+10
Y.Θ.	Y.Θ.	Y.Θ.
5.32E+11	Y.Θ.	5.48E+11
6.96E+10	Y.Θ.	7.03E+10

Διεπιφάνεια Κ.Θ.Α. - στρώσης έδρασης  
=27 cm

	E1 (ασφ.)	E2 (Κ.Θ.Α.)
A1	6500	20000
A2	6500	10000
A3	6500	5000
B1	4000	20000
B2	4000	10000
B3	4000	5000

Bisar	Capa 3D	Michpave
Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)	Stress XX (MPa)
1.417	0.238	1.242
1.083	0.196	1.005
0.821	0.153	0.802
1.555	0.259	1.399
1.190	0.218	1.135
0.895	0.174	0.902

Εκτιμώμενες Διελεύσεις *		
Bisar (2D)	Capa 3D	Michpave
(N)	(N)	(N)
7.15E-01	9.14E+09	2.26E+01
5.23E+02	2.09E+10	2.44E+03
9.19E+04	4.96E+10	1.34E+05
4.69E-02	6.14E+09	1.02E+00
6.32E+01	1.35E+10	1.87E+02
2.12E+04	3.28E+10	1.86E+04

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Αποτελέσματα οριζόντιας τάσης με πλήρη συνεργασία**

**Στην διεπιφανεία ασφαλτομίγματος ΚΘΑ**

		Χωρίς Ασυνέχεια			Με ασυνέχεια		
Διατομή		7500	7589	7595	7500	7589	7595
Σύνθεση Ασφ/ΚΘΑ/ΚΘΑ		12/20/18	14/14/8.5	10.5/5.5/11	12/20/18	14/14/8.5	10.5/5.5/11
A1	6500	20000	-0.452	-0.421	-0.455	-0.445	-0.387
A2	6500	10000	-0.387	-0.348	-0.387	-0.369	-0.294
A3	6500	5000	-0.271	-0.224	-0.259	-0.236	-0.150
B1	4000	20000	-0.479	-0.453	-0.481	-0.475	-0.430
B2	4000	10000	-0.437	-0.404	-0.439	-0.427	-0.367
B3	4000	5000	-0.358	-0.317	-0.357	-0.337	-0.263

E1(Ασφ) E2(ΚΘΑ)

**Στην διεπιφάνεια της σταθεροποιημένης βάσης**

		Χωρίς Ασυνέχεια				
Διατομή		7500	7570	7589	7590	7595
Σύνθεση Ασφ/ΚΘΑ/ΚΘΑ		12/20/18	10/20/15	14/14/8.5	12.5/8.5/12.5	10.5/5.5/11
A1	6500	20000	-0.031	-0.028	-0.012	-0.061
A2	6500	10000	-0.027	-0.024	-0.008	-0.046
A3	6500	5000	-0.023	-0.021	-0.006	-0.033
B1	4000	20000	-0.034	-0.030	-0.015	-0.071
B2	4000	10000	-0.031	-0.027	-0.012	-0.058
B3	4000	5000	-0.027	-0.024	-0.010	-0.044

E1(Ασφ) E2(ΚΘΑ)

		Με ασυνέχεια				
Διατομή		7500	7570	7589	7590	7595
Σύνθεση Ασφ/ΚΘΑ/ΚΘΑ		12/20/18	10/20/15	14/14/8.5	12.5/8.5/12.5	10.5/5.5/11
A1	6500	20000	0.216	0.286	0.553	0.356
A2	6500	10000	0.207	0.268	0.477	0.344
A3	6500	5000	0.187	0.237	0.383	0.301
B1	4000	20000	0.210	0.282	0.565	0.327
B2	4000	10000	0.203	0.265	0.495	0.327
B3	4000	5000	0.187	0.238	0.409	0.302

E1(Ασφ) E2(ΚΘΑ)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Στην διεπιφάνεια ΚΘΑ - εδάφους**

		Χωρίς Ασυνέχεια				
Διατομή		7500	7570	7589	7590	7595
Σύνθεση Ασφ/ΚΘΑ/ΚΘΑ		12/20/18	10/20/15	14/14/8.5	12.5/8.5/12.5	10.5/5.5/11
A1	6500	20000	0.059	0.075	0.130	0.157
A2	6500	10000	0.051	0.065	0.107	0.130
A3	6500	5000	0.041	0.054	0.082	0.101
B1	4000	20000	0.062	0.079	0.142	0.170
B2	4000	10000	0.055	0.070	0.119	0.144
B3	4000	5000	0.045	0.059	0.094	0.115

E1(Ασφ) E2(ΚΘΑ)

		Με ασυνέχεια				
Διατομή		7500	7570	7589	7590	7595
Σύνθεση Ασφ/ΚΘΑ/ΚΘΑ		12/20/18	10/20/15	14/14/8.5	12.5/8.5/12.5	10.5/5.5/11
A1	6500	20000	0.480	0.554	0.834	0.920
A2	6500	10000	0.415	0.483	0.686	0.764
A3	6500	5000	0.342	0.401	0.532	0.599
B1	4000	20000	0.502	0.576	0.892	0.978
B2	4000	10000	0.440	0.509	0.749	0.828
B3	4000	5000	0.367	0.427	0.595	0.665

E1(Ασφ) E2(ΚΘΑ)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Αποτελέσματα με συνθήκες περιορισμένης Συνεργασίας**

Σύγκριση διατομής 7500 με συνεργασία όλων των στρώσεων και χωρίς συνεργασία μεταξύ Ασφ-ΚΘΑ και μεταξύ των δύο ΚΘΑ.

Τιμές οριζόντιας τάσης σε MPa

**Πιθμένας ΚΘΑ - Διατομής**

**7500**

Εασφ (Mpa)	ΕΚΘΑ (Mpa)	Κωδικός Διατομής	πλήρης Ολίσθηση	Οριζόντια έντ. σχx		
				Capa3D	Bisar	Capa3D
				Όχι Ασυνέχεια	Ναι Ασ.	
6500	20000	A1	Όχι	0.059	0.044	0.480
			Ασφ-ΚΘΑ	0.074	0.561	0.563
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.062	0.617	0.339
	10000	A2	Όχι	0.051		
			Ασφ-ΚΘΑ	0.066		
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.052		
	5000	A3	Όχι	0.041		
			Ασφ-ΚΘΑ			
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.040		
4000	20000	B1	Όχι	0.062		
			Ασφ-ΚΘΑ	0.076		
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.067		
	10000	B2	Όχι	0.055		
			Ασφ-ΚΘΑ			
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.058		
	5000	B3	Όχι	0.045		
			Ασφ-ΚΘΑ			
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.046		

**Διεπιφάνεια ΚΘΑ - ΚΘΑ - Διατομής**

**7500**

Εασφ (Mpa)	ΕΚΘΑ (Mpa)	Κωδικός Διατομής	πλήρης Ολίσθηση	Οριζόντια έντ. σχx		
				Capa3D	Bisar	Capa3D
				Όχι Ασυνέχεια	Ναι Ασ.	
6500	20000	A1	Όχι	-0.031	0.086	0.216
			Ασφ-ΚΘΑ	-0.044	0.800	0.084
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.067	0.047	0.652
	10000	A2	Όχι	-0.027		
			Ασφ-ΚΘΑ	-0.041		
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.055		
	5000	A3	Όχι	-0.023		
			Ασφ-ΚΘΑ			
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.041		
4000	20000	B1	Όχι	-0.034		
			Ασφ-ΚΘΑ	-0.046		
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.070		
	10000	B2	Όχι	-0.030		
			Ασφ-ΚΘΑ			
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.058		
	5000	B3	Όχι	-0.027		
			Ασφ-ΚΘΑ			
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.045		

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Πυθμένας Ασφαλτικού - Διατομής**

**7500**

Εασφ (Mpa)	ΕκθΑ (Mpa)	Κωδικός Διατομής	πλήρης Ολίσθηση	Οριζόντια έντ. σχx		
				Capa3D	Bisar	Capa3D
				Όχι Ασυνέχεια	Ναι Ασ.	
6500	20000	A1	Όχι	-0.453	-0.463	-0.455
			Ασφ-ΚΘΑ	-0.253	-0.486	-0.238
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	-0.445	0.211	-0.440
	10000	A2	Όχι	-0.388		
			Ασφ-ΚΘΑ	-0.147		
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	-0.376		
	5000	A3	Όχι	-0.272		
			Ασφ-ΚΘΑ			
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	-0.255		
4000	20000	B1	Όχι	-0.479		
			Ασφ-ΚΘΑ	-0.301		
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	-0.473		
	10000	B2	Όχι	-0.437		
			Ασφ-ΚΘΑ			
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	-0.429		
	5000	B3	Όχι	-0.359		
			Ασφ-ΚΘΑ			
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	-0.346		

Σύγκριση διατομής 7590 με συνεργασία όλων των στρώσεων και χωρίς συνεργασία μεταξύ των δύο ΚΘΑ.

**Πυθμένας ΚΘΑ - Διατομής**

**7590**

Εασφ (Mpa)	ΕκθΑ (Mpa)	Κωδικός Διατομής	πλήρης Ολίσθηση	Οριζόντια έντ. σχx	
				Capa3D	Bisar
				Όχι Ασυνέχεια	
6500	20000	A1	Όχι	0.157	0.976
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.171	1.551
	10000	A2	Όχι	0.130	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.134	
	5000	A3	Όχι	0.101	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.098	
4000	20000	B1	Όχι	0.170	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ		
	10000	B2	Όχι	0.144	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ		
	5000	B3	Όχι	0.115	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ		

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

**Διεπιφάνεια ΚΘΑ - ΚΘΑ - Διατομής 7590**

Εασφ (Mpa)	ΕΚΘΑ (Mpa)	Κωδικός Διατομής	πλήρης Ολίσθηση	Οριζόντια έντ. σχx	
				Capa3D	Bisar
Όχι Ασυνέχεια					
<b>6500</b>	<b>20000</b>	<b>A1</b>	Όχι	-0.061	0.088
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.178	-0.283
<b>10000</b>	<b>10000</b>	<b>A2</b>	Όχι	-0.046	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.150	
<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>A3</b>	Όχι	-0.033	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ	0.116	
<b>4000</b>	<b>20000</b>	<b>B1</b>	Όχι	-0.071	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ		
<b>4000</b>	<b>10000</b>	<b>B2</b>	Όχι	-0.058	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ		
<b>4000</b>	<b>5000</b>	<b>B3</b>	Όχι	-0.044	
			ΚΘΑ-ΚΘΑ		

**Πυθμένας Ασφαλτικού - Διατομής 7590**

Εασφ (Mpa)	ΕΚΘΑ (Mpa)	Κωδικός Διατομής	Οριζόντια έντ. σχx	
			Capa3D	Bisar
Όχι Ασυνέχεια				
<b>6500</b>	<b>20000</b>	<b>A1</b>	-0.306	-0.505
	<b>10000</b>	<b>A2</b>	-0.317	0.477
	<b>5000</b>	<b>A3</b>	-0.167	
<b>4000</b>	<b>20000</b>	<b>B1</b>		
	<b>10000</b>	<b>B2</b>		
	<b>5000</b>	<b>B3</b>		

Συνθήκες πλήρης ολίσθησης μεταξύ των δύο ΚΘΑ.