

περίληψη - διδακτορική διατριβή με θέμα «χαρακτηρισμός ασύνδετων υλικών για τον σχεδιασμό εύκαμπτών οδοστρωμάτων» **bradley watson cliatt**

Η ικανότητα ενός εύκαμπτου οδοστρώματος στην αντοχή και τη μεταφορά αξονικού φορτίου αποτελεί σημαντικό ζήτημα άμεσα συνδεδεμένο με τις διαδικασίες σχεδιασμού και με την εκτιμώμενη διάρκεια ζωής του. Τα εύκαμπτα οδοστρώματα είναι κατασκευασμένα εν γένει σε δύο διαφορετικά επίπεδα: στις ασφαλικές στρώσεις στο άνω τμήμα της διατομής του οδοστρώματος που αποτελούνται από ασφαλτόμιγμα (συνδεδεμένα υλικά) και στα κατώτερα επίπεδα ασύνδετων αδρανών υλικών. Και τα δύο αυτά επίπεδα πρέπει να μπορούν να υποστηρίξουν τις συνθήκες φορτίων που δημιουργούνται από την εκτιμώμενη κυκλοφορία κατά τη σχεδιαζόμενη ζωή του οδοστρώματος. Η τρέχουσα έρευνα εστιάζεται στο χαρακτηρισμό των ασύνδετων αδρανών υλικών της βάσης σε δομές εύκαμπτων οδοστρωμάτων μέσω εργαστηριακού ελέγχου και διερεύνησης προσομοιώσεων που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων.

Οι τρέχουσες διαδικασίες διαστασιολόγησης, για τα ασύνδετα επίπεδα, βασίζονται συχνά εμπειρικά σε προϋπάρχουσες έρευνες ή/και σε διαχρονική εμπειρία στο πεδίο. Παρολαυτά, είναι γνωστό ότι αυτά τα ασύνδετα υλικά συμπεριφέρονται με έναν σημαντικά πιο περίπλοκο τρόπο και ότι η συμπεριφορά τους αυτή μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις κατά τη διαδικασία διαστασιολόγησης. Οι επιδράσεις που σχετίζονται με τη συμπεριφορά των υλικών αυτών έχουν ερευνηθεί διαχρονικά και συζητηθεί ευρέως. Τα υλικά αυτά είναι γνωστό ότι συμπεριφέρονται με μη γραμμικό τρόπο εξαρτώμενου από μια σειρά παραγόντων τόσο σχετιζόμενων με το υλικό όσο και με τις συνθήκες. Παρόλη τη γνώση γύρω από τους παράγοντες αυτούς κατά τη διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων η συμπεριφορά των υλικών εξακολουθεί και θεωρείται είτε στατική ή/και γραμμική κυρίως για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών. Για τα υλικά έχουν αναπτυχθεί στη διάρκεια των ετών ποικίλες διαδικασίες ελέγχου που προσδιορίζουν τη μη γραμμική συμπεριφορά σε σχέση με τις συνθήκες στις οποίες τα ασύνδετα υλικά αναμένεται να εκτεθούν στα στρώματα υποβάσης. Με την ανάπτυξη εργαστηριακών ελέγχων, αναπτύχθηκαν ταυτόχρονα και καταστατικά μοντέλα-προσομοιώσεις παλινδρόμησης με στόχο τον πιο ακριβή προσδιορισμό της συμπεριφοράς των ασύνδετων υλικών βάσει μηχανικών ή φυσικών χαρακτηριστικών. Πολλά καταστατικά μοντέλα αναπτύχθηκαν στη διάρκεια των χρόνων, ωστόσο, η ενσωμάτωσή τους σε πλήρη δυναμική στη διαστασιολόγηση οδοστρωμάτων δεν ήταν δυνατή εωσότου αναπτυχθούν και τα αντίστοιχα προγραμματιστικά μοντέλα βασισμένα σε H/Y που μπορούν πιο άμεσα να αξιολογήσουν τις προβλεπόμενες αποκρίσεις σε δομές οδοστρωμάτων.

Παρά τις προοπτικές για την συμπερίληψη του σε Προγράμματα Μοντελοποίησης Αριθμητικής Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM), τις περισσότερες φορές το σχετικά νέο πεδίο σχεδιασμού και ανάλυσης βάσει FEM ακόμη περιορίζει και υπεραπλοποιεί τη συμπεριφορά των ασύνδετων υλικών στις διαδικασίες προσομοίωσης και ανάλυσης. Η πλειονότητα των τρεχουσών ερευνών σε διαδικασίες ανάλυσης FEM περιορίζει το σχεδιασμό των ασύνδετων υλικών σε γραμμικές-ισοτροπικές συμπεριφορές καθώς η έρευνα εστιάζει στη διερεύνηση των άνω στρωμάτων βάσης συνδεδεμένων υλικών. Αυτή η υπεραπλοστέυση μπορεί δυνητικά να έχει σημαντική επίδραση στις αποκρίσεις των δομών οδοστρωμάτων και είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί στις διαδικασίες ανάλυσης οδοστρωμάτων βάσει FEM για την πιο ακριβή πρόβλεψη των αποκρίσεων των οδοστρωμάτων.

Η έλλειψη γνώσης στην επίδραση επί των αποκρίσεων οδοστρωμάτων των μη γραμμικών ανισοτροπικών εργαστηριακά βασισμένων FEM προσομοιώσεων ασύνδετων υλικών βάσης αποτελεί την εστίαση της τρέχουσας διατριβής. Με δεδομένο αυτό το κενό γνώσης, η τρέχουσα έρευνα εστιάζει στη διερεύνηση των αποκρίσεων οδοστρωμάτων μέσω ανάλυσης FEM, ενσωματώνοντας μη γραμμικές ανισοτροπικές εργαστηριακά βασισμένες προσομοιώσεις των στρωμάτων βάσης ασύνδετων υλικών και αναλύοντας την επίδραση του χαρακτηρισμού αυτού σε μια ευρεία γκάμα δομών οδοστρωμάτων και των προβλεπόμενων αποκρίσεων τους σε σημαντικές τοποθεσίες.

Για να επιτευχθεί αυτό, η τρέχουσα έρευνα διερευνά έναν αριθμό γνωστών παραγόντων (χαρακτηριστικά υλικών, συνθήκες υγρασίας, συνθήκες τάσεις, πάχος στρωμάτων, κλπ) οι οποίοι μπορεί να επηρεάζουν σημαντικά τις αποκρίσεις των υλικών. Αυτοί οι παράγοντες αρχικά διερευνώνται μέσω εργαστηριακών πειραμάτων με στόχο να εξαχθούν τα απαραίτητα δεδομένα που θα ενσωματωθούν στα καταστατικά μοντέλα/προσομοιώσεις των ασύνδετων υλικών υπό εξέταση. Τα αποτελέσματα της έρευνας στοχεύουν στην ανάδειξη της επίδρασης που θα έχει η επιλογή των καταστατικών μοντέλων ασύνδετων υλικών κατά την διαδικασία ανάλυσης FEM και της διαδοχικής επίδρασης σε μελλοντικές διαδικασίες διαστασιολόγησης εύκαμπτων οδοστρωμάτων. Καθώς το μέλλον της διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων ολοένα και γίνεται πιο μηχανιστικό και η προσομοίωση FEM με τη χρήση υπολογιστικών συστημάτων κερδίζει έδαφος, τα πεδία που διερευνώνται είναι σημαντικά για τις μελλοντικές διαδικασίες διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων και η κατανόηση της επίδρασης των διαφόρων μεταβλητών στις αποκρίσεις οδοστρωμάτων βάσει FEM αποκτά ξεχωριστή σημασία.

Για την εκπόνηση της διατριβής, διερευνήθηκαν πέντε υλικά συμπεριλαμβανομένων τριών αδρανών υλικών προερχόμενων από λατομείο και δύο εναλλακτικών ανακυκλωμένων ασφαλικών υλικών. Για τον εις βάθος χαρακτηρισμό των μη γραμμικών αποκρίσεων, κάθε ένα από τα υλικά δοκιμάστηκε σε 3 περιεκτικότητες υγρασίας (OMC - 2% , OMC και OMC + 2%) για να παράσχει ένα πλήρες σύνολο δεδομένων αναμενόμενων συνθηκών δομής οδοστρώματος. Χρησιμοποιήθηκε το πρωτόκολλο δοκιμών AASTHO T307 για τον προσδιορισμό των δεδομένων μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης (Mr). Ο προσδιορισμός του Mr αποτελεί το λόγο της τάσης των εξεταζόμενων υλικών και των αποτελεσμάτων του ελέγχου του μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης σε ένα εύρος τάσεων και παράσχει την απαραίτητη πληροφορία για την προσδιορισμό της μη γραμμικής απόκρισης ενός υλικού σε τάσεις προερχόμενες από συνθήκες φόρτισης. Για την έρευνα, τα αποτελέσματα του ελέγχου μέτρου ελαστικής παραμόρφωσης παρουσιάζονται ανά υλικό με βάση: τους κύκλους AASTHO, την ολική (ή ογκομετρική) τάση, πρόσθετη αξονική τάση και τις πλευρικές τάσεις. Τα δεδομένα εξετάζονται και οι διαφορές ανάμεσα στα υλικά, τις συνθήκες υγρασίας και των τάσεων αναλύονται.

Για την περαιτέρω ανάλυση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των αποκρίσεων υλικών, μια σειρά από μη γραμμικά καταστατικά μοντέλα έχουν αναπτυχθεί στη διάρκεια των χρόνων. Για την παρούσα διατριβή, τρία μη γραμμικά καταστατικά μοντέλα εξετάζονται με στόχο να αναδειχθεί η καλή προσαρμογή εργαστηριακά προσδιορισμένων αποκρίσεων ελαστικής παραμόρφωσης των υλικών κάτω από προσομοιωμένες συνθήκες φόρτισης. Ο στόχος του δεύτερου σταδίου της έρευνας ήταν να προσδιορίσει ποιο από τα μοντέλα/προσομοιώσεις ταιριάζει καλύτερα με τις αποκρίσεις των εξεταζόμενων υλικών και να αναδείξει την επίδραση που μπορεί να έχει η επιλογή ενός καταστατικού μοντέλου στις αποκρίσεις εύκαμπτων οδοστρωμάτων κατά τη διαστασιολόγηση. Για να επιτευχθεί αυτό, τα εργαστηριακά δεδομένα Mr αναλύθηκαν

μέσω παλινδρομήσεων για κάθε ένα από τα εξεταζόμενα μοντέλα/προσομοιώσεις (K-θ, Uzan, and MEPDG). Αρχικά, προσδιορίστηκαν οι εργαστηριακά οριζόμενες σταθερές παλινδρόμησης για κάθε μοντέλο και υπολογίστηκαν οι αξίες R^2 και RSMPE% για τον προσδιορισμό της καλής προσαρμογής των μοντέλων στα δεδομένα.

Με τα εξεταζόμενα υλικά να έχουν προσδιοριστεί αριθμητικά με τα εξετασμένα μη γραμμικά καταστατικά μοντέλα/προσομοιώσεις, το επόμενο στάδιο της έρευνας ήταν να προβλέψει τις αποκρίσεις των οδοστρωμάτων από συνθήκες κυκλοφοριακής φόρτισης ενσωματώνοντας τις προσομοιωμένες αποκρίσεις κάθε ενός από τα εξεταζόμενα υλικά. Προκειμένου να προβλεφθούν οι αποκρίσεις των οδοστρωμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα Finite Element Modeling (FEM) υπολογιστικό πρόγραμμα. Για την διατριβή αυτή, ένας από τους στόχους ήταν να διερευνήσει την επίδραση που θα έχει το στρώμα βάσης ασύνδετων υλικών και τα υλικά του στις προβλεπόμενες αποκρίσεις οδοστρωμάτων. Τα οδοστρώματα σχεδιάζονται με βάση την εκτιμώμενη χρήση τους (χαμηλή-υψηλή κυκλοφοριακή φόρτιση) και για το λόγο αυτό, ένα ευρύ φάσμα διατομών εύκαμπτων οδοστρωμάτων προσομοιώθηκε αντιπροσωπευτικών αντίστοιχα ευρέος φάσματος δομών οδοστρωμάτων. Ο στόχος ήταν να διερευνηθεί πότε και πού και σε ποιο βαθμό το στρώμα βάσης ασύνδετων υλικών επηρεάζει τις προβλεπόμενες αποκρίσεις υλικών και να αναδειχθεί η επίδραση αυτή στις διαδικασίες διαστασιολόγησης οδοστρωμάτων.

Για την τρέχουσα διατριβή, χρησιμοποιείται ένα Πρόγραμμα Μοντελοποίησης Αριθμητικής Μεθόδου Πεπερασμένων Στοιχείων (FEM) για την μοντελοποίηση των προβλεπόμενων κρίσιμων αποκρίσεων μέσα σε 16 διατομές οδοστρωμάτων που ερευνήθηκαν και αντιπροσωπεύουν το πλήρες φάσμα τύπων δρόμων από χαμηλού ως υψηλού όγκου κυκλοφορίας. Το πρόγραμμα FEM χρησιμοποιείται για την εξαγωγή: 1) των προβλεπόμενων κατακόρυφων υποχωρήσεων u_{22} (μm), 2) της προβλεπόμενης οριζόντιας τάσης σ_{11} (MPa), 3) της προβλεπόμενης οριζόντιας παραμόρφωσης ϵ_{11} ($\mu\text{m}/\text{mm}$), 4) της προβλεπόμενης κάθετης τάσης σ_{22} (MPa), 5) της προβλεπόμενης κάθετης παραμόρφωσης ϵ_{22} ($\mu\text{m}/\text{mm}$) για κάθε ένα από τα υλικά, τις διατομές, τα μοντέλα και τις συνθήκες υγρασίας. Συνολικά εξετάζονται 720 συνδυασμοί με την ανάλυση FEM και οι προβλεπόμενες αποκρίσεις για κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις οργανώνονται και παρουσιάζονται τόσο σύμφωνα με τη διατομή όσο και με το υλικό προκειμένου να κατανοηθεί πληρέστερα η συμπεριφορά των δομών του οδοστρώματος και οι κρίσιμες αποκρίσεις τους. Τα αποτελέσματα αυτής της διερεύνησης παρουσιάζονται στην τρέχουσα έρευνα, μαζί με μια περίληψη των γνώσεων που αποκτήθηκαν, αλλά και των τομέων για μελλοντική έρευνα.