

## Κατασκευαστική Συμπεριφορά Οδοστρωμάτων από Ινοπλισμένο Σκυρόδεμα με Χαλύβδινες Ίνες Structural behaviour of steel fibre-reinforced concrete pavements

Naeimeh JAFARIFAR<sup>1</sup>, Κύπρος ΠΗΛΑΚΟΥΤΑΣ<sup>2</sup>, Κυριάκος  
ΝΕΟΚΛΕΟΥΣ<sup>3</sup>

Λέξεις κλειδιά: ινοπλισμένο σκυρόδεμα, οδοστρώματα, ανάλυση, σχεδιασμός

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Οι πλείστοι από τους ήδη υπάρχοντες κανονισμούς σχεδιασμού για πλάκες εδάφους από σκυρόδεμα είναι βασισμένοι σε ελαστικές θεωρίες σχεδιασμού για άοπλο και για συμβατικά οπλισμένο σκυρόδεμα. Επομένως, δεν είναι βέβαιο αν αυτοί οι κανονισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων από ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ΙΣ) εφόσον δεν λαμβάνουν υπόψη την αντοχή του ΙΣ μετά τη ρηγμάτωση. Ορισμένοι κανονισμοί χρησιμοποιούν την οριακή κατάσταση αστοχίας για πλάκες εδάφους από ΙΣ, αλλά μόνο εν μέρει, αφού η ρηγμάτωση επιτρέπεται μόνο στην κάτω επιφάνεια της πλάκας. Αυτή η μέθοδος είναι πιο οικονομική, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη τα υψηλά επαναλαμβανόμενα φορτία που μπορεί να προκαλέσουν σημαντική μείωση στις μηχανικές ιδιότητες των οδοστρωμάτων και των θεμελιώσεων. Η παρούσα εργασία, στοχεύει στη διερεύνηση της κατασκευαστικής συμπεριφοράς οδοστρωμάτων ΙΣ δια μέσου αριθμητικών προσομοιώσεων και στον έλεγχο της ακρίβειας των αναλυτικών μεθόδων που αποτελούν τη βάση των υπολογισμών που χρησιμοποιούνται σε διάφορους κανονισμούς για πλάκες εδάφους.

**ABSTRACT:** Many of the existing design codes for plain and conventionally reinforced concrete slabs-on-grade are based on elastic design theories. These codes do not account for the post-cracking load bearing capacity of concrete and, hence, it is not certain whether they be used directly for steel fibre reinforced

---

<sup>1</sup> Υποψήφια Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: [n.jafarifar@sheffield.ac.uk](mailto:n.jafarifar@sheffield.ac.uk)

<sup>2</sup> Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: [K.Pilakoutas@sheffield.ac.uk](mailto:K.Pilakoutas@sheffield.ac.uk)

<sup>3</sup> Ανώτερος Ερευνητικός Συνεργάτης, Τμήμα Πολιτικών και Δομοστατικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο του Sheffield, email: [k.neocleous@sheffield.ac.uk](mailto:k.neocleous@sheffield.ac.uk)

concrete (SFRC) pavements. Some guidelines use the ultimate limit state concept for SFRC slabs-on-grade, but only partially, since cracking is only allowed to occur on the slab's bottom surface. This method is more economical, but it does not consider the highly repetitive nature of the loads that may cause considerable degradation in the mechanical properties of the pavement and foundation. This paper aims to investigate the structural behaviour of SFRC pavements through numerical simulations and to assess the accuracy of the analytical methods that form the basis of calculations used in different design codes.

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντίθετα με τα εύκαμπτα οδοστρώματα, τα δύσκαμπτα δεν παρουσιάζουν μεγάλο βέλος κάμψης, τοπικά, εξαιτίας του κυκλοφοριακού φόρτου. Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα έχουν την ιδιότητα να διανέμουν το φορτίο πάνω από μια σχετικά πλατιά επιφάνεια του υποστρώματος και να αποφεύγουν την συγκεντρωμένη τάση στη θεμελίωση, η οποία ενδέχεται να αναπτύξει πολύ σημαντική παραμόρφωση και καθίζηση. Τα δύσκαμπτα οδοστρώματα είναι επίσης πιο ανθεκτικά στο χρόνο και μπορούν να έχουν διάρκεια ζωής ως 40 χρόνια. Ο σχεδιασμός και η ποιότητα της κατασκευής καθώς και τα υλικά είναι πρωταρχικής σημασίας για την διαβεβαίωση πως η πλάκα θα καταφέρει να αποκτήσει την αναγκαία αντοχή και ανθεκτικότητα.

Λόγω της αξιοσημείωτης διαφοράς μεταξύ εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, η εφελκυστική αντοχή του δύσκαμπτου οδοστρώματος είναι αυτή που κυριαρχεί, συνήθως, στο σχεδιασμό. Συνεπώς, σε οδοστρώματα από άοπλο σκυρόδεμα, η θλιπτική αντοχή της πλάκας παραμένει αχρησιμοποίητη στο μεγαλύτερο μέρος. Τα υλικά παραμένουν κυρίως στην ελαστική περιοχή μέχρι τη στιγμή που θα αρχίσει η ρηγμάτωση, οπότε, η συμπεριφορά του μπορεί να προβλεφθεί με ελαστική ανάλυση. Μείνστης σημασίας στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων από άοπλο σκυρόδεμα, είναι επίσης και οι εγκάρσιοι και διαμήκεις αρμοί, καθώς προκαθορίζουν τις ρωγμές. Σε αυτή την περίπτωση, η συνέχεια της πλάκας εξασφαλίζεται με τη χρήση βλήτρων κατά μήκος των αρμών. Η τοποθέτηση των αρμών είναι δαπανηρή και οδηγεί στη δημιουργία επιπλέον διεπιφανειών φθοράς. Προς αποφυγή της χρήσης πολλών αρμών, απαιτείται η τοποθέτηση κατασκευαστικού οπλισμού.

Για τα οδοστρώματα από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ), ένα σημαντικό μέρος του μέγιστου φορτίου που μπορούν να φέρουν, αναπτύσσεται μετά τη ρηγμάτωση και την ενεργοποίηση της δύναμης των οπλισμών. Συνεπώς, η πλάκα περνάει στη μη γραμμική περιοχή και χρησιμοποιώντας ελαστικές υποθέσεις, πραγματοποιείται σημαντική υποεκτίμηση της αντοχής της πλάκας. Τα οδοστρώματα ινοπλισμένου σκυροδέματος (ΙΣ) συμπεριφέρονται παρόμοια με το ΟΣ, παρά το γεγονός ότι ο ενεργός οπλισμός είναι πολύ λιγότερος και γι αυτό το λόγο απαιτείται μη γραμμική ανάλυση για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους.

Είναι γνωστό ότι τα επαναλαμβανόμενα φορτία κυκλοφορίας μπορεί να προκαλέσουν αξιοσημείωτη υποβάθμιση της αντοχής των οδοστρωμάτων (λόγω

κόπωσης), οδηγώντας έτσι και σε μείωση του μεγίστου φορτίου. Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, οι χαλύβδινες ίνες αυξάνουν την αντοχή του σκυροδέματος σε κόπωση (ACI 544.4R, 1999), όμως η επίδραση αυτή στα οδοστρώματα ΙΣ δεν έχει μελετηθεί και επομένως απαιτείται ευρεία διερεύνηση.

Ήδη υπάρχοντες κανονισμοί για πλάκες εδάφους, όπως του Αμερικάνικου Ινστιτούτου Σκυροδέματος (ACI 360R, 1997), του PCA (Portland Cement Association, 1996), της JSCE (Japan Society of Civil Engineers, 1986), U.S. Army Corps of Engineers (1966) και της Concrete Society (2003), βασίζονται σε ελαστικές ή σε ελαστο-πλαστικές θεωρίες και μεθοδολογίες ανάλυσης. Παρόλα αυτά, αυτές οι μεθοδολογίες ανάλυσης δεν είναι οι ιδανικές για γενικές αναλύσεις και οι αριθμητικές μέθοδοι είναι πιο ευέλικτες στο φάσμα των προβλημάτων που μπορούν να επιλύσουν.

Ένα καλό αριθμητικό εργαλείο για την ανάλυση της συμπεριφοράς των δύσκαμπτων οδοστρωμάτων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Αυτή η μέθοδος προσφέρει πολύ καλή δυνατότητα επίλυσης σύνθετων προβλημάτων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων με χρήση διαφορετικών οριακών συνθηκών. Όμως, ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων του ΙΣ σε ένα λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων, δεν είναι εύκολος.

Η παρούσα εργασία ξεκινάει με μια βιβλιογραφική ανασκόπηση στις ήδη υπάρχουσες θεωρίες για πλάκες εδάφους. Επίσης, εξετάζεται η προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη της ελαστικής και ανελαστικής συμπεριφοράς οδοστρωμάτων από ΙΣ καθώς και για να συγκρίνει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα παραπάνω προσομοιώματα με τα αποτελέσματα που προκύπτουν χρησιμοποιώντας αναλυτικές μεθόδους για τυπικά οδοστρώματα σκυροδέματος. Η παρούσα εργασία διαπραγματεύεται και θέματα κόπωσης. Λόγω απουσίας πειραματικών αποτελεσμάτων για την επίδραση της κόπωσης στα οδοστρώματα από ΙΣ, σε αυτό το στάδιο της έρευνας, η επίδραση της κόπωσης προσομοιώνεται με χρήση ενός μειωτικού συντελεστή για τον υπολογισμό της αντοχής του σκυροδέματος.

## **ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΩΝ ΗΔΗ ΥΠΑΡΧΟΥΣΩΝ ΘΕΩΡΙΩΝ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΩΝ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΥΣΚΑΜΠΤΩΝ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ**

Η πρώτη ολοκληρωμένη μέθοδος σχεδιασμού για δύσκαμπτα οδοστρώματα αναπτύχθηκε το 1920 και είναι βασισμένη στη θεωρία του Westergaard (ACI 360R, 1997). Ο Westergaard (1926) θεωρεί πως η πλάκα είναι ένα ομογενές, ισότροπο και ελαστικό υλικό που εδράζεται σε ένα τέλειο υπόστρωμα. Παρά το γεγονός ότι υπερεκτιμούν το απαιτούμενο πάχος της πλάκας, οι εξισώσεις του Westergaard εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται ευρέως για τον υπολογισμό των τάσεων στα οδοστρώματα καθώς και να για τον έλεγχο της αξιοπιστίας προσομοιωμάτων που έχουν προκύψει χρησιμοποιώντας διαφορετικές τεχνικές.

Το 1943 ο Burmister *et al.* (1943) πρότεινε μια θεωρία για τον προσδιορισμό τάσεων και μετατοπίσεων σε συστήματα με στρώσεις, η οποία ήταν βασισμένη στη θεωρία της ελαστικότητας. Τα οδοστρώματα θεωρούνται ότι είναι κατασκευασμένα από δύο στρώσεις, από τις οποίες η πάνω στρώση προσομοιώνεται ως ελαστική και άπειρη μόνο στην οριζόντια διεύθυνση και η κάτω στρώση ως ημι-άπειρη και στερεή με χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας. Η συγκεκριμένη θεωρία ποτέ δεν αναπτύχθηκε αρκετά ώστε να χρησιμοποιηθεί στην πράξη από τους μηχανικούς εξαιτίας του ότι δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε πεπερασμένου μήκους πλάκες κάτω από πλευρικά και γωνιακά φορτία.

Αργότερα, ο Losberg (1961) και ο Meyerhof (1962), ανέπτυξαν παρόμοιες θεωρίες αντοχής βασισμένες στην αρχή της γραμμής διαρροής. Παρόλα αυτά, αυτές οι θεωρίες δεν μπορούν να προβλέψουν τις παραμορφώσεις του συστήματος θεμελίωσης-πλάκας.

Όλες οι υπάρχουσες θεωρίες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τον τρόπο προσομοίωσης της κατασκευαστικής συμπεριφοράς της πλάκας και του υποστρώματος. Τρία διαφορετικά προσομοιώματα έχουν χρησιμοποιηθεί για την πλάκα: ελαστική μεγάλου πάχους πλάκα, ελαστική, μικρού πάχους πλάκα και ελαστο-πλαστική, μικρού πάχους πλάκα. Για το υπόστρωμα έχουν χρησιμοποιηθεί δύο προσομοιώματα: το υπόστρωμα Winkler (ή πυκνού ρευστού) και το ελαστο-ισοτροπικό στέρεο υπόστρωμα (ACI 360R, 1997).

Το θεμελιώδες προσομοίωμα μιας πλάκας που εδράζεται σε «πυκνό ρευστό» υπόστρωμα, αποδίδεται στον Winkler το 1867 (NCHRP 372, 1995). Τέτοια θεμελίωση θεωρείται πως αποκλίνει κάτω από κάθετη φόρτιση σε ακριβή αναλογία με τη δύναμη, χωρίς μεταφορά διάτμησης σε γειτονικές περιοχές της θεμελίωσης. Στο ελαστο-ισοτροπικό προσομοίωμα, το επιβαλλόμενο φορτίο στην επιφάνεια της θεμελίωσης, θεωρείται πως δημιουργεί μια συνεχή λεκάνη. Η ελαστική απόκριση των πραγματικών εδαφών, βρίσκεται μεταξύ των δύο παραπάνω.

Οι κλασικές διαφορικές εξισώσεις συχνά χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της κατασκευαστικής συμπεριφοράς των δύσκαπτων οδοστρωμάτων. Η επίλυση αυτών των εξισώσεων με τις συμβατικές μεθόδους είναι εφικτή μόνο με χρήση απλοποιημένων προσομοιωμάτων με ομογενή υλικά και συνεχή γεωμετρία για την πλάκα και την επιφάνεια θεμελίωσης. Επομένως, η χρήση αυτής της προσέγγισης για πραγματικά δύσκαμπτα οδοστρώματα που μπορεί να εμπεριέχουν ασυνέχειες και μπορεί να στηρίζονται σε μη ενιαία επιφάνεια θεμελίωσης, είναι περιορισμένη. Παρόλα αυτά, είναι πιθανή η χρήση τους ως σημείο αναφοράς για τον έλεγχο άλλων αριθμητικών προσομοιωμάτων, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν κάτω από παραπλήσιες υποθέσεις.

Θεωρώντας μια πεπερασμένη πλάκα που φέρει φορτίο “P” το οποίο κατανέμεται πάνω σε μια μικρή επιφάνεια, η μέγιστη εφελκυστική τάση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας κλειστές εξισώσεις. Σε αυτή την περίπτωση, οι Timoshenko και

Woinowsky-Krieger (1952) εξήγαγαν εξισώσεις για πυκνό υγρό ως υπόστρωμα, όπως επίσης και για ημι-άπειρο ελαστικό στέρεο υπόστρωμα. Για την περίπτωση ενός συγκεντρωμένου φορτίου, οι εξισώσεις του Timoshenko πρέπει να διορθωθούν λαμβάνοντας υπόψη τη θεωρία για μεγάλου πάχους πλάκες «thick-plate». Αυτή η διόρθωση λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του Westergaard.

Παρόλα αυτά, αυτές οι μέθοδοι εξακολουθούν να είναι θεωρητικές χωρίς πρακτική εφαρμογή κατά το στάδιο του σχεδιασμού.

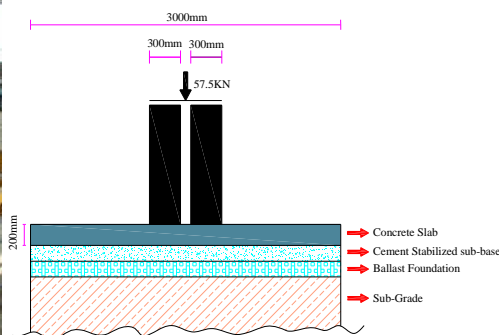
## ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων μπορεί να αντιμετωπίσει σύνθετα προβλήματα και μπορεί γενικά, να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση δύσκαμπτων οδοστρωμάτων χωρίς τους περιορισμούς που ισχύουν στις αναλυτικές επιλύσεις. Δύο διαφορετικές προσεγγίσεις εξετάζονται για την επίλυση ενός οδοστρώματος από ΙΣ το οποίο φέρει ένα συγκεντρωμένο φορτίο. Κατά την πρώτη προσέγγιση, τα υλικά θεωρούνται πως συμπεριφέρονται ελαστικά. Στη δεύτερη, λαμβάνεται υπόψη η μη γραμμική συμπεριφορά του ΙΣ και η προσομοίωση της αντοχής μετά την ρηγμάτωση γίνεται με την μέθοδο της διανεμημένης ρωγμής. Για τις αναλύσεις γίνεται χρήση του ABAQUS, ενός λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων (Hibbitt, Karlsson and Sorensen 2004).

Οι αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία, διεξήχθησαν στα πλαίσια του προγράμματος “EcoLanes” (2006-09), ενός προγράμματος χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση. Η πλάκα που εξετάστηκε, υποβλήθηκε σε δοκιμή επιταχυνόμενης φόρτισης στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο Ιασίου στη Ρουμανία. Μια γενική περιγραφή της δοκιμής συνοψίζεται στο Σχήμα 1 καθώς και στον Πίνακα 1.



(α)



(β)

Σχήμα 1. (α) Δοκιμή κυκλικής φόρτισης, (Τεχνικό Πανεπιστήμιο Ιασίου - Ρουμανία) (β) Στρώσεις και φόρτιση

**Πίνακας 1.** Λεπτομέρειες πλάκας

Φορτίο	Φορτίο δύο τροχών:	57.5 kN
	Θέση:	Κίνηση κατά μήκος του κέντρου
Πλάκα	Αριθμός κύκλων φόρτισης:	1.5 εκατομμύριο
	Πλάτος:	3.00 m
	Πάχος:	0.2 m
	Μέτρο ελαστικότητας:	32 GPa
Στρώση ενίσχυσης	Ισοδύναμο μέτρο αντίστασης:	0.4 N/ mm <sup>3</sup>
Λάστιχο αυτοκινήτου	Μέγεθος:	12.00R20
	Πλάτος Διατομής:	308 mm
	Πίεση:	850 kPa

**Διαστάσεις της πλάκας**

Δύο προσομοιώματα αναλύθηκαν:

- (1) Άπειρη πλάκα, για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από χρήση κλειστών, ήδη υπαρχουσών, εξισώσεων. Πλάκα διαστάσεων 6m×6m βρέθηκε πως προσομοιώνει αρκετά καλά μια πολύ μεγάλη πλάκα.
- (2) Πεπερασμένη πλάκα πλάτους 3m. Μια πλάκα διαστάσεων 3m×6m βρέθηκε πως είναι επαρκής γι αυτή την περίπτωση.

**Τύποι στοιχείων**

Για την προσομοίωση της πλάκας χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία τύπου κελύφους («shell»). Στοιχεία τύπου κελύφους χρησιμοποιούνται βασικά, για την προσομοίωση κατασκευών στις οποίες η μία διεύθυνση, συνήθως το πάχος, είναι κατά πολύ μικρότερο από τις άλλες διαστάσεις. Σε αυτή την περίπτωση, η γεωμετρία ορίζεται στην αρχική επιφάνεια και το πάχος ορίζεται ως ιδιότητα διατομής. Τα στοιχεία τύπου κελύφους έχουν βαθμούς ελευθερίας μετακινήσεων και στροφών σε κάθε κόμβο τους.

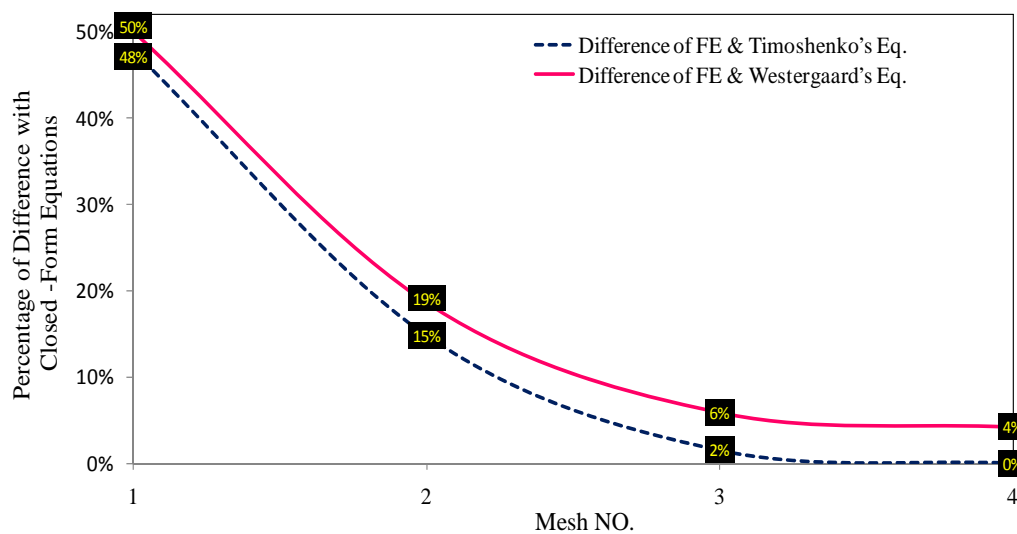
**Ανάλυση ευαισθησίας διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων για την ελαστική ανάλυση**

Τέσσερις διαστάσεις στοιχείου χρησιμοποιήθηκαν για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων καθώς και για την εκτίμηση της ευαισθησίας του προσομοιώματος στον καθορισμό της διακριτοποίησης. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων για την άπειρη πλάκα, συγκρίνονται με δύο κλειστές σχέσεις (Πίνακας 2). Το Σχήμα 2 δείχνει την ποσοστιαία διαφορά μεταξύ της μέγιστης εφελκυστικής αντοχής που υπολογίστηκε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων που προέκυψαν με χρήση των κλειστών εξισώσεων, για διαφορετικά μεγέθη στοιχείων. Χρησιμοποιώντας πιο πυκνό διαχωρισμό πεπερασμένων στοιχείων, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική μέθοδο τείνει να συγκλίνει με

τα αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση των κλειστών εξισώσεων. Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που προτείνεται, είναι αρκετά αξιόπιστη και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση πλακών με διαφορετική γεωμετρία και διαφορετικές συνθήκες φόρτισης. Λόγω της αποδεκτής ακρίβειας, 50 mm είναι το μέγεθος του κάθε πεπερασμένου στοιχείου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μελλοντικές αναλύσεις.

**Πίνακας 2.** Διαστάσεις διακριτοποίησης πεπερασμένων στοιχείων και αποτελέσματα ελαστικής ανάλυσης για άπειρη πλάκα

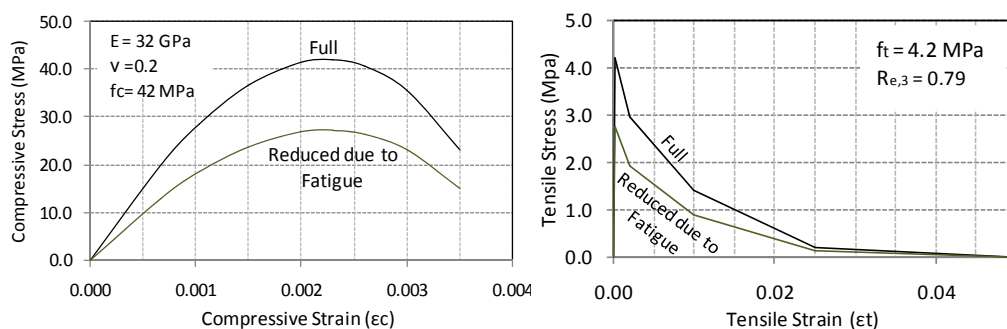
Μέθοδος	Αρ. Διακριτοποίησης	Μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου(mm)	Μέγιστη εφελκυστική τάση στη βάση (MPa)
Μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων	1	300	0.711
	2	150	1.159
	3	50	1.339
	4	25	1.363
Αναλυτικά αποτελέσματα	Εξίσωση Timoshenko		1.360
	Εξίσωση Westergaard		1.423



**Σχήμα 2.** Ελαστική ανάλυση με μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων, σύγκριση με κλειστές εξισώσεις

### Ανάλυση πεπερασμένου πλάτους πλάκα με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων

Η ανάλυση της πλάκας με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων πραγματοποιήθηκε υπό ωφέλιμο φορτίο, (φορτίο διπλού τροχού με δύο επιφάνειες επαφής, 110x300μm η κάθε μία) το οποίο εφαρμόζεται κεντρικά σε κάθε πλάκα. Οι τάσεις που δημιουργούνται στην πλάκα κάτω από αυτό το φορτίο είναι πολύ μικρότερες από τις τάσεις ρηγματώσης. Συνεπώς, το φορτίο αυξάνεται σταδιακά, καταγράφοντας την μετά-ρηγματωμένη συμπεριφορά της πλάκας έως τη στιγμή της κατάρρευσης. Η εφελκυστική αντοχή του ΙΣ μετά τη ρηγματώση, αυξάνει το φορτίο αντοχής του κατασκευαστικού μέλους, πέρα από την αντοχή του άοπλου σκυροδέματος. Το ομαλοποιημένο εφελκυστικό διάγραμμα του σκυροδέματος, που παρουσιάζει τη σχέση της εφελκυστικής τάσης με την εφελκυστική παραμόρφωση στη ρηγματωμένη περιοχή, περιγράφει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος μετά τη ρηγματώση. Το Σχήμα 3 δείχνει τις ιδιότητες του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση. Ο λόγος της οριακής διαξονικής θλιπτικής τάσης προς την οριακή θλιπτική παραμόρφωση (Kupfer et al. 1973), θεωρήθηκε ίσος με 1.15. Η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της μη-γραμμικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος, είναι η μέθοδος διανεμημένης ρωγμής.

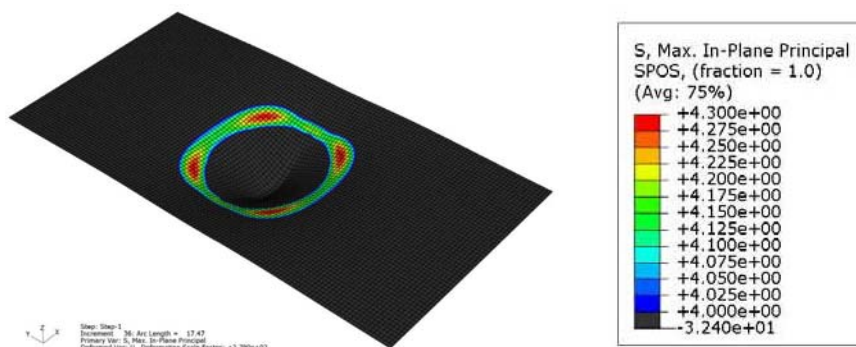


Σχήμα 3. Ιδιότητες σκυροδέματος

Καθώς το φορτίο αυξάνεται, οι εφελκυστικές τάσεις στη βάση της πλάκας φτάνουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, οδηγώντας στη δημιουργία μιας εγκάρσιας ρωγμής εξαιτίας των θετικών ροπών. Ακόμα μεγαλύτερη αύξηση του φορτίου, οδηγεί στη δημιουργία διαμηκών ρωγμών στη βάση της πλάκας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σημαντική αύξηση των αρνητικών κυκλικών ροπών σε κάποια απόσταση από τη θέση φόρτισης, γεγονός που οδηγεί στη δημιουργία κυκλικών ρωγμών στην πάνω επιφάνεια της πλάκας. Το Σχήμα 4 δείχνει τις κυκλικές εφελκυστικές τάσεις στην πάνω επιφάνεια της πλάκας. Το οριακό φορτίο επιτυγχάνεται όταν η εγκάρσια ρωγμή φτάνει στα άκρα της πλάκας η



οποία έχει χωριστεί στα δύο. Η καμπύλη δύναμης-βέλους κάμψης της πλάκας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5 της επόμενης παραγράφου.



Σχήμα 4. Εφελκυστικές τάσεις στην πάνω επιφάνεια της πλάκας

## Η επιρροή της κόπωσης

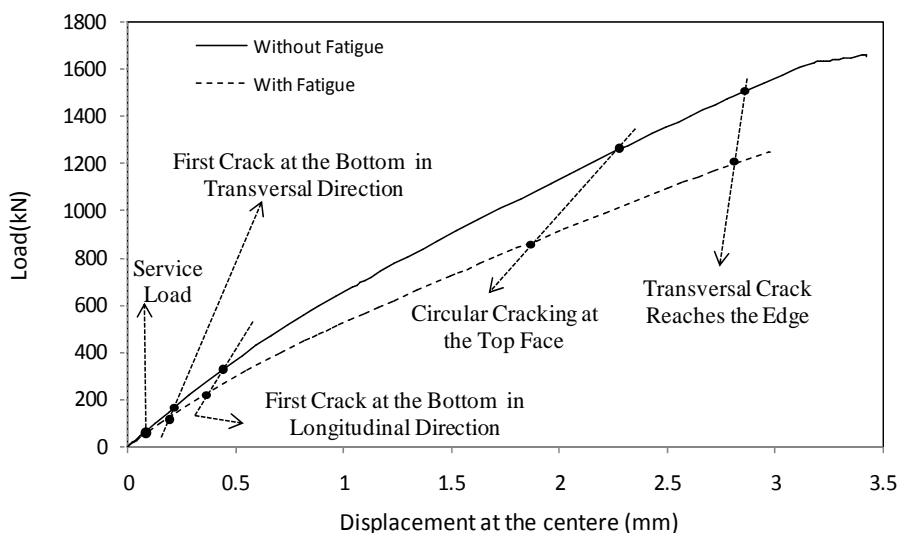
Τα οδοστρώματα σκυροδέματος υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενες φορτίσεις εξαιτίας της κυκλοφορίας και των μεταβαλλόμενων περιβαλλοντικών συνθηκών. Η ευρέως διαδεδομένη «οριακής κατάστασης σχεδιασμού» διαδικασία, προϋποθέτει πως τα κατασκευαστικά μέλη σκυροδέματος δρουν ικανοποιητικά κάτω από υψηλές τάσεις. Παρόλα αυτά, η διαδικασία αυτή μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμη στην περίπτωση των πλακών ΙΣ, μιας και η επίδραση του επαναλαμβανόμενου φορτίου δεν είναι ακόμα εντελώς κατανοητή.

Γενικά, η αντοχή λόγω κόπωσης για το ΙΣ είναι 65 με 95 τοις εκατό σε ένα με δύο εκατομμύρια κύκλους μη αναστρέψιμης φόρτισης, συγκρινόμενη με τις τυπικές τιμές των 50 με 55 % που ισχύουν για την περίπτωση πλακών χωρίς ίνες. Μια τιμή της τάξεως του 85% χρησιμοποιείται συχνά στο σχεδιασμό οδοστρωμάτων από καλής ποιότητας ΙΣ (ACI 544.4R, 1999).

Στην παρούσα εργασία, για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της κόπωσης κατά την αριθμητική ανάλυση, η αντοχή του υλικού μειώθηκε στο 65% της στατικής αντοχής και η κατασκευή αναλύθηκε όπως και για το στατικό φορτίο. Το Σχήμα 5 δίνει την καμπύλη δύναμης-μετατόπισης στο μέσο της πλάκας και λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή της κόπωσης και αγνοώντας τη. Τα φορτία που σχετίζονται με την εμφάνιση των εγκάρσιων, των διαμηκών και των κυκλικών ρωγμών απεικονίζονται στις καμπύλες.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την αριθμητική μη-γραμμική ανάλυση συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την μη-γραμμική μέθοδο που παρουσιάστηκε από την μεθοδολογία για πλάκες ΙΣ σύμφωνα με την CS (Concrete Society, 2003). Η μέθοδος του Concrete Society βασίζεται στην ελαστο-πλαστική θεωρία του Meyerhof (1962) χρησιμοποιώντας το σκεπτικό της

οριακής κατάστασης, αλλά μόνο εν μέρει, μέχρι η ρηγμάτωση να επιτραπεί να εμφανιστεί στην κάτω επιφάνεια της πλάκας.



Σχήμα 5. Καμπύλη Δύναμης-βέλους στο κέντρο της πλάκας.





### ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΠΛΑΚΕΣ ΙΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ CS (CONCRETE SOCIETY, 2003)

Για φόρτιση «διπλών σημειακών φορτιών», το συνολικό φορτίο αστοχίας μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά χρησιμοποιώντας τη μεθοδολογία που προτείνεται από το Concrete Society. Σύμφωνα με την πρόταση του Concrete Society, το οριακό φορτίο αστοχίας επιτυγχάνεται ακριβώς πριν από την εμφάνιση των πρώτων ορατών κυκλικών ρωγμών στην πάνω επιφάνεια της πλάκας. Σε αυτή τη μέθοδο, η συνεισφορά της δράσης του υποστρώματος αγνοείται. Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω υπολογισμούς και αγνοώντας το συντελεστή ασφαλείας, το οριακό φορτίο της πλάκας με τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στην παράγραφο 3, εκτιμάται στα 790 kN. Αυτό είναι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να φέρει η πλάκα ακριβώς πριν από την εμφάνιση ρωγμών στην πάνω επιφάνειά της.

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ο Πίνακας 3 δείχνει τα συγκριτικά αποτελέσματα για κάθε φάση της ρηγμάτωσης και του αντίστοιχου φορτίου. Από τον πίνακα αυτό, φαίνεται ότι για φορτίο κόπωσης, το φορτίο στο οποίο παρουσιάζεται η πρώτη ρωγμή μειώνεται αναλογικά της μείωσης της ιδιότητας του υλικού. Η φθορά έχει μικρότερη επίδραση στην τελική αντοχή.

**Πίνακας 3.** Αντοχή σε φορτίο λαμβάνοντας ή όχι υπόψη την επίδραση της κόπωσης

Φάση ρηγμάτωσης		Αριθμητικό προσομοίωμα			Concrete Society
		Φορτίο (kN)		Λόγος αντοχής (Με κόπωση/ Χωρίς κόπωση)	Φορτίο (kN)
		Χωρίς κόπωση	Με κόπωση		Χωρίς κόπωση
Πρώτη εγκάρσια ρωγμή στη βάση		175	115	66 %	-
Πρώτη διαμήκης ρωγμή στη βάση		320	215	67 %	-
Κυκλική ρωγμή στην πάνω επιφάνεια		1250	850	68 %	790
Ρηγμάτωση κατά μήκος ολόκληρης της εγκάρσιας διεύθυνσης		1500	1200	80 %	-

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Υφιστάμενοι κανονισμοί προτείνουν πλήθος διαδικασιών για το σχεδιασμό οδοστρωμάτων, οι οποίες είναι βασισμένες στην ελαστική θεωρία. Η ανάλυση με χρήση των πεπερασμένων στοιχείων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του οδοστρώματος, με επιλογή των κατάλληλων στοιχείων, προσομοιωμάτων και οριακών συνθηκών. Επίσης, μελλοντικά, η ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη διερεύνηση πιο πολύπλοκων συνθηκών φόρτισης του οδοστρώματος, όπως συμβαίνει και στην πραγματικότητα.

Από τις αναλύσεις που έγιναν με χρήση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων, βρέθηκε ότι η αντοχή της πλάκας του οδοστρώματος ξεπέρασε κατά πολύ την ελαστική αντοχή της. Η πρώτη ρωγμή αναμένεται να εμφανιστεί σε εγκάρσια διεύθυνση και να ακολουθηθεί από διαμήκεις ρωγμές. Οι ρωγμές που παρουσιάστηκαν γύρω από την επιφάνεια φόρτισης, πραγματοποιήθηκαν σε πολύ υψηλό φορτίο και η πλάκα τελικά αστόχησε και χωρίστηκε σε δύο κομμάτια.

Η επιρροή της κόπωσης μπορεί να ληφθεί υπόψη ελαττώνοντας τις ιδιότητες των υλικών, κάτι που έχει μεγαλύτερη επίδραση στο φορτίο όπου παρουσιάζεται η πρώτη ρωγμή, παρά στην οριακή αντοχή.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της μεθόδου που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν με χρήση της μεθοδολογίας που προτείνεται από την Concrete Society, παρατηρείται πως χρειάζεται αρκετή μελέτη ακόμα έτσι ώστε οι δύο μεθοδολογίες να συγκλίνουν.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αυτή η έρευνα (μέρος του προγράμματος EcoLanes) χρηματοδοτήθηκε από το 6<sup>ο</sup> πρόγραμμα-πλαίσιο της ΕΕ, στο πλαίσιο της σύμβασης με αριθμό 031530.

## ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- ACI 360R, “Design of slabs on grade”, American Concrete Institute (1997)
- ACI 544.4R, “Design considerations for steel fibre reinforced concrete”, American Concrete Institute (1999)
- Burmister, D.M., Palmer, L.A., Barber, E.S., “The theory of stress and displacement in layered systems and applications to the design of airport runways”, Highway Research Board Proceeding, Vol. 23 (1943) 126-148
- Concrete Society, “Concrete industrial ground floors; a guide to their design and construction”, Technical Report No. 34 (2003)
- EcoLanes: EU FP6 STREP project, “Economical and sustainable pavement infrastructure for surface transport”, contract 031530, <http://ecolanes.shef.ac.uk> (2006-09)
- Hibbit, Karlsson and Sorensen, “ABAQUS User’s Manual”, Vol. II, Version 6.5 (2004)
- Japan Society of Civil Engineers, “Standard specification for design and construction of concrete structures”, Part 1 (Design) (1986)
- Kupfer H., Hilsdorf, H.K., and Rusch, H., “Behaviour of concrete under biaxial stress”, ACI Journal, Vol. 99, No. 98 (1973) 656-666
- Losberg, A. (1961), “Design Methods for Structurally Reinforced Concrete Pavements”, Transactions of Chalmers University of Technology Gothenburg, Sweden.
- Meyerhof G.G., “Load carrying capacity of concrete pavements”, Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, (1962) 89-116
- NCHRP Report 372, “Support under Portland cement concrete pavements”, Transportation Research Board, (1995)
- Portland Cement Association, “Thickness design for concrete pavements”, Publication No. IS010P (1966)
- Timoshenko, S. and Woinowsky-Krieger, S., “Theory of plates and shells”, Engineering Society Monographs, (1952)
- U.S. Army Corps of Engineers, “Basis for rigid pavement design for military airfields”, Miscellaneous Paper No. 5-7 (1966)
- Westergaard, H. M., “Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis”, Journal of Public Roads, Vol. 7, No. 2 (1926)