

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΑΕΡΟΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΥΛΙΚΩΝ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Προσομοίωση της υποβαθμισμένης συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος λόγω διάβρωσης μέσω της μοντελοποίησης πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης

> Αλκιβιάδης Χαραλαμπόπουλος Αριθμός Μητρώου:247072/1026979

Χαράλαμπος Αποστολόπουλος, Καθηγητής

ΠΑΤΡΑ, Φεβρουάριος 2022

Πανεπιστήμιο Πατρών, Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών Χαραλαμπόπουλος Αλκιβιάδης © 2022- Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών ii

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας δεν υποδηλοί την αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα. Κατά τη συγγραφή τηρήθηκαν οι αρχές της ακαδημαϊκής δεοντολογίας.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών iii

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Προσομοίωση της υποβαθμισμένης συνάφειας χάλυβα - σκυροδέματος λόγω διάβρωσης μέσω της μοντελοποίησης πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης Χαραλαμπόπουλος Αλκιβιάδης

Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος (Ο/Σ) είναι ο πιο κοινός παράγοντας υποβάθμισης της ανθεκτικότητας ειδικά στις παράκτιες περιοχές. Οι διαβρωμένες κατασκευές αντιμετωπίζουν διαφορετικά προβλήματα φθοράς που επηρεάζουν την ικανότητα μεταφοράς του φορτίου, όπως απώλεια συνάφειας μεταξύ των ράβδων οπλισμού και του περιβάλλοντος σκυροδέματος, ρωγμές ή θρυμματισμό της επικαλύψεως σκυροδέματος και απώλεια της διατομής του οπλισμού αλλά και της αντοχής του. Σε αυτήν την εργασία αναπτύχθηκε ένα τρισδιάστατο (3D) μοντέλο, με χρήση της ανάλυσης των πεπερασμένων στοιχείων (FE) στο ABAQUS για την προσομοίωση διαβρωμένων κατασκευαστικών μελών, λαμβάνοντας υπόψη όλες τις βλάβες που προκαλούνται από τη διάβρωση στο προς μοντελοποίηση μέλος σύμφωνα με τις οδηγίες του Model Code 2010. Για το σκοπό αυτό ως βάση για την επικύρωση του μοντέλου υπήρξε η εργασία An experimental study on the effects of corrosion and stirrups spacing on bond behavior of Reinforced Concrete [9] όπου χρησιμοποιήθηκαν τα διαβρωμένα δοκίμια με εγκάρσιο οπλισμό Φ8/120mm και χωρίς καθόλου εγκάρσιο οπλισμό και υποβλήθηκαν σε τεστ εξόλκευσης της κύριας έκκεντρα τοποθετημένης διαβρωμένης ράβδου. Αναλυτική μελέτη έγινε για τον βέλτιστο και τον πιο αποτελεσματικό τρόπο μοντελοποίησης της σύνθετης διαβρωμένης διεπιφάνειας, με την επιλογή της συνεκτικής έλξης ανάμεσα στις δύο επιφάνειας να πληροί αυτά τα κριτήρια, με τροποποιήσεις βέβαια κατάλληλα των παραμέτρων, για κάθε βαθμό διάβρωσης του οπλισμού. Ο τρόπος μοντελοποίησης των βλαβών στο σκυρόδεμα έγινε όπως συναντάται στη βιβλιογραφία με μείωση της αντοχής του σε μια περιοχή επιρροής της διάβρωσης που εκτιμάται με ξεχωριστό κώδικα που απαντάται στη σχετική βιβλιογραφία [47]. Τα αντίστοιχα εφαρμόστηκαν και για τη βλάβη του οπλισμού με χρήση εμπειρικών σχέσεων για την υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα. Μετά από εξαγωγή των καμπυλών τάσεων συνάφειας των προσομοιώσεων έγινε σύγκριση με τις πειραματικές καταλήγοντας σε καλές προβλέψεις από το αναπτυγμένο μοντέλο. Σε όρους μέγιστης δύναμης η μεγαλύτερη απόκλιση είναι στα 9.38% ενώ παράλληλα θετικά συμπεράσματα εξάγονται και για τους τρόπους αστοχίας των δοκιμίων με καλές προβλέψεις σχηματισμού ρωγμών πλην όμως της αντιπροσωπευτικότητας τους στην τάξη

μεγέθους. Σημαντική παρατήρηση είναι ότι το συγκεκριμένο μοντέλο μπορεί να λαμβάνει υπόψιν του τη πυκνότητα του εγκάρσιου οπλισμού με μέλλον για την επέκταση του σε πραγματικές κατασκευές και πως οι οδηγίες του Model Code 2010 βρίσκουν καλή συμφωνία για μέτριας περίσφιγξης δοκίμια. Ωστόσο περαιτέρω διερεύνηση χρειάζεται να γίνει για τις τιμές της ολίσθησης που δεν μπορούν να προβλεφθούν αυξανόμενης της διάβρωσης καθώς και σύγκριση με άλλα πειραματικά δεδομένα.

Λέξεις κλειδιά

Συνάφεια χάλυβα – σκυροδέματος, Περίσφιγξη εγκάρσιου οπλισμού , Πεπερασμένα Στοιχεία Διάβρωση Οπλισμού

ABSTRACT

Simulation of the degraded steel - concrete bond due to corrosion through modeling pull out experiments Charalampopoulos Alkiviadis

Corrosion of reinforcing steel in reinforced concrete (RC) structures is the most common factor affecting durability especially in coastal areas. Corroded structures face different wear problems that affect the load carrying capacity, such as loss of bond between the reinforcement and the surrounding concrete, cracks or crumbling of the concrete cover, and loss of the reinforcement cross-section and strength. In this work, a three-dimensional (3D) model was developed, using finite element analysis (FE) in ABAQUS to simulate corroded structural components, considering corrosion damage, to be modeled according to Model Code 2010 instructions. For this purpose, was used as a basis for the validation of the model the study An experimental study on the effects of corrosion and stirrups spacing on bond behavior of Reinforced Concrete[9]. In the abovementioned study corroded specimens were used with transverse reinforcement $\Phi 8/120mm$ and without any transverse reinforcement and subjected to pull-out tests of the main eccentrically placed corroded bar. A detailed study was made for the best and most effective way of modeling the complex corroded interface, by selecting the cohesive behavior between the two surfaces to meet those criteria, with modifications appropriate to the parameters, for each level of corrosion of the reinforcement. The modeling of the damage in the concrete was done as found in the literature by reducing its strength (tension and compression) to an area of corrosion influence that is estimated by a separate code found in the relevant literature [47]. Accordingly, the same was applied for the damage of the reinforcement using empirical relations for the degradation of the mechanical properties of the steel. After extracting the bond - slip curves of the simulations, a comparison was made with the experimental ones, resulting in good predictions from the developed model. In terms of maximum strength, the largest deviation is at 9.38% while at the same time positive conclusions are drawn about the failure shapes of the specimens with good predictions of crack formation but not for its representativeness in order of magnitude. An important observation is that the specific model can take into account the density of the transverse reinforcement with a future for its extension to real constructions and that the instructions of the Model Code 2010 find good agreement for moderately confined specimens. However further

investigation needs to be done into slip values that cannot be predicted of increasing corrosion level and to validate the proposed model with other experiments.

Keywords Bond of reinforced Concrete, Confinement by transverse reinforcement, Finite Element Analysis, Reinforcement Corrosion

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1.1 Ενέργεια Θραύσεως βάσει μεγέθους αδρανών από CEP-FIB Model Code 1990 13
Πίνακας 3.2.1 Πίνακας τιμών των εμπειρικών συντελεστών αy,αu,α1 συναρτήσει ποσοστού
απώλειας μάζας ανά ερευνητική ομάδα32
Πίνακας 4.1 Υποβάθμιση συνάφειας βάσει βαθμού διείσδυσης και επιφανειακών ρωγμών υπό
την ύπαρξη ή μη εγκάρσιου οπλισμού κατά το Model Code 2010
Πίνακας 4.2 Πίνακας παραμέτρων Μέσης Τάσης Συνάφειας-Ολίσθησης για ράβδους με
νευρώσεις που προτείνει το Model Code για δοκίμιο με l / $\emptyset = 5$ και υποθέτοντας ομοιόμορφη
τάση σε όλο το μήκος δεσμού
Πίνακας 5.1 Πειραματικά αποτελέσματα απώλειας μάζας των διαβρωμένων ράβδων Φ16 ανά
δοκίμιο
Πίνακας 5.3.1 Παράμετροι για το μοντέλο έλξης-αποχωρισμού της μοντελοποίησης του δεσμού
συνάφειας για δοκίμια με συνδετήρες (Φ8/120mm)
Πίνακας 5.3.2 Κυριότερα μεγέθη μετά την ολοκλήρωση των αναλύσεων με το πρόγραμμα
ABAQUS για δοκίμια με συνδετήρες (Φ8/120mm)
Πίνακας 5.3.3 Παράμετροι για το μοντέλο έλξης-αποχωρισμού της μοντελοποίησης του δεσμού
συνάφειας για δοκίμια χωρίς συνδετήρες
Πίνακας 5.3.4 Κυριότερα μεγέθη μετά την ολοκλήρωση των αναλύσεων με το πρόγραμμα
ABAQUS για δοκίμια χωρίς συνδετήρες
Πίνακας 5.3.5 Αποκλίσεις της μέγιστης δύναμης από τις πειραματικές μετρήσεις για δοκίμια με
συνδετήρες
Πίνακας 5.3.6 Αποκλίσεις μέγιστης τάσης συνάφειας από τις πειραματικές μετρήσεις για
δοκίμια με συνδετήρες
Πίνακας 5.3.7 Αποκλίσεις της μέγιστης δύναμης από τις πειραματικές μετρήσεις για δοκίμια
χωρίς συνδετήρες
Πίνακας 5.3.8 Αποκλίσεις τάσης συνάφειας από τις πειραματικές μετρήσεις για δοκίμια χωρίς
συνδετήρες
Πίνακας 5.3.1.1 Αποτελέσματα ολίσθησης δοκιμίων με συνδετήρες (φ8/120) πειράματος και
προσομοίωσης

Πίνακας 5.3.1.2 Αποτελέσματα ολίσθησης δοκιμίων χωρίς συνδετήρες πειράματος και	
προσομοίωσης	64

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.2.2.1 Καμπύλη αντοχής άοπλου σκυροδέματος σε θλίψη συναρτήσει βάθους
διείσδυσης διάβρωσης
Διάγραμμα 2.2.2.2 Καμπύλη αντοχής άοπλου σκυροδέματος σε εφελκυσμό συναρτήσει βάθους
διείσδυσης διάβρωσης
Διάγραμμα 2.2.2.3 Καμπύλη αντοχής οπλισμένου σκυροδέματος σε θλίψη συναρτήσει του
βάθους διείσδυσης διάβρωσης
Διάγραμμα 2.2.2.4 Καμπύλη αντοχής οπλισμένου σκυροδέματος σε εφελκυσμό συναρτήσει του
βάθους διείσδυσης διάβρωσης
Διάγραμμα 3.2.1 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης αδιάβρωτου και διαβρωμένου
χάλυβα οπλισμού
Διάγραμμα 5.3.1 Απώλεια Συνάφειας των προσομοιώσεων σε σύγκριση με το Model Code και
τα πειραματικά δεδομένα για δοκίμια με συνδετήρες
Διάγραμμα 5.3.2 Απώλεια Συνάφειας των προσομοιώσεων σε σύγκριση με το Model Code και
τα πειραματικά δεδομένα για δοκίμια χωρίς συνδετήρες
Διάγραμμα 5.3.3 Αντοχή Συνάφειας των προσομοιώσεων σε σύγκριση με το Model Code και τα
πειραματικά δεδομένα για δοκίμια με συνδετήρες
Διάγραμμα 5.3.4 Αντοχή Συνάφειας των προσομοιώσεων σε σύγκριση με το Model Code και τα
πειραματικά δεδομένα για δοκίμια με συνδετήρες
Διάγραμμα 5.4 1 Τάσης συνάφειας προς ολίσθηση για το δοκίμιο 25-S120-0
Διάγραμμα 5.4 2 Τάση Συνάφειας προς Ολίσθηση για το δοκίμιο 25-S120-1
Διάγραμμα 5.4 3 Τάση Συνάφειας προς Ολίσθηση για το δοκίμιο 25-S120-4
Διάγραμμα 5.4 4 Τάση Συνάφειας προς Ολίσθηση για το δοκίμιο 25-S120-567
Διάγραμμα 5.4 5 Τάση Συνάφειας προς Ολίσθηση για το δοκ ίμιο 25-Ν-0
Διάγραμμα 5.4 6 Τάση Συνάφειας προς Ολίσθηση για το δοκ ίμιο 25-Ν-3
Διάγραμμα 5.4 7 Τάση Συνάφειας προς Ολίσθηση για το δοκίμιο 25-Ν-4
Διάγραμμα 5.5 2 Καμπύλες δύναμης ολίσθησης διαφορετικής πλεγματικής πυκνότητας
πεπερασμένων στοιχείων

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών χ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 2.1.1 Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό μονοαξονική φόρτιση σε α) εφελκυσμό στα
αριστερά β) θλίψη στα δεξιά
Σχήμα 2.1.1.1 Μοντέλο Soliman &Yu
Σχήμα 2.1.1.2 Μοντέλο Sargin
Σχήμα 2.1.1.3 Μοντέλο ΚΕΝΤ & PARK
Σχήμα 2.1.1.2.1 Τριγραμμικό μοντέλο εφελκυσμού σκυροδέματος
Σχήμα 2.1.2.1 Επιφάνεια διαρροής υπό διαξονική φόρτιση
Σχήμα 2.1.2.2 Το μή επιφανειών αστοχίας για διαφορετικές τιμές Κ ς με το επίπεδο π (αποκλίνον
επίπεδο ή deviatoric plane)
Σχήμα 2.1.3.1 Αποτύπωση της Ισότροπης κράτυνσης με διεύρυνση των ορίων της επιφάνειας
διαρροής
Σχήμα 2.1.4.1 Συνάρτηση Drucker-Prager στο επίπεδο p-q
Σχήμα 2.2.3.1 Απεικόνιση της ακτίνας επιρροής της διάβρωσης στο σκυρόδεμα
Σχήμα 3.1.1 Τυπική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης με τα αναγραφή των σημαντικότερων
παραμέτρων
Εικόνα 4.1 Μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων χάλυβα σκυροδέματος
Εικόνα 4.1.1 Μεσοσκοπικό αριθμητικό μοντέλο της δοκού οπλισμένου σκυροδέματος
Εικόνα 4.1.2 Προφίλ κατανομής διάβρωσης σε γωνιακά τοποθετημένο οπλισμό
Εικόνα 4.1.3 Μοντέλο μηχανισμού συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος σύμφωνα με τον Κινεζικό
Κανονισμό
Εικόνα 4.1.4 Αποτελέσματα πειραματικών και αριθμητικών καμπυλών για το κεντρικό σημείο
της δοκού
Εικόνα 4.1.5 α) Γεωμετρία Δοκιμίου και Επιφάνεια Επαφής
Εικόνα 4.1.5 β) Εγκάρσια Θλιπτική πίεση εφαρμοζόμενη στο δεσμό
Εικόνα 4.1.6 α) Συνεκτικότητα Mohr
Εικόνα 4.1.6 β) Μοντέλο τριβής Coulomb
Εικόνα 4.1.7 α) Πειραματική και Αριθμητικές καμπύλες τάση συνάφειας-ολίσθηση 41

Εικόνα 4.1.7 β) Παραμετρικές αναλύσεις για διαφόρους συντελεστές τριβής μ και εγκάρσιας
πίεσης $ρ$
Εικόνα 4.1.8 Τυπική γεωμετρία δοκιμίων πειράματος εξόλκευσης
Εικόνα 4.1.9 Απώλεια εγκάρσιας πίεσης συναρτήσει διάβρωσης (αριστερά) Εκθετική
συνάρτηση απομείωσης του συντελεστή τριβής μ για διάφορα επίπεδα διάβρωσης (δεξιά) 42
Εικόνα 4.1.10 Καμπύλες τάσης συνάφειας – ολίσθησης πεπερασμένων στοιχείων και
πειραματικών αποτελεσμάτων με πάχος επικάλυψης 25 mm και τύπο σκυροδέματος C50
αριστερά και C60 δεξιά
Εικόνα 4.1.11 Επικύρωση του μοντέλου της εργασίας με εφαρμογή του στα πειραματικά
αποτελέσματα των εργασιών Cabrera, Ghoddoussi (αριστερά) Al-Sulaimani (δεξιά)
Εικόνα 4.1.12 Σύγκριση αναλυτικού μοντέλου με το πειραματικό (Al-Sulaimani) για 10 mm
διάμετρο οπλισμού (αριστερά) και 14 mm διάμετρο οπλισμού (δεξιά)
Εικόνα 4.1.13 Σύγκριση αναλυτικού μοντέλου με το πειραματικό (Lundgren) , δοκίμιο 1#
(αριστερά) και δοκίμιο 2# (δεξιά)
Εικόνα 4.1.14 Σύγκριση αναλυτικού μοντέλου με το πειραματικό (Lundgren) , δοκίμιο 1#
(αριστερά) και δοκίμιο 2# (δεξιά)
Εικόνα 4.1.15 Σύγκριση αναλυτικού μοντέλου με το πειραματικό (Mangat) , δοκίμιο με 1.25%
διάβρωση (αριστερά) και δοκίμιο με διάβρωση 2.5% (δεξιά)
Εικόνα 4.2.1 Μοντέλο έλξης-αποχωρισμού για τη προσομοίωση της μορφής της συνάφειας που
προτείνει το Model Code 2010
Εικόνα 4.2.2 Αποτύπωση των μέτρων δυσκαμψίας του δεσμού χάλυβα σκυροδέματος στις 3
διευθύνσεις n,s,t
Σχήμα 4.2.1 a) Αριστερά στην εικόνα πρόσθιας όψεως φαίνονται οι ρηγματώσεις που οφείλονται
σε αστοχία λόγω διάρρηξης και δεξιά στο (β) πλάγια όψη του μέλους σε αστοχία εξόλκευσης
της ράβδους με ρηγμάτωση κατά το μήκος δεσμού
Σχήμα 5.1 Πρόσθια και πλάγια όψη δοκιμίου φ8/60 με πάχος επικάλυψης 25mm
Εικόνα 5α Διάταξη του πειράματος εξόλκευσης
Εικόνα 5β Συνοριακή Συνθήκη Πάκτωσης στην πρόσθια όψη του δοκιμίου στο ABAQUS 55
Εικόνα 5γ Εφαρμογή του φορτίου μετατόπισης στο ελεύθερο άκρο της ράβδου στο ABAQUS 56
Εικόνα 5.4.1 1 α)Πειραματικό Δοκίμιο 25-S120-1 όψη κάτοψης β) Ρηγμάτωση στην κάτοψη γ)
Ρηγμάτωση στη πίσω όψη δ) Ρηγμάτωση εντός του δοκιμίου σε κεντρική ημιτομή

Εικόνα 5.4.1 2 α)Πειραματικό Δοκίμιο 25-S120-3 όψη κάτοψης β) Ρηγμάτωση στην κάτοψη	γ)
Ρηγμάτωση στη πίσω όψη δ) Ρηγμάτωση εντός του δοκιμίου σε κεντρική ημιτομή	. 73
Εικόνα 5.4.1 3 α)Πειραματικό Δοκίμιο 25-S120-5 όψη κάτοψης β) Ρηγμάτωση στην κάτοψη	γ)
Ρηγμάτωση στη πίσω όψη δ) Ρηγμάτωση εντός του δοκιμίου σε κεντρική ημιτομή	. 74
Εικόνα 5.5.1 Χωρισμός γεωμετρίας σκυροδέματος στο ABAQUS	. 76
Σχήμα 5.5 1 Αποτύπωση της ζώνης πύκνωσης πλέγματος για την προσέγγιση της λύσης στο	
ABAQUS	. 78

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

Σύμβολο	Μονάδα Μέτρησης	Σημασία
σ	Ра	τάση
σ	Ра	αρνητική τάση (θλίψη)
σ_t	Ра	θετική τάση (εφελκυσμός)
$\overline{\sigma}$	Ра	ενεργός τάση
$\overline{\sigma}_{c}$	Ра	ενεργός θλιπτική τάση
$\overline{\sigma}_t$	Ра	ενεργός εφελκυστική τάση
ε	Αδιάστατο	πραγματική παραμόρφωση
$arepsilon^{pl}$	Αδιάστατο	πραγματική πλαστική παραμόρφωση
Del	Ра	ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας με βλάβη
D₀el	Ра	ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας χωρίς βλάβη
$arepsilon^{el}$	Αδιάστατο	ελαστική παραμόρφωση
d	Αδιάστατο	παράμετρος βλάβης
dt	Αδιάστατο	παράμετρος βλάβης σε εφελκυστική φόρτιση
dc	Αδιάστατο	παράμετρος βλάβης σε θλιπτική φόρτιση
ε _t	Αδιάστατο	πραγματική εφελκυστική παραμόρφωση

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν. Υλικών xiv

ε _t ck	Αδιάστατο	πραγματική ανελαστική παραμόρφωση θραύσης
$\varepsilon_t{}^{pl}$	Αδιάστατο	πραγματική πλαστική παραμόρφωση σε εφελκυσμό
ε _c	Αδιάστατο	πραγματική θλιπτική παραμόρφωση
ε _c in	Αδιάστατο	πραγματική ανελαστική παραμόρφωση σε θλίψη
$\varepsilon_c{}^{pl}$	Αδιάστατο	πραγματική πλαστική παραμόρφωση σε θλίψη
$\mathcal{E}_{c}pl^{h}$	Αδιάστατο	πραγματική παραμόρφωση που οφείλεται σε κράτυνση υπό θλιπτική φόρτιση
Etp] ^h	Αδιάστατο	πραγματική παραμόρφωση που οφείλεται σε κράτυνση υπό εφελκυστική φόρτιση
ε_c^{el}	Αδιάστατο	ελαστική θλιπτική παραμόρφωση
$arepsilon_t^{el}$	Αδιάστατο	ελαστική εφελκυστική παραμόρφωση
Eo	Ра	μέτρο ελαστικότητας
σ _{cu}	Ра	μέγιστη θλιπτική τάση σκυροδέματος στο μοντέλο Kent-Park
σ_{to}	Ра	μέγιστη εφελκυστική τάση σκυροδέματος στο μοντέλο Kent-Park
K	Αδιάστατο	συντελεστής που εξαρτάται από την πυκνότητα εγκάρσιας περίσφιγξης
$ ho_s$	%	ογκομετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού στον όγκο του περισφιγμένου πυρήνα του δοκιμίου

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν. Υλικών xv

f_{yh}	Ра	αντοχή σε διαρροή εγκάρσιου οπλισμού
f _{ck}	Ра	χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος
εo	Αδιάστατο	παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση σ
Ζ	Αδιάστατο	κλίση καμπύλης θλιπτικής τάσης- παραμόρφωσης του φθίνοντα κλάδου στο διάγραμμα Kent Park περισφιγμένου πυρήνα σκυροδέματος
b''	mm	πλάτος περισφιγμένου πυρήνα
Sh	mm	απόσταση αναμεταξύ δύο σκελών εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων)
fc	Ра	τάση σκυροδέματος σε θλίψη
fcm	Ра	μέση τιμή θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος
Gf	N/m	ενέργεια θραύσεως σκυροδέματος
G _{fo}	N/m	βασική τιμή ενέργειας θραύσεως
α _F	Αδιάστατο	συντελεστής εξαρτώμενος από το μέγεθος αδρανών για το προσδιορισμό του <i>Gf</i>
ε ₁	Αδιάστατο	εφελκυστική παραμόρφωση σκυροδέματος για σι=0,15σιο
ε _u	Αδιάστατο	εφελκυστική παραμόρφωση σκυροδέματος για τάση σι=0 (μετά τη ρηγμάτωση)
<i>w</i> ₁	mm	πλάτος ρωγμής για σ _t =0,15σ _{to} κατά το Model code 1990

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών xvi

w _u	mm	πλάτος ρωγμής για σι=0 (μετά τη ρηγμάτωση) κατά το Model Code 1990
h	mm	συντελεστής για τη συσχέτιση ανοίγματος ρωγμής με τη παραμόρφωση κατά Bazant
Ecr	Αδιαστατο	παραμόρφωση που αντιστοιχεί στην εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
f _{ct}	Ра	αντοχή σκυροδέματος σε εφελκυσμό
F	Αδιάστατο	συνάρτηση επιφάνειας διαρροής
σ_{bo}	Ра	όριο διαρροής σε διαξονική θλίψη
σ_{c0}	Ра	όριο διαρροής σε μονοαξονική θλίψη
$\widehat{\overline{\sigma}}_{max}$	Ра	μέγιστη Κύρια ενεργός τάση
Кс	Αδιάστατο	Λόγος της 2 ^{ης} αναλλοίωτης του τανυστή τάσεων στο μεσημβρινό εφελκυσμού προς αυτής στο μεσημβρινό θλίψης
G	Ра	μη συσχετισμένο δυναμικό ροής, υπερβολική συνάρτηση κατά Drucker Prager
$\dot{arepsilon}^{pl}$	μ/s	ρυθμός πλαστικής παραμόρφωσης
à	Αδιάστατο	συντελεστής αναλογίας ή παράμετρος συμβατότητας
$\frac{\partial G}{\partial \sigma}$	Αδιάστατο	μερική παράγωγος πλαστικής ροής ως προς τάση και εκφράζει το κάθετο στην επιφάνεια διαρροής μοναδιαίο διάνυσμα
\overline{p}	Pa	υδροστατική τάση

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών xvii

\overline{q}	Ра	ισοδύναμη ενεργός τάση κατά Von Mises
ψ	o	γωνία διαστολικότητας
ε	Αδιάστατο	παράμετρος εκκεντρότητας
μ	Αδιάστατο	Συντελεστής ιξώδους ή βισκοπλαστικός συντελεστής που χρησιμοποιείται στο ABAQUS για να άρει προβλήματα σύγκλισης της λύσης
dv	-	Μεταβλητή υποβάθμισης ιξώδους δυσκαμψίας
η	%	απώλεια μάζας λόγω διάβρωσης
m ₀	kg	μάζα αδιάβρωτου χάλυβα
m _r	kg	απώλεια μάζας χάλυβα λόγω διάβρωσης
b_f	mm	πλάτος διατομής δοκιμίου που διαθέτει διαβρωμένο οπλισμό
b ₀	mm	πλάτος διατομής δοκιμίου που διαθέτει αδιάβρωτο οπλισμό
W _{cr}	mm	ολικό πλάτος ρωγμών στο διαβρωμένο κύλινδρο σκυροδέματος
ε^1	Αδιάστατο	μέση εφελκυστική παραμόρφωση που μετράται στο ρηγματωμένο σκυρόδεμα
X	mm	μέσο βάθος διείσδυσης
ρ	kg/m ³	πυκνότητα
Vr	mm ³	όγκος διαβρωμένης ράβδου χάλυβα

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών xviii

Ar	mm ²	μέση διατομή διαβρωμένου χάλυβα
L	mm	διαβρωμένο μήκος ράβδου
d _r	mm	διάμετρος διαβρωμένου χάλυβα
ГЪ	mm	ακτίνα ράβδου
tr	mm	πάχος στρώματος διαβρωτικών προϊόντων
Ri	mm	ακτίνα μετρούμενη από το κέντρο της ράβδου μέχρι το μέτωπο των ρωγμών σε μερικώς ρηγματωμένο κύλινδρο σκυροδέματος
Rc	mm	ακτίνα μετρούμενη από το κέντρο της αγκυρωμένης ράβδου μέχρι την επικάλυψη του σκυροδέματος
<i>u</i> (<i>r</i>)	mm	συνάρτηση ακτινικής μετατόπισης εξαρτώμενη από την τιμή της ακτίνας r
$arepsilon_{ heta}(r)$	Αδιάστατο	συνάρτηση περιμετρικής παραμόρφωσης εξαρτώμενη από την τιμή της ακτίνας r
E , Es	GPa	μέτρο ελαστικότητας χάλυβα
<i>E</i> _{0.2}	GPa	εφαπτομενικό μητρώο ελαστικότητας στην τάση αναλογίας 0.2%
n (1)	Αδιάστατο	εκθετικός συντελεστής σκλήρυνσης παραμόρφωσης
<u>n</u> (2)	Αδιάστατο	αριθμός ράβδων με διάβρωση
n ⁽³⁾	Αδιάστατο	λόγος όγκου στρώματος διάβρωσης προς τον σίδηρο που καταναλώθηκε

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών xix

ε _{0.2}	Αδιάστατο	παραμόρφωση 0.2%
σ0.01	Ра	τάση χάλυβα που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση 0.01%
$\sigma_{0.2}$	Ра	όριο αναλογίας χάλυβα
$\sigma_{ m u}$	Ра	όριο θραύσεως χάλυβα
fy	Ра	όριο διαρροής χάλυβα οπλισμού
$lpha_{Y}$	Αδιάστατο	εμπειρικός συντελεστής για την απομείωση λόγω διαβρώσεως του ορίου διαρροής του χάλυβα
f_{y0}	Ра	όριο διαρροής χάλυβα χωρίς διάβρωση
f _u	Ра	μειωμένο όριο θραύσης χάλυβα λόγω διάβρωσης
α _u	Αδιάστατο	εμπειρικός συντελεστής για την απομείωση λόγω διαβρώσεως του ορίου θραύσεως του χάλυβα
f _{u0}	Ра	όριο θραύσεως χάλυβα χωρίς διάβρωση
Eu	Αδιάστατο	παραμόρφωση διαβρωμένου χάλυβα που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση
α1	Αδιάστατο	εμπειρικός συντελεστής για την μείωση της επιμήκυνσης του χάλυβα λόγω διαβρώσεως στο όριο θραύσεως
ε_0	Αδιάστατο	παραμόρφωση αδιάβρωτου χάλυβα που αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση

E _{corr}	Ра	μειωμένο μέτρο ελαστικότητας λόγω διάβρωσης
ΔW_{max}	mm	μέγιστο βάθος διείσδυσης διάβρωσης
Knn	N/mm ³	Συντελεστής δυσκαμψίας για το μοντέλο έλξης αποχωρισμού στη διεύθυνση n
Kss	N/mm ³	Συντελεστής δυσκαμψίας για το μοντέλο έλξης αποχωρισμού στη διεύθυνση s
Ktt	N/mm ³	Συντελεστής δυσκαμψίας για το μοντέλο έλξης αποχωρισμού στη διεύθυνση t
δ_s	mm	Σχετική μετατόπιση της πάνω επιφάνειας με τη κάτω στη διεύθυνση s
δ_t	mm	Σχετική μετατόπιση της πάνω επιφάνειας με τη κάτω στη διεύθυνση t
δ_n	mm	Σχετική μετατόπιση της πάνω επιφάνειας με τη κάτω στη διεύθυνση n
tn	Ра	ελκυστής στη διεύθυνση n
t _t	Ра	ελκυστής στη διεύθυνση t
ts	Ра	ελκυστής στη διεύθυνση s
$ au_b$	Ра	τάση συνάφειας
τ _{bmax}	Ра	μέγιστη τάση συνάφειας που μπορεί να αναπτυχθεί με βάση το Model Code 2010
S	mm	μεταβλητή ολίσθησης
<i>s</i> ₁	mm	τιμή ολίσθησης όταν αναπτυχθεί μέγιστη τάση συνάφειας

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών xxi

α	Αδιάστατο	συντελεστής για το σχήμα της καμπύλης τάση συνάφεια – ολίσθηση που προτείνει το Model Code 2010
f _{stm}	Ра	μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στο χάλυβα κατά τη δοκιμή εξόλκευσης
Ø	mm	διάμετρος
C _{min}	mm	ελάχιστη απόσταση εγκάρσιου οπλισμού από την επικάλυψη σκυροδέματος
c _{max}	mm	μέγιστη απόσταση εγκάρσιου οπλισμού από την επικάλυψη σκυροδέματος
l _b	mm	μήκος δεσμού ή αλλιώς μήκος αγκύρωσης ράβδου
k _m	Αδιάστατο	συντελεστής εξαρτώμενος από τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες των εγκάρσιων οπλισμών
K _{tr}	Αδιάστατο	πυκνότητα εγκάρσιου οπλισμού κατά το Model Code 2010
δ_{evol}	mm	ολίσθηση κατά την οποία χάνεται πλήρως η συνεκτική έλξη συνάφειας
δ_{init}	mm	ολίσθηση κατά την οποία αρχίζει η απώλεια συνεκτικής έλξεως συνάφειας
Fmax	N	μέγιστη δύναμη που αναπτύσσεται στο χάλυβα κατά τη δοκιμή εξόλκευσης
Fb	N	δύναμη που αναπτύσσεται στο χάλυβα κατά τη δοκιμή εξόλκευσης

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών xxii

fbd,cor	Ра	μέση Τάση συνάφειας διαβρωμένου δοκιμίου
fbd,non-cor	Ра	μέση τάση συνάφειας αδιάβρωτου δοκιμίου

(1): Αναφέρεται στο Κεφάλαιο 3.1 στο μοντέλο χάλυβα

(2): Αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.2.2 στον αριθμό διαβρωμένων ράβδων

(3): Αναφέρεται στο Κεφάλαιο 2.2.2 στο λόγο διαβρωτικών προϊόντων προς το Fe που καταναλώθηκε

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών xxiv

προλογος

Η σπουδαστική εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Χάρη Αποστολόπουλου και υπό την καθοδήγηση και βοήθεια του διδάκτορα Πολιτικού μηχανικού Κωνσταντίνου Κουλούρη, τους οποίους και ευχαριστώ ιδιαίτερα για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν αλλά και για την πολύτιμη συνεισφορά τους στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας. Τέλος, δεν μπορώ να μην εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου που με στήριξαν με κάθε τρόπο όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν. Υλικών xxv

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗΙν
ABSTRACTVI
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝΧ
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝΧΙ
ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙΧΙΥ
ΠΡΟΛΟΓΟΣΧΧΥ
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑΧΧΥΙ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ1
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ2
1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
2.1 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΒΛΑΒΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (CDP)8
2.1.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ15
2.1.3 ΝΟΜΟΣ ΚΡΑΤΥΝΣΗΣ16
2.1.4 ΝΟΜΟΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ17
2.1.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΞΩΛΟΥΣ19
2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ 20
2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ
2.2.2 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΛΑΒΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ 21
2.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΡΩΓΜΩΝ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΑΛΥΒΑ
3.1 МН ГРАММІКО МОЛТЕЛО ХАЛУВА 29
3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΑ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ MODEL CODE 2010 ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ
ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ
4.1 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ -ΒΙΒΛΙΟΦΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ
4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ MODEL CODE 2010 47
ΚΕΨΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΙΕΛΕΖΜΑΙΑ ΜΟΝΙΕΛΟΠΟΙΗΖΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ΑΒΑQUS
5.1 KATAZKE YAZITIKA ZI UTAETA AUKTIVITSZN
5.2 AIAAIKAZIA PABAUY EEUAKEYZHZ (PULL UUT TESTS)
5.5 AHUTEALIMATA ME BAZH TU MUDEL CUDETTA AUKIMIA ME EERADSIO OHAISMO (#9/120MM) RATVODIS EERADSIO OHAISMO
EI KAPZIU UIIAIZMU (40/120000) KAI X22PIZ EI KAPZIU UIIAIZMU
5.5.1 UALUHLH (SLIP)
5.4 ZYI KYIZH KAWIIIYAS2N HEHEPAZWENS2N ZIUIXEIS2N WE HZ
ПЕЛГАМА ПКЕД
5.4.1 A±IUAUI H∠H TPUII\2N A∠TUAIA2 AUKIMI\2N

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών xxvi

5.5 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ	
ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	. 79
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	79
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ	81
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	82

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί ένα σύγχρονο τεχνολογικά σύνθετο υλικό που απαντάται στην πλειονότητα των κτηριακών εγκαταστάσεων και κατασκευών γύρω μας. Αποτελεί μίγμα αδρανών υλικών τσιμέντου και νερού, ενώ ο όρος οπλισμένο αφορά την ίνα χάλυβα που εισάγεται για να ενισχύσει τη μακρομηχανική συμπεριφορά του συνθέτου σε παραλαβή μεγαλύτερων εφελκυστικών φορτίων. Όντας το δημοφιλέστερο δομικό υλικό με ευρεία χρήση αφού είναι ιδανικό για κατασκευή ουρανοξυστών, γεφυρών, σπιτιών ή οποιουδήποτε άλλου τύπου κτηρίου απαιτείται, λόγω των καλών ιδιοτήτων εργασιμότητας, πλαστιμότητας αντοχής, αποδόσεως καλής σχέσεως κόστους προς παρεχόμενες ιδιότητες κ.α. Ενδεικτικά και μόνο, η ευρεία χρήση του φαίνεται από την ετήσια παραγωγή τσιμέντου παγκοσμίως για το 2020 όπου υπολογίζεται σε παραπάνω από 4 δισεκατομμύρια τόνους [50]. Επίσης οι αδυναμίες των συνεργαζόμενων υλικών γάλυβα-σκυροδέματος αλληλοεπικαλύπτονται μεταξύ τους. Το σκυρόδεμα από μόνο του παρά τη μεγάλη του θλιπτική αντοχή δεν διαθέτει σχεδόν καθόλου εφελκυστική αντοχή, για αυτό εισάγονται ενισχυτικά ίνες χάλυβα που αντέχουν σε εφελκυσμό και κάνουν το υλικό ικανό για παραλαβή όλων των ειδών τις φορτίσεις. Ο εγκιβωτισμένος χάλυβας με τη σειρά του, επιρρεπής σε διαβρωτικές ουσίες τυγχάνει της προστασίας της επικαλύψεως που του παρέχει το περιβάλλον σκυρόδεμα. Ωστόσο οι σχεδιαστικές προδιαγραφές διαφόρων κατασκευαστικών προτύπων και κανονισμών ανά το κόσμο είναι συχνά ανεπαρκείς ως προς την ανθεκτικότητα και την αντοχή των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και ειδικά της συνάφειας ,όταν προσβάλλεται από διαβρωτικούς παράγοντες, με άμεσο επακόλουθο την ενθάρρυνση προς περαιτέρω επιστημονική ερεύνα για τις ιδιότητες του σύνθετου αυτού υλικού υπό επιβαρυντικά περιβάλλοντα. Το μειονέκτημα αυτό του χάλυβα, της μειωμένης του αντίστασης στην οξείδωση είναι ο υπ' αριθμόν ένα παράγοντας υποβάθμισης των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος.

Η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού είναι αναπόφευκτο φαινόμενο και η μείωση εν συνεχεία της διάρκειας ζωής της κατασκευής. Ειδικά σε κατασκευές παράκτιων περιοχών, λόγω της υψηλής συγκέντρωσης χλωριόντων (ιόν χλωρίου Cl) ή σε περιοχές όπου η συγκέντρωση αερομεταφερόμενων γλωριόντων είναι σημαντική, καθώς αποτελεί το δυσμενέστερο είδος διάβρωσης του σιδηρο-οπλισμού. Συνδυαστικά με την υψηλή θερμοκρασία, διευκολύνεται η διείσδυση και εισχώρηση των ιόντων μέσω των πόρων βαθύτερα στην επικάλυψη του σκυροδέματος φτάνοντας στις ράβδους ενίσχυσης της κατασκευής. Ο λόγος της υποβάθμισης αυτής αφορά την επίδραση που έχει η διάβρωση όχι μόνο στη μείωση της διατομής της ράβδου άλλα κυρίως στη μείωση της δύναμης δεσμού (συνάφεια) μεταξύ των δύο φάσεων του συνθέτου υλικού που είναι διαρκής και συνεγόμενη καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής. Παρόλο που η μεταφορά δυνάμεων από το ένα υλικό στο άλλο καθίσταται ολοένα και μικρότερη λόγω μείωσης της αντοχής συνάφειας, η προσβολή του σκυροδέματος είναι και αυτή άμεση. Με τη καταστροφή της χημικής πρόσφυσης των δύο υλικών και το σχηματισμό των διογκωτικών προϊόντων διάβρωσης, οι ήδη προσβαλλόμενες με τη σειρά τους νευρώσεις του γάλυβα σε αργικά στάδια διάβρωσης, αναλαμβάνουν μέσω μηγανικής εμπλοκής με το σκυρόδεμα τα εφελκυστικά φορτία ,που όμως στη μία πλευρά το αναγκάζουν να συνθλιβεί περαιτέρω ενώ στην άλλη σχηματίζουν ακτινικές εφελκυστικές ζώνες οδηγώντας το σε αστοχία με σχηματισμό αρχικά μικρορωγμών και αργότερα ρωγμών διάρρηξης. Το φαινόμενο αυτό, που στη πραγματικότητα είναι πιο σύνθετο από ότι περιγράφεται, γίνεται εντονότερο και συνεχίζει με πιο πολύπλοκο μηγανισμό ως τη τελική αστογία της συνάφειας μέσω εξόλκευσης των ινών ή με ρωγμές διάρρηξης του σκυροδέματος ή με συνδυασμό και των δύο. Η βλάβη που προκαλεί η σωρευτική δράση της διάβρωσης επιδρά στη δυσκαμψία της κατασκευής, την ολκιμότητα του οπλισμού ,την δυνατότητα παραμόρφωσης και στις αγκυρώσεις των ράβδων μεταξύ των δοκών ή των υποστυλωμάτων και συνολικά στην στατική επάρκεια και δομική ακεραιότητα της κατασκευής.

Επομένως λόγω της ύπαρξης κατασκευών και έργων υποδομής σε παγκόσμια κλίμακα ,που πλησιάζουν ή που έχουν ήδη ξεπεράσει το συμβατικό όριο αντοχής τους, η ανάγκη για αξιόπιστα μοντέλα πρόβλεψης αντοχής των κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος και μεθόδους επιδιόρθωσης λόγω της φυσικής φθοράς με το πέρας του χρόνου είναι αυξημένη.

1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η συνάφεια είναι ο μηγανισμός μεταφοράς δυνάμεων από το σκυρόδεμα στην ίνα του γάλυβα και το αντίστροφο. Η σημαντικότητα διερεύνησης της έχει παρατηρηθεί τα τελευταία χρόνια με την εισαγωγή νέων κατηγοριών χάλυβα οπλισμού και την εισαγωγή νέων τύπων τσιμέντων και πρόσμικτων ουσιών επηρεάζοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά και λεπτομέρειες κατασκευής των σύγχρονων κτηριακών δομών. Η κατανόηση της συμπεριφοράς της συνάφειας και μάλιστα υπό την επίδραση της διάβρωσης που είναι κύριος παράγοντας υποβάθμισης των κατασκευών σε παράκτιες περιοχές, οδηγούν σε αναθεώρηση και επανασύνταξη των ισχυόντων κανόνων και κανονιστικών προτύπων. Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη μοντέλου με τη βοήθεια πεπερασμένων στοιχείων για την αποτίμηση ή καλύτερα πρόβλεψη της υπολειπόμενης αντοχής συνάφειας διαβρωμένου γάλυβα-σκυροδέματος. Το 3D μοντέλο πεπερασμένων στοιγείων που αναπτύχθηκε με το ABAQUS προβλέπει την συμπεριφορά τάσης συνάφειας - ολίσθησης διαβρωμένων ράβδων χάλυβα εγκιβωτισμένων σε σκυρόδεμα και επικυρώνεται η ισχύς του με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας [9]. Η υλοποίηση του έγινε βασιζόμενο στις οδηγίες του Model Code 2010 για την εκτίμηση της αντοχής συνάφειας υπό γνωστή διάβρωση του οπλισμού και μοντελοποιήθηκαν και οι επιπτώσεις της υποβάθμισης ξεγωριστά για το σκυρόδεμα, το χάλυβα και το δεσμό αυτών, μέσω αναλυτικού τρόπου της ανοιχτής βιβλιογραφία για κάθε βλάβη ξεχωριστά. Εξετάζονται και οι μορφές αστοχίας των προσομοιωμένων δοκιμίων και συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα. Σύντομη αναφορά γίνεται στο επίπεδο της διεθνούς βιβλιογραφίας πάνω στο θέμα της ανάπτυξης μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων για τη συμπεριφορά των κατασκευών Ο/Σ υπό καθεστώς διάβρωσης.

$1.3 \, \Delta IAP\Theta P\Omega \Sigma H \, EP\Gamma A \Sigma IA \Sigma$

Στο **Κεφάλαιο 1** παρέχει εισαγωγικές πληροφορίες πάνω στο θέμα της εργασίας για την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία των εργαστηριακών δοκιμίων [9] ,μαζί με το σκοπό και τη διάρθρωση της εργασίας

Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζεται αναλυτικά η μοντελοποίηση που λήφθηκε υπόψιν όσον αφορά το σκυρόδεμα για τη περιγραφή της μηχανικής του συμπεριφοράς στην ελαστική και πλαστική

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν. Υλικών 3

περιοχή μαζί με σημαντικά κομμάτια ως προς την υλοποίηση αυτού που έπρεπε να τονιστούν. Στα σημαντικά αυτών συγκαταλέγονται συνοπτικά θεωρητικές έννοιες που υπάρχουν στο ABAQUS για τη μηχανική της βλάβης του σκυροδέματος καθώς και η προσέγγιση της συμπεριφοράς σε εφελκυσμό και θλίψη κάτω από συνθήκες διάβρωσης και μη. Επιπρόσθετα παρουσιάζεται και ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού της βλάβης της διάβρωσης στο σκυρόδεμα και συγκρίνεται η αντοχή του άοπλου με το οπλισμένο σκυρόδεμα ,αφού πρόκειται να σχολιασθούν στα αποτελέσματα της εργασίας οι επιδράσεις που έχουν στην απόκριση της συνάφειας.

Στο **Κεφάλαιο 3**, συνεχίζεται η περιγραφή της μηχανικής συμπεριφοράς του χάλυβα οπλισμού B500c που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση των δοκιμίων (κεφάλαιο 5). Για τη περιγραφή του καταστατικού νόμου του χάλυβα, οι τιμές τάσης παραμόρφωσης σε ελαστική και πλαστική περιοχή έγινε σύμφωνα με το μοντέλο Rasmussen και εκτιμήθηκαν με βάσει άλλη εργασία, οι υποβαθμισμένες μηχανικές ιδιότητες λόγω διάβρωσης όπως το όριο διαρροής ,το όριο θραύσεως, το μέτρο ελαστικότητας και η παραμόρφωση θραύσεως.

Στο **Κεφάλαιο 4**, αρχικά γίνεται μια μικρή εισαγωγή για τη συνάφεια χάλυβα-σκυροδέματος και μια βιβλιογραφική ανασκόπηση της προγενέστερης εργασίας που υπάρχει για τη πειραματική μελέτη και μελέτη πρόβλεψης με πεπερασμένα στοιχεία της τάσης συνάφειας προς ολίσθηση. Στη συνέχεια ολοκληρώνεται η περιγραφή της μοντελοποίησης, με την εξήγηση του τρόπου που διατίθεται στο ABAQUS (έναν από τους τρόπους που διατίθενται) για τη σχέση επαφής που αναπτύσσεται μεταξύ των δύο επιφανειών των δύο συνεργαζόμενων υλικών χάλυβα και σκυροδέματος. Αυτή η σχέση συνάφειας, προήλθε από τη μελέτη του Model Code για τη περίπτωση και διαβρωμένου οπλισμού και προέκυψαν τα μεγέθη για το διγραμμικό μοντέλο έλξης αποχωρισμού των δύο επιφανειών με τροποποιήσεις για κάθε δοκίμιο με διαφορετικό βαθμό διάβρωσης.

Στο **Κεφάλαιο 5** γίνεται μια αναφορά στα κατασκευαστικά στοιχεία των δοκιμίων και των πειραμάτων εξόλκευσης που πρόκειται να προσομοιωθούν και ακολουθεί η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των παραμέτρων που εισάγονται στο ABAQUS μαζί με τα αποτελέσματα δύναμης και ολίσθησης. Γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων σε όρους τάσης, δύναμης και ολίσθησης για τη περίπτωση περίσφιγξης και μη των προσομοιωμένων δοκιμίων με τα αντίστοιχα πειραματικά. Ακολουθεί η κοινή απεικόνιση των καμπυλών τάσης-ολίσθησης της πειραματικής καμπύλης και της αντίστοιχης που προέκυψε από τα πεπερασμένα στοιχεία ενώ το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με σχολιασμό των τρόπων αστοχίας των δοκιμίων.

Στο **Κεφάλαιο 6** συνοψίζονται τα συμπεράσματα της ανάλυσης και της παρούσας εργασίας μαζί με παρατηρήσεις και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών 6

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η εισαγωγή του αναγνώστη σε ορισμένα σημεία της πλαστικής θεωρίας του σκυροδέματος, ώστε να κατανοηθούν έννοιες και παράμετροι επιρροής της μηχανικής συμπεριφοράς του. Δεδομένου ότι κατά την ανάπτυξη του μηχανισμού συνάφειας χάλυβα – σκυροδέματος, εμφανίζονται φαινόμενα βλάβης και διάρρηξης στο σκυρόδεμα, παρουσιάζεται το μοντέλο προσομοίωσης της ελαστο-πλαστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος, το οποίο επιλέχθηκε για την αναλυτική προσομοίωση πειραματικών δοκιμών εξόλκευσης (Pull out tests).

Αρχικά, υιοθετείται μη γραμμική ανελαστική ανάλυση, η οποία στο πρόγραμμα Abaqus διακρίνεται και εκφράζεται μέσω:

- μη γραμμικότητας γεωμετρίας και
- μη γραμμικότητας υλικού.

Η μη γραμμικότητα της γεωμετρίας (NLgeom) λαμβάνει υπόψη τις μετατοπίσεις και τις περιστροφές όταν είναι σημαντικές και επιδρούν στην απόκριση του πεδίου που εξετάζεται. Δεδομένου ότι στις δοκιμές εξόλκευσης της χαλύβδινης ράβδου από το σκυρόδεμα οι παραμορφώσεις και οι μετατοπίσεις είναι σημαντικές και παρατηρείται τοπικά διάρρηξη του σκυροδέματος, οι παραμορφώσεις αυτές λαμβάνονται υπόψη μέσω κατάλληλης εντολής. Η ενεργοποίησή της γίνεται με την επιλογή του αντίστοιχου κελιού στις ρυθμίσεις STEP.

Η μη γραμμικότητα του υλικού αφορά το στάδιο που ακολουθεί μετά τη γραμμική ελαστική περιοχή Hooke, όπου η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε θλίψη και εφελκυσμό έχει περάσει στην πλαστική περιοχή. Συνεπώς πρέπει να ληφθούν υπόψιν και οι δύο περιοχές (ελαστική + πλαστική) και η συμπεριφορά μετά την (μέγιστη τάση) αντοχή του υλικού σε θλίψη και εφελκυσμό. Η σχέση μεταξύ παραμορφώσεων (ε) και τάσεων (σ) του υλικού δηλαδή ο καταστατικός νόμος του σκυροδέματος που πειραματικά έχει εξαχθεί και προτείνεται σε διεθνείς κανονισμούς όπως ο Ευρωκώδικας 2 [10], το CEB-FIP Model Code 2010 [20] κ.α. πρέπει να ορισθεί και να δοθεί στο ABAQUS. Για την ανάλυση που πραγματοποιείται επιλέγεται το μοντέλο Kent & Park [13] που παίρνει υπόψιν του και την περίπτωση ύπαρξης περίσφιγξης λόγω εγκάρσιου οπλισμού (συνδετήρων) ανεξάρτητα από τη συμπεριφορά του άοπλου σκυροδέματος εφόσον τα δοκίμια που μοντελοποιούνται, κάποια διαθέτουν εγκάρσια περίσφιζη.

Η ελαστική περιοχή ορίζεται εύκολα με εισαγωγή του μέτρου ελαστικότητας *Ec* του σκυροδέματος και του λόγου εγκάρσιας παραμόρφωσης Poisson *v*. Σε ότι αφορά την πλαστική περιοχή υπάρχουν τρεις τεχνικές για να υλοποιηθεί η εισαγωγή των δεδομένων:

- SC-Smeared Cracking Model
- CDP-Concrete Damage Plasticity Model
- Brittle Cracking Model

Από τα τρία διαθέσιμα μοντέλα που παρέχει το πακέτο πεπερασμένων στοιχείων προτιμήθηκε το δεύτερο (CDP). Στο μοντέλο αυτό γίνεται θεώρηση του σκυροδέματος ως ελαστικού ισότροπου υλικού και με ισότροπη πλαστική συμπεριφορά σε θλίψη και εφελκυσμό. Υιοθετεί δύο βασικούς μηχανισμούς αστοχίας, την αστοχία με βάση τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, και την αστοχία σύνθλιψης με βάση την μέγιστη τιμή θλιπτικής τάσης. Μπορεί να εφαρμοστεί σε άοπλο και οπλισμένο σκυρόδεμα κάτω από φορτία μονοαξονικά, ανακυκλιζόμενα και δυναμικά, υπολογίζοντας πιθανά σημεία έναρξης ρωγμών και μετέπειτα διάδοσης τους στο υλικό. Οι πηγές άντλησης των πληροφοριών σχετικά με την προτεινόμενη ανάλυση του σκυροδέματος είναι οι αναφορές της βιβλιογραφίας [1],[12],[34].

2.1 ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΒΛΑΒΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (CDP)

Στο εγχειρίδιο Abaqus, αναφέρεται ότι η τεχνική-μοντέλο CDP [1],[12],[6],[11] χρησιμοποιεί μια παραλλαγή του Drucker-Prager ,το οποίο έχει τροποποιηθεί από τους Lubliner et. al. [14], και με πρόσθετες τροποποιήσεις που πρότεινε ο Lee και Fenves [15]. Για τη διατύπωση της βλάβης του σκυροδέματος με προσέγγιση ισότροπης ελαστικότητας με βάση το εγχειρίδιο Abaqus αναφέρουμε αρχικά τις εξής σχέσεις για τις παραμορφώσεις και τις τάσεις:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^{pl} \tag{2.1-1}$$

$$\sigma = Del: (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \tag{2.1-2}$$

$$\bar{\sigma} = D_0 el: (\varepsilon - \varepsilon^{pl}) \tag{2.1-3}$$

Опоυ $Del = (1 - d)D_oel$

Η παράμετρος D_oel είναι το ελαστικό μητρώο δυσκαμψίας χωρίς βλάβη ενώ το Del είναι το μητρώο δυσκαμψίας που έχει υποστεί βλάβη που εξαρτάται από την παράμετρο βλάβης d. Η πραγματική τάση συμβολίζεται με σ ενώ με $\overline{\sigma}$ (effective stress) συμβολίζεται η ισοδύναμη ή ενεργός τάση που αφορά τις τάσεις όταν το υλικό έχει υποστεί βλάβη. Ο καταστατικός νόμος του

Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν. Υλικών 8

Ή

$$\sigma = (1 - d)\bar{\sigma} = (1 - d_c)\bar{\sigma}_c + (1 - d_t)\bar{\sigma}_t$$
(2.1-4)

$$\sigma_t = (1 - d_t) \cdot E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t ck) \tag{2.1-5}$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) \cdot E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c in) \tag{2.1-6}$$

Όπου d_t, d_c είναι βαθμωτά μεγέθη με πεδίο τιμών το [0,1], για τη περίπτωση εφελκυσμού και θλίψης ξεχωριστά. Η τιμή «0» αφορά την κατάσταση που δεν υπάρχει βλάβη ενώ η τιμή «1» τη κατάσταση ολοκληρωτικής βλάβης. Οι παράμετροι βλάβης και οι ισοδύναμες τάσεις υπολογίζονται εύκολα με τις εξής σχέσεις:

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{cu}} \tag{2.1-7}$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{\sigma_{to}} \tag{2.1-8}$$

Με σ_{cu} αντοχή θλίψης και σ_{to} αντοχή εφελκυσμού και σ_c και σ_t τις τάσεις που ακολουθούν τις καμπύλες αποφόρτισης σε θλίψη και εφελκυσμό αντίστοιχα. Στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν και άλλες σχέσεις για τις παραμέτρους βλάβης όπως βάσει μειούμενης δυσκαμψίας και παραμορφώσεων.

$$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-dc)} = E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{\ pl}) \tag{2.1-9}$$

$$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-dt)} = E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$$
(2.1-10)

Οι παράμετροι βλάβης πρέπει να δοθούν από το χρήστη ενώ οι ισοδύναμες τάσεις υπολογίζονται από το πρόγραμμα αφού δοθούν οι τάσεις *σ*^c και *σ*^t, και οι παραμορφώσεις *ε*^c *ε*^t.

Συνεχίζοντας τη παρουσίαση της ανάλυσης, δίδεται ο ορισμός των ανελαστικών παραμορφώσεων για τα στάδια της κράτυνσης (hardening) και της χαλάρωσης (softening) σε θλίψη και εφελκυσμό. Το ABAQUS χρησιμοποιεί τον όρο ανελαστική παραμόρφωση ε_cin (inelastic strain) για τη περιγραφή της θλίψης στα στάδια μετά τη διαρροή. Ενώ σε εφελκυσμό ο αντίστοιχος όρος είναι παραμόρφωση ρηγμάτωσης $\varepsilon_t ck$ (cracking strain). Στη πραγματικότητα δεν είναι κάτι άλλο παρά παραμένουσες πλαστικές παραμορφώσεις σε θλίψη και εφελκυσμό. Ο όρος ανελαστική παραμόρφωση περιλαμβάνει την πλαστική παραμόρφωση λόγω βλάβης αν υπάρχει (αν είμαστε σε καμπύλη αποφόρτισης
τότε υπολογίζεται). Στον εφελκυσμό δεν υπάρχει πρακτικά πλαστική παραμόρφωση λόγω κράτυνσης οπότε ο όρος *ειpl^h* αφορά μόνο την πλαστική παραμόρφωση λόγω βλάβης.

Επιπρόσθετα στο οπλισμένο σκυρόδεμα η διατύπωση της καμπύλης αποφόρτισης σε εφελκυσμό και θλίψη, δηλαδή ο κατιών κλάδος που ακολουθεί την μέγιστη αντοχή (σιο, σ_{cu} αντίστοιχα), σημαίνει να δίδεται η τάση ως συνάρτηση της πλαστικής παραμόρφωσης βλάβης *ειck* και *εcin* αντίστοιχα. Οι παραμορφώσεις *ειck* και *εcin* υπολογίζονται από τις σχέσεις 2.1-10 και 2.1-11 αντίστοιχα και πρέπει και αυτά τα δεδομένα να δοθούν στο πρόγραμμα ABAQUS.

$$\varepsilon_t ck = \varepsilon_t - \varepsilon_t^{el} \tag{2.1-10}$$

$$\varepsilon_c in = \varepsilon_c - \varepsilon_c^{el} \tag{2.1-11}$$

Με $\varepsilon_c^{el} = \sigma_c / Eo$ και $\varepsilon_t^{el} = \sigma_t / Eo$.

Τα επόμενα δύο διαγράμματα (Σχήμα 2.1.2) απεικονίζουν τη συμπεριφορά του υλικού και αποτυπώνονται οι σχέσεις που παρουσιάσθηκαν προηγουμένως.



Σχήμα 2.1.1 Συμπεριφορά σκυροδέματος υπό μονοαζονική φόρτιση σε α) εφελκυσμό στα αριστερά β) θλίψη στα δεξιά

Τα επόμενα υποκεφάλαια καλύπτουν το τρόπο με τον οποίο προσεγγίστηκαν όλα τα άγνωστα μεγέθη που πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την επαρκή μοντελοποίηση του σκυροδέματος.

2.1.1.1 ΜΟΝΤΕΛΟ ΘΛΙΨΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΕΝΤ & PARK

Υπό την απουσία πειραματικών δεδομένων τάσης (σ_c) προς παραμόρφωση (ε_c) πολλοί ερευνητές έχουν προτείνει μοντέλα συμπεριφοράς απερίσφιγκτου και περισφιγμένου σκυροδέματος ώστε να χρησιμοποιούνται απευθείας χωρίς να πρέπει να γίνεται κάθε φορά που απαιτείται πειραματική εκτίμηση. Η καμπύλη τάσεων παραμορφώσεων που προτάθηκε από Soliman & Yu [48] εικονίζεται στο Σχήμα (2.1.1.1). Αποτελείται από μια παραβολή και δύο ίσιες γραμμές με τις τάσεις και τις παραμορφώσεις στα κρίσιμα σημεία αλλαγής των καμπυλών να εξαρτώνται από το ποσοστό σε εγκάρσιο οπλισμό και τις αποστάσεις μεταξύ των συνδετήρων και τον περισφιγμένο πυρήνα. Ο Sargin [49] πρότεινε μια γενική εξίσωση συμπεριφοράς υπό μονοαξονική θλίψη που δίνει συνεχή συνάρτηση τάσεων παραμορφώσεων, εξαρτώμενη από ποσοστό και πυκνότητα εγκάρσιου οπλισμού, αντοχή σκυροδέματος και αντοχή σε διαρροή για το χάλυβα εγκάρσιου οπλισμού (Σχήμα 2.1.1.2).





Σχήμα 2.1.1.1 Μοντέλο Soliman &Yu

Σχήμα 2.1.1.2 Μοντέλο Sargin

 $\geq \epsilon_c$

Στη βάση προηγούμενων πειραματικών αποτελεσμάτων οι Kent & Park διεξήγαγαν μία συγκεντρωτική συγκριτική μελέτη και πρότειναν το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην σπουδαστική εργασία και παρουσιάζεται στο Σχήμα (2.1.1.3).Η σχέση που προτάθηκε αποτελείται από μια παραβολή στον ανοδικό κλάδο που ακολουθείται από μια καμπύλη γαλάρωσης γραμμικού τύπου .Οι σχέσεις (2.1.1.1-1 έως 2.1.1.1-6) είναι αυτές που περιγράφουν το τροποποιημένο μοντέλο Kent & Park [13] που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της πραγματικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος.





$$K = 1 + \frac{\rho_s f_{yh}}{fck} \tag{2.1.1.1-1}$$

$$\varepsilon_0 = 0,002K$$
 (2.1.1.1-2)

$$f'' = K \cdot f_{ck} \tag{2.1.1.1-3}$$

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3+0.29f_{ck}}{145f_{ck}-1000} + \frac{3}{4}\sqrt{\frac{b''}{s_h}} - 0,002K}$$
(2.1.1.1-4)

Όπου :

- $f_{ck}=f'$ για την αντοχή του σκυροδέματος
- *ρs*: ογκομετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού
- *f_{vh}* :αντοχή διαρροής για τον εγκάρσιο οπλισμό
- Κ: συντελεστής που εξαρτάται από την πυκνότητα εγκάρσιας περίσφιγξης
- b'':πλάτος περισφιγμένου πυρήνα
- s_h: απόσταση μεταξύ συνδετήρων

Για τον ανερχόμενο κλάδο η παραβολή δίνεται από τη σχέση :

$$f_c = f'' \left[\frac{2\varepsilon c}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \qquad \qquad \gamma \iota \alpha \varepsilon < \varepsilon_0 \qquad (2.1.1.1-5)$$

Για τον φθίνοντα κλάδο η γραμμική σχέση τάσης προς παραμόρφωση δίνεται από:

$$f_c = f''[1 - Z(\varepsilon_c - \varepsilon_0)] \qquad \text{ fig } \varepsilon > \varepsilon_o \qquad (2.1.1.1-6)$$

Με βάση αυτό το μοντέλο υπολογίστηκαν οι τάσεις σ_c , $\bar{\sigma}_c$ και οι παραμορφώσεις ε_c , $\varepsilon_c in$ που χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για τον υπολογισμό των παραμέτρων βλάβης d_c ,που απαιτεί το Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών 12

ABAQUS. Συνεπώς λήφθηκαν υπόψιν και οι διαφορετικές παράμετροι των δοκιμίων όπως ποσοστό και πυκνότητα εγκάρσιου οπλισμού *ρs*, *sh*, διαφορετικό πάχος επικάλυψης σκυροδέματος *c* και η αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη *fck*. Στο επόμενο κεφάλαιο εξηγούνται τα αντίστοιχα για τη συμπεριφορά σε εφελκυσμό.

2.1.1.2 ΤΡΙΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό εφελκυσμό, για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν, καλύπτεται από το τριγραμμικό μοντέλο της εργασίας [45].Βέβαια και εδώ η πληθώρα των υπαρχόντων μοντέλων για τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι μεγάλη ,εντούτοις επιλέχθηκε το τριγραμμικό μοντέλο της καμπύλης (Σχήμα 2.1.1.2.1) που προτείνεται στις εργασίες [46],[45],[20] ανάμεσα από το διγραμμικό και το γραμμικό-εκθετικό μοντέλο (γραμμικό στην ελαστική περιοχή, εκθετικό στη περιοχή χαλάρωσης).

Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων που εικονίζονται στο Σχήμα 2.1.1.2.1,πρέπει να είναι γνωστή η ενέργεια θραύσεως *G_f* [41], το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος *Ec* και η αντοχή σε εφελκυσμό *f_{ct}*. Η ενέργεια θραύσεως προσεγγιστικά για σκυρόδεμα μεσαίας αντοχής δίνεται από τη σχέση του CEP FIB Model Code 2010:

$$G_f = 73(f_{cm})^{0.18} \tag{2.1.1.2-1}$$

Όπου $f_{cm}=f_{ck}+8$

Ή αν είναι γνωστό το μέγιστο μέγεθος των αδρανών μέσω της σχέσης:

$$G_f = G_{f_0} \left(\frac{fcm}{f_{cm_0}}\right)^{0.7}$$
(2.1.1.2-2)

Και βάσει του Πίνακα 2.1.1 [19] :

Πίνακας 2.1.1 Ενέργεια Θραύσεως βάσει μεγέθους αδρανών από CEP-FIB Model Code 1990

Μέγ. Μέγεθος Αδρανών	G _{Fo} (N/mm)	a_F
<i>(mm)</i>		
8	0.025	8
16	0.03	7
32	0.058	5

Οι παραμορφώσεις ε_u και ε₁, προσδιορίζονται από τις σχέσεις :

$$\varepsilon_1 = \frac{w_1}{h}$$
 (2.1.1.2-3)

$$\varepsilon_u = \frac{w_u}{h} \tag{2.1.1.2-4}$$

Με τα w1, wu να υπολογίζονται ως εξής:



Σχήμα 2.1.1.2.1 Τριγραμμικό μοντέλο εφελκυσμού σκυροδέματος

Η παραμόρφωση ε_{cr} δίνεται από το λόγο f_{ct}/E_o . Το f_{ct} προσδιορίζεται από την εξής σχέση που προτείνεται στο Model Code 2010 [20]:

$$f_{ct} = 0.3(f_{ck})^{(2/3)} \tag{2.1.1.2-7}$$

Ολοκληρώνοντας δίνονται τελικώς οι τάσεις στους τρεις διαφορετικούς κλάδους του μοντέλου που υπολογίζονται βάσει των παραμέτρων που παρουσιάσθηκαν ως εξής :

$$\sigma_t = E_o \cdot \varepsilon_c \qquad \qquad \gamma \iota \alpha \qquad \varepsilon_c < \varepsilon_{cr} \qquad (2.1.1.2-8)$$

$$\sigma_t = f_{ct} \left(1 - 0.85 \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{cr}}{\varepsilon_1 - \varepsilon_{cr}} \right) \qquad \gamma \iota \alpha \qquad \varepsilon_{cr} < \varepsilon_c < \varepsilon_l \qquad (2.1.1.2-9)$$

$$\sigma_t = 0.15 f_{ct} \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon_c}{\varepsilon_u - \varepsilon_1} \right) \qquad \qquad \gamma_{1\alpha} \qquad \varepsilon_I < \varepsilon_c < \varepsilon_u \qquad (2.1.1.2-10)$$

Αντίστοιχα οι τάσεις σ_t , $\overline{\sigma}_t$ και οι παραμορφώσεις ε_t , $\varepsilon_t ck$ υπολογίστηκαν από το τριγραμμικό μοντέλο των σχέσεων (2.1.1.2-8 έως 2.1.1.2-10) και χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για τον υπολογισμό των παραμέτρων βλάβης d_t ,που απαιτεί το ABAQUS.

Σημείωση: Οι παραμορφώσεις $\varepsilon_c^{pl} \varepsilon_t^{pl}$ που παρουσιάσθηκαν στην αρχή στο Κεφάλαιο 2.1 δεν χρειάζεται να υπολογιστούν από το χρήστη. Ο υπολογισμός τους γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα.

2.1.2 ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΔΙΑΡΡΟΗΣ

Επιφάνεια διαρροής καλείται η επιφάνεια στο χώρο που αποτελεί το διαχωριστικό όριο μεταξύ της ελαστικής περιοχής και της πλαστικής περιοχής. Σε τρισδιάστατο χώρο τα σχήματα της ποικίλλουν ανάλογα το υλικό και τα εφαρμοζόμενα κριτήρια αστοχίας. Στην απλή περίπτωση τριαξονικής εντατικής κατάστασης ενός όλκιμου υλικού όπως ο χάλυβας η απεικόνιση της επιφάνειας διαρροής στο χώρο των κυρίων τάσεων (σ1,σ2,σ3) είναι ένας κύλινδρος με διεύθυνση προσανατολισμού τον υδροστατικό άξονα, δηλαδή τα σημεία που βρίσκονται υπό υδροστατική περίαται ασημεία εντός του κυλίνδρου η εντατική κατάσταση είναι στην ελαστική περιοχή τα σημεία που διαρρόψ, τα σημεία πάνω στην επιφάνεια μόλις που διαρρέουν ,ενώ τα σημεία εκτός αυτής βρίσκονται σε πλαστική περιοχή. Η λογική αυτή επεκτείνεται εύκολα και σε υλικά που δεν είναι όλκιμα αλλά ψαθυρά.

Η συνάρτηση διαρροής F που χρησιμοποιείται στη θεωρία πλαστικότητας του σκυροδέματος αποτελείται από δύο καμπύλες Drucker-Prager όπως στο Σχήμα 2.1.2.1 [1].Συνυπολογίζονται έτσι οι διαφορετικές συμπεριφορές σε εφελκυσμό και θλίψη και η εξέλιξη της επιφάνειας ελέγχεται από τις παραμέτρους $\varepsilon_c pl^h$, $\varepsilon_i pl^h$.Ο τύπος της συνάρτησης διαρροής είναι ο ακόλουθος:

$$F = rac{1}{1-lpha}\left(ar{q} - 3lphaar{p} + eta\left(ilde{arepsilon}^{pl}
ight)\left\langle\widehat{ar{\sigma}}_{ ext{max}}
ight
angle - \gamma\left\langle -\widehat{ar{\sigma}}_{ ext{max}}
ight
angle
ight) - ar{\sigma}_{c}\left(ilde{arepsilon}^{pl}_{c}
ight) = 0,$$

Όπου :

•
$$a = \frac{(\sigma_{bo}/\sigma_{Co}) - 1}{2(\sigma_{bo}/\sigma_{Co}) - 1}$$

•
$$\beta = \frac{\overline{\sigma}c(\varepsilon c^{pl})}{\overline{\sigma}t(\varepsilon t^{pl})}(1 - \alpha) - (1 + \alpha)$$

•
$$\gamma = \frac{3(1 - K_C)}{2K_C - 1}$$

- $\hat{\bar{\sigma}}_{max}$: η μέγιστη κύρια ισοδύναμη τάση
- σ_{bo} / σ_{C0} : ο λόγος μέγιστης θλιπτικής τάσης στη διαξονική καμπύλη θλίψης προς
 τη μέγιστη θλιπτική τάση σε μονοαξονική ένταση. Λαμβάνεται ως 1.16.
- Κc : είναι παράμετρος όπου στο σκυρόδεμα η τιμή της λαμβάνεται ίση με 0.66.
 Πρακτικά ορίζεται από την προβολή της δεύτερης αναλλοίωτης του αποκλίνοντα τανυστή τάσης στο επίπεδο π (p plane) στους άξονες εφελκυσμού και θλίψης αντίστοιχα στο π επίπεδο. Ο λόγος του διανύσματος στον εφελκυστικό άξονα προς

το αντίστοιχο διάνυσμα στον άξονα θλίψης δίνει τη παράμετρο Kc (Σχήμα 2.1.2.2). Το επίπεδο π (p plane) ευρίσκεται εύκολα καθώς ο υδροστατικός άξονας είναι πάντα κάθετος σε αυτό.



Σχήμα 2.1.2.1 Επιφάνεια διαρροής υπό διαξονική φόρτιση



<u>Σχήμα 2.1.2.2</u> Τομή επιφανειών αστοχίας για διαφορετικές τιμές Κ
ς με το επίπεδο π (αποκλίνον επίπεδο ή deviatoric plane)

2.1.3 ΝΟΜΟΣ ΚΡΑΤΥΝΣΗΣ

Διάκριση γίνεται με τους όρους $\varepsilon_c pl^h$, $\varepsilon_c pl^h$ που αφορούν μόνο το κομμάτι της πλαστικής παραμόρφωσης λόγω κράτυνσης. Ο λόγος είναι η χρήση τους για τον έλεγχο και την ανάπτυξη της επιφάνειας διαρροής $F(\sigma_{ij})$ και καλούνται εσωτερικές παράμετροι ή εσωτερικές μεταβλητές ισότροπης κράτυνσης (Σχήμα 2.1.3) που υπεισέρχονται σε νόμους εξέλιξης της επιφάνειας διαρροής .Λόγω πολυαξονικής εντατικής κατάστασης η συνθήκη διαρροής δεν είναι της απλής μορφής $\sigma=\sigma y$, όπως συμβαίνει σε μονοαξονική ένταση αλλά μια συνάρτηση του τανυστή των τάσεων . Στην περίπτωση κρατυνόμενου υλικού, η συνάρτηση διαρροής F μπορεί να αλλάζει σχήμα, μέγεθος και θέση στο χώρο. Παίρνει νέα μορφή και δεν εξαρτάται μόνο από τον τανυστή των τάσεων, αλλά και από τις παραμέτρους ισότροπης κράτυνσης που εδώ ορίζονται οι $\varepsilon_c pl^h$, $\varepsilon_i pl^h$, (ως οι παράμετροι κράτυνσης) και από τη διαφορετική συμπεριφορά σε εφελκυσμό και θλίψη που συμβαίνει στο σκυρόδεμα. Η συνάρτηση διαρροής με την παραδοχή της ισότροπης κράτυνσης διατηρεί το σχήμα της αλλά με την εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων αλλάζει σε μέγεθος. Στην περίπτωση κινηματικής κράτυνσης ,η επιφάνεια διαρροής διατηρεί το μέγεθος και το σχήμα της αλλά μετατοπίζεται στο χώρο. Στο μοντέλο CDP χρησιμοποιείται ο νόμος ισότροπης κράτυνσης.



Σχήμα 2.1.3.1 Αποτύπωση της Ισότροπης κράτυνσης με διεύρυνση των ορίων της επιφάνειας διαρροής

2.1.4 ΝΟΜΟΣ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΡΟΗΣ

Ο νόμος πλαστικής ροής που εφαρμόζεται στα μοντέλα της παρούσας σπουδαστικής εργασίας είναι η σχέση (2.1.4-1).Είναι αναγκαία κινηματική παραδοχή που απαιτείται για την περιγραφή της εξέλιξης της πλαστικότητας στη γειτονιά ενός σημείου. Σκοπός είναι να ευρεθεί μια διατύπωση για την εξέλιξη των πλαστικών παραμορφώσεων. Ακολουθώντας το σκεπτικό

παραγωγής της ελαστικής παραμόρφωσης μέσω της παραγώγισης της συνάρτησης ελαστικού δυναμικού (ελαστικής συμπληρωματικής ενέργειας) ως προς την τάση, θεωρούμε την βαθμωτή συνάρτηση πλαστικού δυναμικού, G, ώστε να ισχύει:

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \dot{\lambda} \frac{\partial G}{\partial \sigma} \tag{2.1.4-1}$$

Όπου λ΄ συντελεστής αναλογίας ή παράμετρος συμβατότητας

Ερμηνεύοντας τη παραπάνω σχέση διαπιστώνεται ότι το διάνυσμα $\dot{\varepsilon}^{pl}$ (καλείται και διάνυσμα προσαύξησης πλαστικής παραμόρφωσης) είναι κάθετο στην επιφάνεια *G*,που σημαίνει ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις εκδηλώνονται σε διεύθυνση κάθετα σε αυτήν την επιφάνεια. Τότε έχουμε συζευγμένο νόμο πλαστικής ροής που και η συνάρτηση *G* ταυτίζεται με τη συνάρτηση διαρροής *F* (συνάρτηση διαρροής) κάτι που έχει παρατηρηθεί να συμβαίνει σε μεταλλικά υλικά όπως ο χάλυβας. Για το σκυρόδεμα ο νόμος θεωρείται μη συζευγμένος και η συνάρτηση δυναμικού *G* που χρησιμοποιείται είναι μια υπερβολική συνάρτηση κατά Drucker-Prager που δίνεται από τη παρακάτω σχέση:

$$G = \sqrt{(\epsilon f_{ct} \tan \Psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \tan \psi \qquad (2.1.4-2)$$

Οι παράμετροι που συνοδεύουν τη συνάρτηση δείχνονται και στο Σχήμα 2.1.4.1. Το επίπεδο αυτής είναι το \bar{q} \bar{p} όπου :

- \bar{p} : υδροστατική τάση ,ίση με –(1/3) της πρώτης αναλλοίωτης I₁ του τανυστή σij ,
- \overline{q} : ίσο με $\sqrt{\frac{3}{2}} s_{jj} s_{ij} = \sqrt{\frac{3}{2}} J_2$ όπου s_{ij} ο αποκλίνων τανυστής τάσεων και J_2 η δεύτερη αναλλοίωτη του τανυστή s_{ij}
- εκκεντρότητα που περιγράφει το ρυθμό που η συνάρτηση G προσεγγίζει την
 ασύμπτωτη. Όσο πιο μικρή γίνεται η τιμή αυτή τόσο η συνάρτηση δυναμικού προσεγγίζει
 την ευθεία γραμμή. Τιμή αυτής της παραμέτρου λαμβάνεται 0,1 για το σκυρόδεμα στη
 πλειονότητα της βιβλιογραφίας που εξετάστηκε
- ψ: γωνία της ασύμπτωτης με τον άξονα p̄ και αφορά την εσωτερική τριβή του υλικού και υπολογίζεται βάσει υψηλών πιέσεων περίσφιγξης. Για οπλισμένο σκυρόδεμα επιλέγεται μεταξύ 30°-40°.



Σχήμα 2.1.4.1 Συνάρτηση Drucker-Prager στο επίπεδο p-q

2.1.5 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΙΞΩΔΟΥΣ

Στη μέθοδο CDP (Concrete Damaged Plasticity) του ABAQUS, λόγω ότι το σκυρόδεμα ακολουθεί καμπύλη αποφόρτισης για τάσεις πέραν της μέγιστης σε εφελκυσμό και θλίψη ,με μείωση της δυσκαμψίας ,συχνά προκύπτουν προβλήματα σύγκλισης όταν η λύση του συστήματος εξισώσεων γίνεται με μέθοδο αντιστροφής του πίνακα συντελεστών των αγνώστων. Για αυτό χρησιμοποιείται ο συντελεστής ιξώδους μ (viscosity parameter). Όταν η συμπεριφορά των υλικών περιγράφεται από τον φθίνοντα κλάδο ,το εφαπτομενικό μητρώο δυσκαμψίας μπορεί να παίρνει αρνητικές τιμές . Στο σημείο αυτό οι καταστατικές εξισώσεις ρυθμίζονται από τον συντελεστή μ ώστε να επιτευχθεί σύγκλιση. Το μοντέλο καθίσταται βισκο-πλαστικό και ακολουθεί τον καταστατικό νόμο της σχέσης 2.1.5-1.

$$\sigma = (1 - d_v) D_0^e \cdot \left(\varepsilon - \varepsilon_v^{pl}\right) \tag{2.1.5-1}$$

$$\mu\varepsilon$$

$$\dot{d}_v = \frac{1}{\mu}(d - dv) \qquad (2.1.5-2)$$

Όπου d_v παράμετρος βλάβης του βισκοπλαστικού μητρώου δυσκαμψίας.

Η λύση των καταστατικών εξισώσεων βάσει του βισκοπλαστικού μοντέλου της σχέσης 2.1.5-1 καταλήγει στην ίδια λύση του μοντέλου της σχέσης 2.1-3 καθώς $t/\mu -> \infty$, όπου t χρόνος και μ ο συντελεστής ιξώδους. Συνεπώς πρέπει να επιλεχθεί τιμή μικρή σχετικά με το χρονικό βήμα των επαναλήψεων.

Περισσότερες πληροφορίες παρέχονται στο Abaqus Manual [1],[12]

2.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΒΛΑΒΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΛΟΓΩ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ

2.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το κύριο πρόβλημα από άποψη ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος είναι η διάβρωση των οπλισμών. Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του ασβεστίου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του τσιμέντου που τις περιβάλλει. Το φαινόμενο της διάβρωσης που λαμβάνει χώρα στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος δεν αφήνει ανεπηρέαστο και το περιβάλλον σκυρόδεμα. Η διείσδυση χλωριόντων από την επιφάνεια του σκυροδέματος προς το εσωτερικό μέχρι την επιφάνεια του οπλισμού είναι μία από τις αιτίες πρόκλησης της διάβρωσης. Τα γλωριόντα που μπορεί να διαπεράσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίου όταν φτάσουν μέσω του νερού των πόρων μέχρι τον οπλισμό, μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, αν έχουν χρησιμοποιηθεί συλλεκτά αδρανή από παραλίες ή θαλασσινό νερό μείξης, ή πρόσμικτα βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα, είτε από το φυσικό περιβάλλον. Τα χλωριόντα μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων, μέσα από τους πόρους του στρώματος με μεγαλύτερη ευκολία από άλλα ιόντα, με αποτέλεσμα την τοπική ή γενική καταστροφή του επιφανειακού προστατευτικού οξειδίου και την έναρξη της οξείδωσής του. Η αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων που καταστρέφουν την αλκαλική προστασία του οπλισμού και μειώνουν το pH σε τιμή που ο γάλυβας αργίζει να διαβρώνεται είναι η φάση που έχει ξεκινήσει το φαινόμενο και οι συνέπειες επιδρούν επακόλουθα στην συνάφεια αλλά και στο σκυρόδεμα.. Η διάβρωση βέβαια εμφανίζει πιο ομοιόμορφο χαρακτήρα λόγω του φαινομένου της ενανθράκωσης, που είναι η δεύτερη αιτία για την πρόκληση της διάβρωσης στον οπλισμό. Το διοξείδιο του άνθρακα (CO2) μέσα από το σύστημα των πόρων του σκυροδέματος διεισδύει σε μεγαλύτερα βάθη, αντιδρά με το υδροξείδιο του ασβεστίου (Ca(OH)₂) που διατηρεί το pH σε υψηλές τιμές και παράγει νερό (H₂O) και ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃). Το μέσο πλέον από αλκαλικό καθίσταται όξινο και η διάβρωση του οπλισμού είναι επιτρεπτή λόγω διάχυσης νερού και οξυγόνου. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ενανθράκωση παύει να εξελίσσεται σε περιβάλλοντα με πολλή υψηλή υγρασία καθώς το σύστημα των πόρων έχει κατακλυστεί από νερό και δεν μπορεί να διαχυθεί το διοξείδιο, προκαλώντας μια ανάσχεση της έναρξης της διάβρωσης. Για τιμές της σχετικής υγρασίας γύρω στο 50% με 70% οι συνθήκες είναι

ευνοϊκές για την ενανθράκωση. Οι δύο αυτές αιτίες δεν δρουν ανεξάρτητα. Μάλιστα η δεύτερη επιταχύνεται από την πρώτη.

Όταν ένας οπλισμός διαβρώνεται, τα παραγόμενα οξείδια σχηματίζουν τα προϊόντα μεγαλύτερου όγκου στη διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος. Αυτή η διαστολή έχει ως αποτέλεσμα εσωτερική πίεση γύρω από τον οπλισμό, που οδηγεί σε ρωγμές, θρυμματισμό του σκυροδέματος και μειώνει έτσι την περίσφιγξη των ράβδων οπλισμού. Η διάβρωση μειώνει το ύψος των νευρώσεων και την επιφάνεια της διατομής του οπλισμού που επηρεάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ σκυροδέματος και νευρώσεων ράβδων οπλισμού. Για τους παραπάνω λόγους είναι σημαντικό να κατανοήσουμε καλύτερα και να χαρακτηρίσουμε τα αποτελέσματα της διάβρωσης του οπλισμού στη φθορά του δεσμού της συνάφειας που εξετάζεται σε επόμενο κεφάλαιο.

Η προσβαλλόμενη περιοχή του χάλυβα ως προς τη μορφολογία εμφανίζει βελονισμούς έχει κυρίως τοπικό χαρακτήρα ακανόνιστου σχήματος και εισάγει από την αρχή δυσκολίες στην μοντελοποίηση τόσο του χάλυβα όσο και του σκυροδέματος. Ωστόσο θεωρώντας ότι συμβαίνει με ομοιόμορφο τρόπο, λόγω γενικευμένης ενανθράκωσης ,ή ομοιόμορφης διείσδυσης χλωριόντων οι συνέπειες της διάβρωσης πάνω στο σκυρόδεμα μοντελοποιούνται με αυτή τη παραδοχή με μεγαλύτερη ευκολία, με ανοχή για εκείνες τις περιοχές όπου εμφανίζουν σφοδρότερη ή ηπιότερη προσβολή. Η προσπάθεια εκτίμησης της πραγματικής κατάστασης βλάβης είναι στοχαστικού χαρακτήρα και μπορεί να επιτευχθεί με άλλες μεθόδους μη καταστροφικού ελέγχου σε υπάρχουσες κατασκευές. Εδώ επιχειρείται να προσεγγιστεί όσο το δυνατόν καλύτερα η ζημιά που αναπτύσσεται στο σκυρόδεμα λόγω διάβρωσης με ένα απλοποιημένο μοντέλο που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 2.2.2.

2.2.2 ΜΑΚΡΟΣΚΟΠΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΒΛΑΒΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η εισαγωγή της βλάβης που συμβαίνει στο σκυρόδεμα λόγω διάβρωσης στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων, αφορά ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται από πολλές εργασίες της ανοιχτής βιβλιογραφίας όπου το σκυρόδεμα θεωρείται ομοιογενές ισότροπο υλικό[1],[12]. Σκοπός δεν είναι η ακριβής αποτίμηση βλάβης σε μικροσκοπικό επίπεδο αλλά μια ποσοτική γενική εκτίμηση της προκαλούμενης βλάβης στο σκυρόδεμα με στόχο την επακόλουθη επίδραση που έχει στη συνάφεια χάλυβα σκυροδέματος. Οι ρωγμές που εμφανίζονται λόγω διάβρωσης στο σκυρόδεμα εξαιτίας διόγκωσης επιδρούν στη μηχανική συμπεριφορά του κατασκευαστικού

μέλους και μειώνουν τη φέρουσα ικανότητα του. Θεωρητική βάση αυτού του τρόπου μοντελοποίησης είναι η απομείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος που περιβάλλει το διαβρωμένο χάλυβα οπλισμού μέχρι την ακτίνα του μετώπου των ρωγμών όπου οι αναπτυσσόμενες τάσεις έχουν ξεπεράσει την αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό[47]. Η τιμή αυτής της ακτίνας υπολογίζεται σε διαφορετικό πρόγραμμα MATLAB που επεξηγείται παρακάτω. Ο τρόπος αυτός προσέγγισης του προβλήματος είναι μια εξιδανίκευση της πραγματικότητας και πηγάζει από την παραδοχή ότι η διάβρωση συμβαίνει ομοιόμορφα στον οπλισμό και επακόλουθα το σκυρόδεμα παραμορφώνεται συμμετρικά γύρω από τη ράβδο. Συνεπώς η έκταση που λαμβάνει χώρα η ρηγμάτωση του σκυροδέματος, εξαρτάται από δύο παράγοντες:

- Την ύπαρξη εγκάρσιας περίσφιγξης όπου βελτιώνει τα μηχανικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος και του δεσμού και από την πυκνότητα της s_h
- 2. Το βαθμό διάβρωσης του οπλισμού $\eta = \frac{m_0 m_r}{m_0}$ (%)

Σημείωση: Η ρηγμάτωση του σκυροδέματος θα πρέπει να εκτιμηθεί εξίσου στη περίπτωση όπου διαβρώνεται και ο εγκάρσιος οπλισμός. Η βλάβη προφανώς θα είναι μεγαλύτερη αλλά ο τρόπος μοντελοποίησης θα παραμένει ίδιος ως ρηγματωμένος κύλινδρος σκυροδέματος γύρω από κάθε ράβδο.

Σε ότι αφορά την εγκάρσια περίσφιγξη που διαθέτουν τα δοκίμια η μηχανική συμπεριφορά σε θλίψη και εφελκυσμό υπολογίστηκε από το μοντέλο Kent & Park [13] με μια τροποποίηση για να μπορέσει να προσεγγιστεί η διαφορετική μηχανική συμπεριφορά λόγω διάβρωσης. Ο κώδικας αυτός υπολογίζει το νέο όριο αντοχής σε εφελκυσμό και θλίψη δοθέντος επιπέδου περίσφιγξης (*s*_h σε mm) και βάθους διείσδυσης διάβρωσης (*x* σε mm) και είναι ο εξής:

$$f_{c-corr} = \frac{f_{ck}}{_{1+Kp(\varepsilon^{1}/\varepsilon_{0})}}$$
(2.2.2-1)

- fc-corr: τροποποιημένο όριο αντοχής σε θλίψη βάσει s_h , x
- *f_{ck}:* αρχικό όριο αντοχής σε θλίψη ,κλάση του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται (εδώ 30 MPa)
- *K_p*: συντελεστής που λαμβάνεται 0.1 για χάλυβες με νευρώσεις
- ε_o : η παραμόρφωση που παρατηρείται στο όριο αντοχής f_{ck}
- ε¹: μέση εφελκυστική παραμόρφωση που μετράται στο ρηγματωμένο σκυρόδεμα
 Η μέση παραμόρφωση ε₁ υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\varepsilon^1 = \frac{b_f - b_0}{b_0} \tag{2.2.2-2}$$

Όπου : $b_f - b_0 = n \cdot w_{cr}$

- *bo* :πλάτος διατομής σε mm
- *n* : αριθμός ράβδων ,(εδώ ισούται με 1)
- w_{cr}: μέσο πλάτος ρωγμών στην κυλινδρική ρηγματωμένη ζώνη του σκυροδέματος γύρω από τον οπλισμό που υπολογίζεται από:

$$w_{cr} = 2 \cdot \pi (n-1) \cdot x$$
 (2.2.2-3)

Με *n* να συμβολίζει τον λόγο όγκου παραγόμενων προϊόντων διάβρωσης προς αρχικό. Λαμβάνει τιμές μεταξύ 1 έως και 6 και χρησιμοποιείται ευρέως η τιμή *n*=2.

Η μείωση της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό και θλίψη για να ληφθεί υπόψιν η επίδραση του διαφορετικού βαθμού διάβρωσης, που χρησιμοποιήθηκε για κάθε μοντέλο στο ABAQUS μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω διαγράμματα (2.2.2.1 έως 2.2.2.4). Η επίδραση στην αντοχή είναι διαφορετική ανάλογα προφανώς το βάθος διείσδυσης x (mm) αλλά και του ποσοστού εγκάρσιας περίσφιγξης s_h.

<u>Παραδοχή</u>

Το ποσοστό διάβρωσης η(%) είναι αυτό που μετράται εργαστηριακά σαν απώλεια μάζας ως προς αρχική μάζα και μετατρέπεται σε μέσο βάθος διείσδυσης καθ' όλο το μήκος του χάλυβα οπλισμού. Συνοψίζεται ο υπολογισμός του μέσου βάθους διείσδυσης στα ακόλουθα βήματα:

<u>Βήμα 1:</u> Από τις μετρήσεις του εργαστηρίου των ποσοστών διάβρωσης η(%) εύκολα ευρίσκεται η εναπομένουσα μάζα m_r του αδιάβρωτου χάλυβα οπλισμού με γνώση της αρχικής μάζας m_o ως εξής:

$$m_r = m_0 - \eta \cdot m_0 \tag{2.2.2-4}$$

<u>Βήμα 2:</u> Με τη μάζα m_r υπολογίζεται ο νέος όγκος Vr του άθικτου χάλυβα, αφού είναι γνωστή και σταθερή η πυκνότητα ρ (7800 kg/m³) του χάλυβα.

<u>Βήμα 3</u>: Θεωρώντας τη ράβδο οπλισμού κύλινδρο διαμέτρου 16mm ισχύει ο τύπος :

$$Vr = Ar \cdot L$$

όπου Ar η μέση επιφάνεια διατομής του διαβρωμένου χάλυβα (mm²) και L το μήκος (mm). Με δεδομένο τον νέο όγκο Vr του χάλυβα που έχει απομείνει άθικτος από τη διάβρωση υπολογίζεται μια μέση τιμή της μειωμένης επιφάνειας διατομής.

<u>Βήμα 4:</u> Λύνοντας τον τύπο $Ar = \frac{\pi \cdot dr^2}{4}$ ως προς dr προκύπτει:

$$d_r = \sqrt{\frac{4A_r}{\pi}} \tag{2.2.2-5}$$

Και το μέσο βάθος διείσδυσης υπολογίζεται εύκολα από τη σχέση:

$$x = \frac{d - d_r}{2}$$
(2.2.2-6)

Με βάση τις σχέσεις (2.2.2.1-6) είναι δυνατή η εξαγωγή δεδομένων μέγιστης αντοχής (fc-corr ή ft-corr) σκυροδέματος συναρτήσει βάθους διείσδυσης (x) ή βαθμού διάβρωσης (η) που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων του ρηγματωμένου σκυροδέματος γύρω από τον διαβρωμένο οπλισμό (Διαγράμματα 2.2.2.1-4). Σε όλα τα δοκίμια η κλάση του σκυροδέματος είναι C30.



Διάγραμμα 2.2.2.1 Καμπύλη αντοχής άοπλου σκυροδέματος σε θλίψη συναρτήσει βάθους διείσδυσης διάβρωσης



Διάγραμμα 2.2.2.2 Καμπύλη αντοχής άοπλου σκυροδέματος σε εφελκυσμό συναρτήσει βάθους διείσδυσης διάβρωσης



Διάγραμμα 2.2.2.3 Καμπύλη αντοχής οπλισμένου σκυροδέματος σε θλίψη συναρτήσει του βάθους διείσδυσης διάβρωσης



Διάγραμμα 2.2.2.4 Καμπύλη αντοχής οπλισμένου σκυροδέματος σε εφελκυσμό συναρτήσει του βάθους διείσδυσης διάβρωσης

2.2.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΚΤΙΝΑΣ ΡΩΓΜΩΝ

Για τον υπολογισμό της περιοχής επίδρασης της διάβρωσης στο σκυρόδεμα είναι απαραίτητη η εισαγωγή αναλυτικής μαθηματικής διατύπωσης του προβλήματος. Ο Tepfers [25] πρώτος μοντελοποίησε το σκυρόδεμα γύρω από τον διαβρωμένο οπλισμό ως χονδρότοιχο κύλινδρο υποβαλλόμενο σε θλιπτικό φορτίο στην εσωτερική ακτίνα του κυλίνδρου που προέρχεται από τα διογκωμένα προϊόντα της διάβρωσης και το πάχος του κυλίνδρου αφορά την ελάχιστη επικάλυψη σκυροδέματος που παρέχεται στον οπλισμό (Σχήμα 2.2.3.1).



Σχήμα 2.2.3.1 Απεικόνιση της ακτίνας επιρροής της διάβρωσης στο σκυρόδεμα

Η περιοχή που ορίζεται από την ακτίνα r_b αφορά την απρόσβλητη ράβδο οπλισμού ενώ ο κύλινδρος με εξωτερική ακτίνα r_b -x+ t_r είναι ο όγκος που καταλαμβάνεται από τα προϊόντα της διάβρωσης.Το μέτωπο των ρωγμών εκδηλώνεται σε έκταση μακριά από την ακτίνα r_b , σε μια ακτίνα που εξαρτάται από την εσωτερική πίεση P που έχει αναπτυχθεί στην διεπιφάνεια των δύο υλικών και συμβολίζεται με Ri.Τα μεγέθη x και t_r συμβολίζεται η απόσταση από το κέντρο του οπλισμού μέχρι την επιφάνεια του σκυροδέματος από την πλευρά του κατασκευαστικού στοιχείου με τη μικρότερη επικάλυψη. Η ρηγμάτωση συμβαίνει όταν η εφελκυστική τάση ξεπεράσει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος.

Στη παρούσα σπουδαστική εργασία η μαθηματική διατύπωση που εφαρμόζεται γίνεται σύμφωνα με την εργασία [24] και εργασία [44].Το πρόβλημα διατυπώνεται σε πολικό σύστημα συντεταγμένων (r,θ) και ο κύλινδρος χωρίζεται σε δύο μέρη το ελαστικό εξωτερικό από *Ri* μέχρι *Rc* και το ρηγματωμένο εσωτερικό από *r*_b μέχρι *Ri*. Η ακτινική μετατόπιση θεωρείται ότι εξαρτάται μόνο από την ακτινική συνιστώσα *r*, οπότε για κάθε κομμάτι έχουμε τις εξής συναρτήσεις μετατόπισης:

•
$$u(r) = \frac{fct \cdot R_i^2}{Eo} \cdot \frac{1}{r}$$
 $\gamma \iota \alpha r_b < r < Ri$ (2.2.3-1)

•
$$u(r) = \frac{fct \cdot r}{Eo} \cdot \frac{(R_c/r)^2 + 1}{(R_c/R_i)^2 + 1}$$
 $\gamma \iota \alpha Ri < r < Rc$ (2.2.3-2)

Ενώ αντίστοιχα οι παραμορφώσεις $\mathcal{E}_{\theta}(r)$ στη διεύθυνση θ υπολογίζονται από τις σχέσεις:

•
$$\varepsilon_{\theta}(r) = \frac{u(r)}{r} = \frac{fct \cdot R_i^2}{Eo} \cdot \frac{1}{r^2}$$
 $\gamma_{i\alpha} r_b < r < Ri$ (2.2.3-3)

•
$$\varepsilon_{\theta}(r) = \frac{u(r)}{r} = \frac{fct}{Eo} \cdot \frac{(R_c/r)^2 + 1}{(R_c/R_i)^2 + 1}$$
 $\gamma_{10} R_i < r < R_c$ (2.2.3-4)

Η ακτινική μετατόπιση στη θέση $r=r_b$ που προκαλείται από τη διάβρωση μπορεί να γραφεί ως εξής :

$$u(r_b) = \tau_r - x = \frac{(n-1)(2r_b x - x^2)}{R_i + r_b}$$
(2.2.3-5)

Εξισώνοντας τη σχέση 2.2.3-5 με τη 2.2.3-1 και αναδιατάσσοντας τους όρους προκύπτει το πολυώνυμο $3^{\eta\varsigma}$ τάξης

$$\varepsilon_{Cr} \cdot R_i^3 + \varepsilon_{cr} \cdot r_b \cdot R_i^2 + (1 - n)(2r_b \cdot x - x^2)r_b = 0$$
(2.2.3-6)

η λύση του οποίου δίνει την ζητούμενη ακτίνα Ri. Με ε_{cr} συμβολίζεται ο λόγος f_{ct}/E_o .

Έτσι μπορεί να χωριστεί το κατασκευαστικό στοιχείο στη περιοχή ρηγματωμένου και ελαστικού δακτυλίου και να μοντελοποιηθεί η επίδραση της διάβρωσης στο σκυρόδεμα που είναι το ζητούμενο. Έχοντας εφαρμόσει την προαναφερόμενη υπολογιστική διαδικασία στο MATLAB λαμβάνεται η τιμή του *Ri*, για κάθε δοκίμιο με διαφορετικό εγκάρσιο οπλισμό και διαφορετικό χρόνο διάβρωσης. Επακόλουθα μπορεί να οριστεί η ρηγματωμένη περιοχή του σκυροδέματος ως μία περιοχή με υποβαθμισμένες αντοχές εφελκυσμού και θλίψης *fc-cor και fct-cor*, όπως περιεγράφηκαν στο προηγούμενο Κεφάλαιο 2.2.2 για τη μοντελοποίηση της βλάβης του σκυροδέματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΧΑΛΥΒΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι χάλυβες οπλισμού των εργαστηριακών δοκιμίων είναι κυκλικής διατομής με δύο σειρές πλάγιων νευρώσεων ομοιόμορφα κατανεμημένων κατά μήκος, κατηγορίας B500C (υψηλής ολκιμότητας) με ονομαστικό όριο διαρροής 500 MPa [38]. Η μοντελοποίηση του χάλυβα είναι απλή τόσο από πλευράς γεωμετρίας όσο και από πλευράς μηχανικής συμπεριφοράς. Η γεωμετρία καλύπτεται από τρισδιάστατο κύλινδρο διαστάσεων πανομοιότυπων με τις αντίστοιχες εργαστηριακές χωρίς να περιλαμβάνονται οι νευρώσεις λόγω αδυναμίας κάλυψης και διακριτοποίησης της επιφάνειας τους με πεπερασμένα στοιχεία. Παρόλο που αμελήθηκαν στη γεωμετρική σχεδίαση ,οι επιδράσεις τους στη συνάφεια λήφθηκαν υπόψιν στις μηχανικές ιδιότητες του υλικού. Σε ότι αφορά τη μηχανική συμπεριφορά χρησιμοποιήθηκε ένα ελαστικό μοντέλο με κράτυνση. Στο ABAQUS η ελαστική περιοχή δίνεται με το μέτρο ελαστικότητας *E* και το λόγο Poisson ν, καθώς το υλικό (χάλυβας B500C) είναι ισότροπο και χρειάζεται δύο ελαστική παραμόρφωση, όπου υπό την απουσία αυτών των δεδομένων χρησιμοποιούνται υπάρχοντα καταστατικά μοντέλα που προσεγγίζουν την πραγματική μηχανική συμπεριφορά του χάλυβα σε εφελκυσμό.

<u>Σημείωση</u>: Η σχεδίαση της σειράς νευρώσεων ήταν εφικτή αλλά απαιτούνταν υπολογιστικό κόστος που δεν μπορούσε να διατεθεί.

3.1 ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΧΑΛΥΒΑ

Στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε το μη γραμμικό μοντέλο δύο σταδίων (ελαστική και πλαστική περιοχή) Ramberg-Osgood όπως δίνεται από τις εξισώσεις (3.1-1),(3.1-2) με τις τροποποιήσεις που δέχτηκε αρχικά από τους Mirambell & Real και τις απλοποιήσεις του Rasmussen [43] για τις απαιτούμενες αρχικές παραμέτρους που πρέπει να προ-υπολογιστούν. Το

μοντέλο περιλαμβάνεται και στον Ευρωκώδικα ΕΝ 1993-1-4, Annex C [10], για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς ανοξείδωτων χαλύβων.

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0.002 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0.2}}\right)^n \tag{3.1-1}$$

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln\left(\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}}\right)}$$
(3.2-1)

Όπου *E* είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα, *n* ο εκθετικός συντελεστής σκλήρυνσης παραμόρφωσης, *σ0.01* η τιμή της τάσης που προκύπτει από παραμόρφωση 0.01% και *σ0.2* το όριο αναλογίας που θεωρείται συμβατικά ως όριο διαρροής λόγω εγγύτητας των δύο ορίων.

Η σχέση του Ramberg-Osgood αδυνατεί να προβλέψει όλη τη καμπύλη τάσης παραμόρφωσης του χάλυβα με μία δεδομένη αρχική τιμή του n ,κυρίως για τάσεις πέραν του ορίου διαρροής. Οπότε με εισαγωγή της πρότασης Mirambell-Real για τη πλαστική περιοχή του υλικού και της απλοποίησης κατά Rasmussen έχουμε μία νέα μη γραμμική σχέση τάσης παραμόρφωσης με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας που συνοψίζεται στις σχέσεις (3.1-3),(3.1-4).

$$E_{0.2} = \frac{E}{1 + 0.002n\frac{E}{\sigma_{0.2}}}$$
(3.1-3)

$$\varepsilon = \frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{E_{0.2}} + \varepsilon_{\mathrm{u}} \left(\frac{\sigma - \sigma_{0.2}}{\sigma_{\mathrm{u}} - \sigma_{0.2}} \right)^m + \varepsilon_{0.2} \qquad \gamma \iota \alpha \ \sigma > \sigma 0.02 \qquad (3.1-4)$$

Το μοντέλο ολοκληρώνεται με τον υπολογισμό του εκθέτη *m* της τάσης αστοχίας σ_u και της μέγιστης παραμόρφωσης ε_u.

$$m = 1 + 3.5 \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{\rm u}} \tag{3.1-5}$$

$$\varepsilon_{\rm u} = 1 - \frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{\rm u}} \tag{3.1-6}$$

$$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{\rm u}} = 0.46 + 145 \frac{\sigma_{0.2}}{\rm E} \tag{3.1-7}$$

Επίσης έγινε σύγκριση των μηχανικών χαρακτηριστικών των εργαστηριακών δοκιμίων με σχεδόν απόλυτη ταύτιση των πραγματικών μετρήσεων με των αντίστοιχων θεωρητικών που προέκυψαν από το μοντέλο της εργασίας. Τυπικά δίνεται το διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης που προκύπτει από την εφαρμογή του μοντέλου στο παρακάτω Σχήμα 3.1.1.



Σχήμα 3.1.1 Τυπική καμπύλη τάσης παραμόρφωσης με τα αναγραφή των σημαντικότερων παραμέτρων

3.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΣΤΑ ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Η αποτύπωση της επίδρασης της διάβρωσης στα μηχανικά χαρακτηριστικά του χάλυβα οπλισμού ερευνάται με δοκιμές ή τεστ σε ράβδους που υπόκεινται σε φυσική προσβολή ή με τεχνητό τρόπο διαβρώνονται στο εργαστήριο. Σε κάθε περίπτωση η βλάβη διάβρωσης του σιδηρο-οπλισμού, αποτελεί έννοια κρίσιμη καθώς συνδέεται αφενός με τη μηχανική απόκριση του υλικού του χάλυβα και αφ' ετέρου με την απομείωση των δυνάμεων δεσμού συνάφειας (χάλυβα-σκυροδέματος). Η υπολειπόμενη φέρουσα ικανότητα των κατασκευών Ο/Σ επηρεάζεται από τη διάβρωση του σιδηρο-οπλισμού μέσα από μηχανισμούς, όπως η απώλεια μέρους της διατομής των ράβδων, απώλεια της σύνθετης διατομής σκυροδέματος-χάλυβα, λόγω αποτίναξης της επικάλυψης σκυροδέματος, απώλεια συνάφειας λόγω των νέων σχηματιζόμενων ενώσεων στη διεπιφάνεια και μείωση της ικανότητας του χάλυβα να παραμορφώνεται εξαιτίας απώλειας ολκιμότητας και όπως έχει παρατηρηθεί ελάττωση των ορίων διαρροής και θραύσεως του χάλυβα. Για τους λόγους αυτούς, καθίσταται επιτακτική η ανάγκη προβλέψμης απόκρισης του βαθμού βλάβης διάβρωσης στον χάλυβα η οποία σχετίζεται άμεσα με τη μηχανική συμπεριφορά του σιδηρο-οπλισμού και συνάφειας του χάλυβα του σιδηροής και θραύσεως του καλυσμα.

Ωστόσο η διαβρωμένη περιοχή του χάλυβα που είναι κυρίως τοπικής φύσεως, παρουσιάζει τεράστια ανομοιογένεια ως προς τη μορφολογία στα εγκιβωτισμένα δοκίμια κατά μήκος, όπως Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών 31

αναφέρεται στην υπάρχουσα ερευνητική βιβλιογραφία [27],[28],[29] και για εργαστηριακά διαβρωμένα δοκίμια και για δοκίμια από φυσική διάβρωση. Προφανώς η ακριβής χαρτογράφηση των βελονισμών και η εισαγωγή της επιφανειακής τοπογραφίας του διαβρωμένου οπλισμού στο πρόγραμμα πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS δεν υλοποιήθηκε και απλοποιήθηκε βρίσκοντας το μέσο βάθος διείσδυσης των βελονισμών για τον μετέπειτα υπολογισμό της απώλειας διατομής, όπως εξηγήθηκε με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2.2.2.

Με γνώση της μη συμπερίληψης των ανομοιογενειών που παρατηρούνται στη γεωμετρία των διαβρωμένων δοκιμίων, λήφθηκαν υπόψιν οι κάτωθι σχέσεις για την ολκιμότητα , το όριο διαρροής και το όριο θραύσης που προβλέπει το μοντέλο της εργασίας [32],[51] που δείχνουν ικανοποιητική συσχέτιση με πειραματικές μετρήσεις:

$$f_y = (1.0 - \alpha_y \cdot \eta) f_{y0} \tag{3.2-1}$$

Όπου fy είναι το μειωμένο όριο διαρροής, fy0 το όριο διαρροής του αδιάβρωτου χάλυβα.

$$f_u = (1.0 - \alpha_u \cdot \eta) f_{u0}$$
(3.2-2)

Όπου *fu* είναι το μειωμένο όριο θραύσης, *ful* το όριο θραύσης του αδιάβρωτου χάλυβα.

$$\varepsilon_u = (1.0 - \alpha_1 \cdot \eta)\varepsilon_0 \tag{3.2-3}$$

Όπου ε_u είναι η μειωμένη παρατηρούμενη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο και εο η αντίστοιχη παραμόρφωση στον αδιάβρωτο χάλυβα. Το η είναι ο βαθμός διάβρωσης και μετράται ως ποσοστό απώλειας μάζας του οπλισμού.

Οι συντελεστές *αy*,*αu*,*α1* είναι εμπειρικοί και υπολογίζονται με βάση την εργασία του Du [52] στον παρακάτω Πίνακα 3.2.1.

Πίνακας 3.2.1 Πίνακας τιμών των εμπειρικών συντελεστών αy,αu,α1 συναρτήσει ποσοστού απώλειας μάζας ανά ερευνητική ομάδα

Authors		Exposure	Qcorr %	a _y	α"	α1
Palsson and Mirza4	Concrete	Service, chlorides	0 to 80°	0.0	0.0	NS
Castel, Francois, and Airliguie7	Concrete	Chlorides, 0.0 mA/cm ²	0 to 20	0.0	NS	0.035
Du^8	Bare	Accelerated, 0.5 to 2.0 mA/cm ²	0 to 25	1 0.014	0.014	0.029
	Concrete	Accelerated, 1.0 mA/cm ²	0 to 18	0.015	0.015	0.039
Maslehuddin et al.9	Bare	Service, marine	0 to 1	0	0	0
Allam et al.10	Bare	Service Arabian coast	0 to 1	0	0	0
- Morinaga ¹¹	Concrete	Service, chlorides	0 to 25	0.017	0.018	0.06
Zhang, Lu, and Li12	Concrete	Service, carbonation	0 to 67	0.01	0.01	0
Andrade et al.13	Bare	Accelerated, 1.0 mA/cm ²	0 to 11	0.015	0.013	0.017
Clark and Saifullah14	Concrete	Accelerated, 0.5 mA/cm ²	0 to 28	0.013, 0.012	0.017, 0.014	NS
Lee, Tomosawa, and Noguchi15	Concrete	Accelerated, 13.0 mA/cm ²	0 to 25	0.012	NS	NS
Present study	Concrete	Accelerated, 0.01 to 0.05 mA/cm ²	0 to 3	0.012	0.011	0.03

"Based on minimum, not average, residual s Note: NS = not supplied. Τέλος ο λόγος Poisson μένει ανεπηρέαστος από επίδραση της διάβρωσης ενώ διχογνωμία υπάρχει για το μέτρο ελαστικότητας αν παραμένει σταθερό η μειώνεται. Στη μοντελοποίηση υποτέθηκε ότι μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας *E*_s και το κατά πόσο ,υπολογίστηκε με βάση τη κάτωθι σχέση από την εργασία [27]:

$$E_{corr} = (1 - 1.139(\Delta W_{max}/100) \cdot E_s$$
(3.2-4)

Όπου ΔW_{max} αφορά τη μέγιστη απώλεια διατομής. Εδώ επειδή έχει υποτεθεί ομοιόμορφη κατανομή της απώλειας μάζας λόγω διάβρωσης, σημειώνεται και ομοιόμορφα συμμετρική απώλεια του εμβαδού της διατομής και δεν υπάρχει μέγιστη τιμή αυτού του όρου αλλά μία μέση τιμή αυτού.

Έτσι τα μηχανικά χαρακτηριστικά των διαβρωμένων δοκιμίων εισήχθησαν στο μη γραμμικό μοντέλο χάλυβα του Κεφαλαίου 3.1 και έτσι μοντελοποιήθηκαν οι οπλισμοί με διαφορετικούς χρόνους διάβρωσης στο πρόγραμμα ABAQUS. Μια τυπική συγκριτική καμπύλη ενός αδιάβρωτου και διαβρωμένου οπλισμού αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 3.2.1) και ομοίως εφαρμόζεται για όλους τους χρόνους διάβρωσης.



Διάγραμμα 3.2.1 Συγκριτικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης αδιάβρωτου και διαβρωμένου χάλυβα οπλισμού

<u>Σημείωση</u>: Ο υπολογισμός των παραπάνω παραμέτρων και σχέσεων έγινε με χρήση των υπολογιστικών φύλλων Excel.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΤΗΣ ΔΙΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΧΑΛΥΒΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ MODEL CODE 2010 ΥΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ολοκληρώνοντας τα κομμάτια που αφορούν την σύνθεση του μοντέλου προσομοίωσης του πειράματος εξόλκευσης ,θα πρέπει να γίνει ιδιαίτερη αναφορά στο μοντέλο που περιγράφει τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας των δύο συνεργαζόμενων υλικών (σκυρόδεμα-χάλυβας).Και τούτο διότι η αξιοπιστία και η ασφαλής μεταφορά των φορτίων μεταξύ χάλυβα σκυροδέματος είναι κρίσιμη στο σχεδιασμό κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Η συνάφεια επιτυγχάνεται με χημική πρόσφυση ,δυνάμεις τριβής που προκύπτουν είτε από την κάθετη πίεση που κρατά τα υλικά σε επαφή (αν υπάρχει) είτε από επιφανειακή τραχύτητα και εξαρτάται από το συντελεστή τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ τους (Εικόνα 4.1). Σε περιπτώσεις δε όπου χρησιμοποιούνται χάλυβες με νευρώσεις εξαρτάται και από την μηχανική αλληλοεμπλοκή των νευρώσεων χάλυβα με το σκυρόδεμα.



Εικόνα 4.1 Μηχανισμός μεταφοράς δυνάμεων χάλυβα σκυροδέματος

Μετά το αρχικό στάδιο ολίσθησης, όπου έχει καταστραφεί η χημική πρόσφυση ,η αντίσταση στη δύναμη εξόλκευσης παρέχεται κυρίως από δυνάμεις πίεσης αναπτυσσόμενες μεταξύ του μετώπου των νευρώσεων και το ανά μεταξύ αυτών σκυρόδεμα καθώς και από την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του κεκλιμένου επιπέδου των νευρώσεων. Δευτερευόντως δρουν οι Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών 35

δυνάμεις τριβής που προέρχονται από τις μικρές επιφανειακές ατέλειες της επιφάνειας της ράβδου και είναι η κύρια δύναμη αντίστασης στη περίπτωση των λείων ράβδων [53].

Θεωρώντας επιπλέον και την έναρξη της διαδικασίας διάβρωσης ταυτόχρονα αρχίζει και η καταστροφή της χημικής πρόσφυσης και απομείωση του ύψους των νευρώσεων. Βέβαια σε χαμηλά επίπεδα διάβρωσης η επίδραση είναι κυρίως ευεργετική για το δεσμό όπως παρατηρείται πειραματικά [33] ενώ η συνάφεια υποβαθμίζεται σε μεγαλύτερα ποσοστά διάβρωσης (η %) και το πόσο γρήγορα εξαρτάται από πολλούς παράγοντες .Τέτοιοι είναι, παράγοντες έκθεσης σε επιθετικό περιβάλλον για τον οπλισμό, κατασκευαστικές λεπτομέρειες δομικού στοιχείου, τύποι και συμπεριφορά των δύο υλικών (χάλυβα-σκυροδέματος). Επακόλουθα αναμένεται να μειωθεί και η αντοχή της συνάφειας μαζί με το φορτίο εξόλκευσης της ράβδου.

Για πολλά χρόνια η αντοχή συνάφειας αντιμετωπιζόταν αποτελεσματικά ως διατμητική τάση που δρα στην διεπιφάνεια χάλυβα-σκυροδέματος δηλαδή ως ιδιότητα υλικού και μόνο. Πλέον είναι σαφές για το δεσμό, το μήκος αγκύρωσης και τις ενώσεις των οπλισμών ότι δεν είναι μόνο εξαρτώμενα από τα υλικά αλλά και από τη γεωμετρία των ράβδων οπλισμού και τη γεωμετρία του κατασκευαστικού μέλους [18].Η βάση της γνώσης που υπάργει γύρω από την αντογή συνάφειας είναι κυρίως εμπειρική όπως προκύπτει από τις διαφορετικές μαθηματικές σχέσεις για την περιγραφή της που απαντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία και τα κανονιστικά πρότυπα. Η κατανόηση βέβαια των εμπειρικών σχέσεων και νόμων είναι θεμελιώδους σημασίας για τον τεχνικό σχεδιασμό και ανάλυση των κατασκευών. Οι αποκλίσεις και ασυμφωνίες των εξαγόμενων εμπειρικών σχέσεων πηγάζουν από τα αποτελέσματα διαφορετικών εργαστηριακών μελετών με διαφορετικές κατασκευαστικές λεπτομέρειες των υπό μελέτη δοκιμίων και της διαδικασίας εκτέλεσης των πειραμάτων αυτών (μέθοδος διάβρωσης, χρόνος διάβρωσης κ.α.). Σε τελευταίες έρευνες [δες διπλωματική] η διασπορά των πειραματικών δεδομένων οφείλεται σε παράγοντες όπως οι διαφορετικές γεωμετρίες ράβδων, τα όρια διαρροής και θραύσεως των ράβδων η τεχνική κατηγορία σκυροδέματος, η ενέργεια θραύσεως σκυροδέματος ,τύπος αδρανών υλικών και τσιμεντοπολτού και κατασκευαστικές λεπτομέρειες όπως ύπαρξη και πυκνότητα εγκάρσιου οπλισμού ,πάχος επικάλυψης, μήκος δεσμού κ.α. .

Στη παρούσα εργασία βέβαια λήφθηκαν υπόψιν στη προσομοίωση των πειραμάτων εξόλκευσης μόνον οι κατασκευαστικές λεπτομέρειες των εργαστηριακών δοκιμίων της εργασίας [9] και εφαρμόστηκαν τα όσα ορίζει το Model Code 2010 [20] για τη συμπεριφορά της συνάφειας υπό διάβρωση και συγκεκριμένα τα Κεφάλαια 6.1 έως 6.1.7.1. Αρχικά γίνεται μια σύντομη

βιβλιογραφική ανασκόπηση και εν συνεχεία αναλύεται ο τρόπος ανάπτυξης και εισαγωγής του μοντέλου συνάφειας υπό δεδομένο βαθμό διάβρωσης.

4.1 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ -ΒΙΒΛΙΟΦΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Πλήθος ερευνών έχει διεξαχθεί για τη μελέτη της υπολειπόμενης αντοχής συνάφειας διαβρωμένου οπλισμού και σκυροδέματος σε πειραματικό επίπεδο. Η πλειοψηφία αυτών αφορά κυρίως δοκίμια κοντά σε μήκος με την υπό διάβρωση ράβδο τοποθετημένη στο κέντρο της διατομής και χωρίς εγκάρσιο οπλισμό με εξαγόμενες εκθετικές συναρτήσεις απομείωσης της τάσης συνάφειας συναρτήσει επιπέδου διάβρωσης. Η εξέταση της αντοχής συνάφειας γίνεται με πείραμα εφελκυσμού της υπό εξέταση ράβδου, ενώ πολλές είναι και οι δοκιμές που έχουν πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο κάμψης δοκού τριών και τεσσάρων σημείων. Παρόλο που η θετική επίδραση της εγκάρσιας περίσφιγξης που προσφέρεται από τους συνδετήρες έγει επισημανθεί από πολλούς ερευνητές [33],[54], εντούτοις λίγα είναι τα αποτελέσματα τάσης συνάφειας των δοκιμίων που διαθέτουν εγκάρσιο οπλισμό είτε σε δοκίμια εξόλκευσης είτε σε δοκίμια που υποβάλλονται σε κάμψη. Γύρω από το θέμα δεν λείπουν και αναλυτικά μοντέλα που επιχειρούν να δώσουν μια ρεαλιστική μαθηματική αποτύπωση των μηγανισμών εκείνων που επενεργούν στην αντογή του σκυροδέματος και της συνάφειας, στον τρόπο αστοχίας του σκυροδέματος ,τη ρηγμάτωση κ.α. Τα μοντέλα αυτά αποτελούν βάση για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς ενός δομικού μέλους με βλάβη λόγω διάβρωσης σε επίπεδο πεπερασμένων στοιχείων. Σχετικά με τα υπάρχοντα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων γύρω από διαβρωμένες κατασκευές που είναι πολύ λιγότερα σε σχέση με την πειραματική έρευνα ,αναφέρουμε κάποιες εργασίες για το σημείο της έρευνας μέχρι σήμερα γύρω από το θέμα.

Οι Liu Jin και Hongshen Yang [36] θέλοντας να μελετήσουν την μηχανική απόκριση δοκών οπλισμένου σκυροδέματος με διάβρωση του εφελκυόμενου και θλιβόμενου οπλισμού, ανέπτυξαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων δύο σταδίων ,που εκτιμά την αντοχή κάμψης των δοκών, το μοτίβο των ρωγμών αστοχίας, την φέρουσα ικανότητα την ολκιμότητα και τη κατανομή των

παραμορφώσεων, σε δοκιμή κάμψης τεσσάρων σημείων υπό διαφορετικούς χρόνους διάβρωσης. (Εικόνα 4.1.1).



Εικόνα 4.1.1 Μεσοσκοπικό αριθμητικό μοντέλο της δοκού οπλισμένου σκυροδέματος

Το πρώτο στάδιο αφορά την έναρξη και ανάπτυξη της διάβρωσης στους οπλισμούς των καμπτόμενων δοκιμίων μέχρι ενός επιθυμητού επιπέδου και το δεύτερο στάδιο αφορά τη φόρτιση του φορέα αυτού που έχει υποστεί τη βλάβη. Η διόγκωση που προκαλείται από ανάπτυξη της διάβρωσης του οπλισμού θεωρείται μη ομοιόμορφη και μοντελοποιείται ως ακτινική μετατόπιση στο σκυρόδεμα γύρω από τη διαβρωμένη ράβδο οπλισμού. Το προφίλ της ακτινικής μετατόπισης που υποβάλλεται το σκυρόδεμα έχει σχήμα ημι-ελλειπτικό και θεωρείται ότι εφαρμόζεται σε όλο το μήκος του οπλισμού (Εικόνα 4.1.2).



Εικόνα 4.1.2 Προφίλ κατανομής διάβρωσης σε γωνιακά τοποθετημένο οπλισμό

Έτσι είναι δυνατόν να προσεγγιστεί η διαδικασία ρηγμάτωσης της επικάλυψης με πιο ρεαλιστικό τρόπο και επακόλουθα να εφαρμοστεί το καμπτικό φορτίο για τη λήψη των προς εκτίμηση μεγεθών της εργασίας (αντοχή σε κάμψη, μοτίβο ρωγμών αστοχίας κ.α.). Επιπρόσθετα το σκυρόδεμα προσεγγίζεται ως μη ομογενές υλικό τριών φάσεων (αδρανή υλικά διαφορετικών διαμέτρων, συνδετικό υλικό και διεπιφανειακές ζώνες μετάβασης) όπου χρησιμοποιώντας τη

μέθοδο Monte Carlo είναι δυνατή η αναπαραγωγή της τυχηματικής κατανομής των τριών αυτών φάσεων στον όγκο της δοκού. Σε ότι αφορά την μοντελοποίηση της διεπιφάνειας χάλυβασκυροδέματος χρησιμοποιούνται πεπερασμένα στοιχεία 2-κομβα (1D spring elements) και στις 3 διευθύνσεις X-Y-Z με διαφορετική τιμή δυσκαμψίας σε κάθε διεύθυνση.



Εικόνα 4.1.3 Μοντέλο μηχανισμού συνάφειας χάλυβα-σκυροδέματος σύμφωνα με τον Κινεζικό Κανονισμό

Οι απαιτούμενες παράμετροι για τη μοντελοποίηση της διεπιφανειακής συμπεριφοράς χάλυβα σκυροδέματος λαμβάνονται από τον Κινεζικό Κανονισμό [4] (Εικόνα 4.1.3), ενώ η επίδραση της διάβρωσης στη συνάφεια από την εργασία [3].Οι διαμήκεις ράβδοι οπλισμού που διαθέτει η κάθε δοκός μοντελοποιούνται ως γραμμικό ελαστικό υλικό με τη χρήση 8-κομβων κυβικών στοιχείων όπως χρησιμοποιούνται και στο σκυρόδεμα ,ενώ οι συνδετήρες μοντελοποιούνται ως 2-κομβα μονοδιάστατα πεπερασμένα στοιγεία. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου αξιολογήθηκε βάσει σύγκρισης με πειραματικά τεστ που διεξήχθησαν από τον Ηι [2] (Εικόνα 4.1.4). Στα αποτελέσματα της εργασίας η δύναμη προσεγγίζεται με μέση απόκλιση 4.43% ενώ το διάγραμμα δύναμης προς μετατόπιση της προσομοίωσης ακολουθεί με μεγάλη συνέπεια το πειραματικό αποτέλεσμα (Εικόνα 4.1.4). Το μοτίβο των ρωγμών αστοχίας που προκύπτει από το μοντέλο της εργασίας σε όλα τα πειράματα είναι και αυτό αρκετά συνεπές ,παρουσιάζοντας έντονες ρηγματώσεις στη περιοχή γύρω από το μέσο της δοκού και αραιότερες ρηγματώσεις όσο προγωράμε προς τις στηρίξεις του δοκιμίου. Σε μεγαλύτερα επίπεδα διάβρωσης προφανώς επηρεάζεται και μεγαλύτερο τμήμα των δοκών. Επίσης σημειώνεται και η επίδραση της διάβρωσης στις παραμορφώσεις του οπλισμού κατά τη φόρτιση με τις παρατηρήσεις να μην αναφέρουν ρητά αύξηση η μείωση των παραμορφώσεων, παρά μόνο ότι μειώνονται εν γένει οι παραμορφώσεις στον εφελκυόμενο οπλισμό των δοκών όσο η διάβρωση αναπτύσσεται.



Εικόνα 4.1.4 Αποτελέσματα πειραματικών και αριθμητικών καμπυλών για το κεντρικό σημείο της δοκού

Σε αντιδιαστολή με τα πειράματα κάμψης, οι **De Nardin** και **Almeida Filho** [42], μελέτησαν την αντοχή συνάφειας και την μορφή της καμπύλης τάσης προς ολίσθησης σε κυλινδρικά δοκίμια με μία υπό εξέταση ράβδο Φ10mm, αγκυρωμένη στο κέντρο των κυλίνδρων με μήκος αγκύρωσης 50mm (Εικόνα 4.1.5α). Δεν μελετάται η επίδραση διάβρωσης ούτε η επίδραση της περίσφιγξης που προσφέρεται από συνδετήρες. Σκοπός είναι η εκτίμηση της συμπεριφοράς της συνάφειας πειραματικά και μοντελοποιώντας το πείραμα στο πρόγραμμα ABAQUS και ANSYS.



 $\underline{\mathrm{Eikóva}\;4.1.5}$ α) Γεωμετρία Δοκιμίου και Επιφάνεια Επαφής

Εικόνα 4.1.5 β) Εγκάρσια Θλιπτική πίεση εφαρμοζόμενη στο δεσμό

Σχετικά με τα υλικά (χάλυβας, σκυρόδεμα), έχει γίνει μέτρηση των μηχανικών μεγεθών (μέτρα ελαστικότητας, όρια διαρροής κ.λ.π) και χρησιμοποιούνται απευθείας στο πρόγραμμα ενώ για τη

διεπιφάνεια χρησιμοποιείται ο κύκλος Mohr, και το μοντέλο τριβής Coulomb για να ευρεθεί ο συνδυασμός διατμητικών και ορθών τάσεων που οδηγούν σε θραύση του δεσμού (Εικόνα 4.1.6).







Οι πιθανές μορφές αστοχίας είναι αστοχία από ολίσθηση στη διεύθυνση όπου ξεπερνιέται η μέγιστη διατμητική αντοχή και αστοχία αποχωρισμού των δύο υλικών στη διεύθυνση όπου ξεπερνιέται η μέγιστη ορθή όπως ορίζει ο κύκλος Mohr. Στο μοντέλο αυτό για την κάθετη στη διεύθυνση ολίσθησης συμπεριφορά εφαρμόζεται το μοντέλο hard contact και στην διεύθυνσης ολίσθησης το μοντέλο τριβής Coulomb που παρέχονται από το ABAQUS. Έγινε χρήση των C3D8 (κυβικά γραμμικά στοιχεία) πεπερασμένων στοιχείων για το σκυρόδεμα και τη ράβδο χάλυβα. Οι νευρώσεις δεν μοντελοποιήθηκαν στη γεωμετρία της ράβδου αλλά εφαρμόστηκε μία ισοδύναμη πίεση περιφερικά και κάθετα στην εξωτερική επιφάνεια του πρίσματος σκυροδέματος και με κατεύθυνση στο κέντρο του κυλίνδρου (Εικόνα 4.1.5β). Στα συγκριτικά αποτελέσματα η συμπεριφορά που παροσμοίωση είναι συνεπής με τη πραγματική συμπεριφορά



Εικόνα 4.1.7 α) Πειραματική και Αριθμητικές καμπύλες τάση συνάφειας-ολίσθηση



Εικόνα 4.1.7 β) Παραμετρικές αναλύσεις για διαφόρους συντελεστές τριβής μ και εγκάρσιας πίεσης ρ

Στα ίδια πλαίσια μοντελοποίησης κινείται και η εργασία των **Amleh, Ghosh** [23] με υπολογισμό του παράγοντα διάβρωσης στο αναπτυχθέν μοντέλο στο ABAQUS. Τα δοκίμια που κατασκευάζονται (Εικόνα 4.1.8) και μοντελοποιούνται στη συνέχεια είναι απερίσφιγκτα κυλινδρικά ύψους 300mm με αγκυρωμένη ράβδο Φ19.5mm στο κέντρο των κυλίνδρων και πάχος επικάλυψης 25 mm, 50 mm, 75 mm και 100 mm. Το μήκος αγκύρωσης της ράβδου στο σκυρόδεμα είναι 280 mm και η κατηγορίες σκυροδέματος C50 και C60.





Μετά την κατασκευή τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε διαδικασία διαβρώσεως διαφορετικών χρόνων βυθιζόμενα σε δεξαμενή με διάλυμα 5% περιεκτικότητας κατά βάρος NaCl.



Εικόνα 4.1.9 Απώλεια εγκάρσιας πίεσης συναρτήσει διάβρωσης (αριστερά) Εκθετική συνάρτηση απομείωσης του συντελεστή τριβής μ για διάφορα επίπεδα διάβρωσης (δεξιά)

Στη παρούσα εργασία η μέθοδος-τεχνική που ακολουθείται για το μηχανισμό συνάφειας των δοκιμίων, είναι ο ορισμός της συμπεριφοράς στην εγκάρσια διεύθυνση (normal behavior) της ράβδου καθώς και η συμπεριφορά στην εφαπτομενική διεύθυνση (tangential behavior).Η εγκάρσια πίεση στη διεπιφάνεια προκύπτει από σχέση που λαμβάνει υπόψη της το πάχος της επικάλυψης του σκυροδέματος και το ποσοστό διάβρωσης του οπλισμού από προηγούμενη

εργασία των συγγραφέων της εργασίας. Η εμπειρική σχέση προβλέπει το ποσοστό απώλειας της εγκάρσιας πίεσης περίσφιγξης (Εικόνα 4.1.9). Για την ολοκλήρωση της σύστασης του μοντέλου απαιτείται και η μοντελοποίηση της δύναμης τριβής στην διεπιφάνεια χάλυβα σκυροδέματος. Η κεντρική ιδέα μοντελοποίησης που αφορά το συντελεστή τριβής, είναι μία σχέση εκθετικού τύπου που λαμβάνει υπόψη της διάβρωση του οπλισμού (Εικόνα 4.1.9) και έχει βασιστεί σε παραμετρική εργασία των συγγραφέων Lundgren και Gylltoft [64].Από τα αποτελέσματα της εργασίας των καμπυλών τάσης συνάφειας (bond stress)-ολίσθησης (slip) διαπιστώνεται η καλή εφαρμογή του μοντέλου (Εικόνα 4.1.10) ενώ συγκρίνεται και το μοντέλο με πειραματικά αποτελέσματα των εργασιών Cabrera ,Ghoddoussi (1992) και Al-Sulaimani (1990) (Εικόνα 4.1.11).



Εικόνα 4.1.10 Καμπύλες τάσης συνάφειας – ολίσθησης πεπερασμένων στοιχείων και πειραματικών αποτελεσμάτων με πάχος επικάλυψης 25 mm και τύπο σκυροδέματος C50 αριστερά και C60 δεξιά



Εικόνα 4.1.11 Επικύρωση του μοντέλου της εργασίας με εφαρμογή του στα πειραματικά αποτελέσματα των εργασιών Cabrera, Ghoddoussi (αριστερά) Al-Sulaimani (δεξιά)

Στην εργασία του ο Du Qixin [24] δημιούργησε ένα δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων στο ABAQUS, για τη προσομοίωση πειραμάτων κάμψης τριών σημείων σε διαβρωμένες δοκούς με εγκάρσιο οπλισμό. Οι μηχανικές συμπεριφορές των υλικών μοντελοποιήθηκαν με βάση το Model Code για τη συμπεριφορά σκυροδέματος σε θλίψη και εφελκυσμό και η συμπεριφορά του χάλυβα ως γραμμική ελαστική μέχρι τη διαρροή και σταθερή μετά το όριο αυτό. Το διεπιφανειακό στρώμα μεταξύ χάλυβα σκυροδέματος δεν αντιμετωπίζεται ως πρόβλημα επαφής αλλά ως νέο υλικό με δικές του ξεχωριστές ιδιότητες. Για το σκοπό αναπτύσσεται ένα πεπερασμένο στοιγείο μίας διάστασης (1D link element) με μη γραμμική δυσκαμψία που σαν ιδέα προτάθηκε πρώτα από τους Ngo, Scordelis [59].Η συμπεριφορά συνάφειας προς ολίσθηση του πεπερασμένου στοιγείου απαιτεί τον υπολογισμό της τάσης που προσφέρει η γημική πρόσφυση, του συντελεστή τριβής ως συνάρτηση του βάθους διείσδυσης της διάβρωσης ,της μέγιστης τάσης λόγω μηχανικής εμπλοκής νευρώσεων στη περίπτωση μάλιστα όπου ο χάλυβας διαβρώνεται και την συμμετοχή της τάσης που προσφέρεται από τον εγκάρσιο οπλισμό. Έτσι προσομοιώνονται και οι βλάβες στο δεσμό χάλυβα σκυροδέματος. Οι βλάβες λόγω διαβρώσεως που προκύπτουν στο σκυρόδεμα μοντελοποιούνται ως μια ισοδύναμη παραμορφωσιακή κατάσταση γύρω από τη διαβρωμένη ράβδο και σε ακτίνα που υπολογίζεται με αναλυτικό τρόπο στην εργασία. Η βλάβη στο χάλυβα συνοψίζεται στη μείωση της διαμέτρου κατά το βάθος διείσδυσης, που θεωρείται γνωστό μέγεθος κάθε φορά. Η επικύρωση και αξιολόγηση του δισδιάστατου αυτού μοντέλου έγινε με τη σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων των Al-Sulaimani [56] (Εικόνα 4.1.12), Lundgren[58] (Εικόνα 4.1.13), Mangat[57] (Εικόνα 4.1.14), και Cairns[55] (Εικόνα 4.1.15). Σημαντικό συμπέρασμα αυτής της εργασίας είναι η πολύ καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων των πεπερασμένων στοιγείων της καμπτικής απόκρισης των δοκών και υποβάθμισης της συνάφειας, αυξανόμενου βαθμού διάβρωσης, με όλες τις προς σύγκριση εργασίες. Μερικά από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας παραθέτονται παρακάτω.

Σύγκριση με Al-Sulaimani



Εικόνα 4.1.12 Σύγκριση αναλυτικού μοντέλου με το πειραματικό (Al-Sulaimani) για 10 mm διάμετρο οπλισμού (αριστερά) και 14 mm διάμετρο οπλισμού (δεξιά).



Σύγκριση με Lundgren

Εικόνα 4.1.13 Σύγκριση αναλυτικού μοντέλου με το πειραματικό (Lundgren), δοκίμιο 1# (αριστερά) και δοκίμιο 2# (δεξιά).
Σύγκριση με Cairns



Εικόνα 4.1.14 Σύγκριση αναλυτικού μοντέλου με το πειραματικό (Lundgren), δοκίμιο 1# (αριστερά) και δοκίμιο 2# (δεξιά).



Σύγκριση με Mangat

Εικόνα 4.1.15 Σύγκριση αναλυτικού μοντέλου με το πειραματικό (Mangat), δοκίμιο με 1.25% διάβρωση (αριστερά) και δοκίμιο με διάβρωση 2.5% (δεξιά).

4.2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ MODEL CODE 2010

Για την προσομοίωση των εργαστηριακών πειραμάτων, λαμβάνοντας υπόψιν την μορφή του δεσμού χάλυβα σκυροδέματος που προτείνεται στο Model Code, χρησιμοποιείται το διγραμμικό μοντέλο έλξης αποχωρισμού για τη μοντελοποίηση της διεπιφάνειας του δεσμού χάλυβα σκυροδέματος. Επιλέχθηκε αυτό το είδος προσέγγισης καθότι απαντάται σε προηγούμενες μελέτες, όπου σημειώνεται και τονίζεται η επάρκεια του σε ότι αφορά προβλήματα μοντελοποίησης συνεκτικότητας. Αντίθετα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα πεπερασμένο στοιχείο ξεχωριστό, μοντελοποιώντας έτσι τη διεπιφάνεια ως ξεχωριστό υλικό, με ιδιαίτερη όμως δυσκολία στο να υπολογιστούν οι μηχανικές του ιδιότητες λόγω ύπαρξης διάβρωσης. Στην Εικόνα 4.2.1 φαίνεται στα δεξιά η τάση συνάφειας συναρτήσει της ολίσθησης για τη περίπτωση ύπαρξης εγκάρσιας περίσφιγξης και απουσίας αυτής όπως δίδεται από το Model Code και αριστερά το μοντέλο που παρέχεται από το ABAQUS.



Εικόνα 4.2.1 Μοντέλο έλξης-αποχωρισμού για τη προσομοίωση της μορφής της συνάφειας που προτείνει το Model Code 2010

Οι παράμετροι που πρέπει να χρησιμοποιηθούν με βάση το διγραμμικό μοντέλο έλξηςδιαχωρισμού (traction-separation) που προτείνεται στη βιβλιογραφία της εργασίας, αφορούν τη συμπεριφορά της διεπιφάνειας των δύο συνεργαζόμενων υλικών και ειδικά τους όρους του ασύζευκτου μητρώου δυσκαμψίας του δεσμού K_{nn} , K_{ss} , K_{tt} και τις μετατοπίσεις δ_n , δ_s , δ_τ . Ο διγραμμικός αυτός νόμος επιτρέπει στο δεσμό μεταξύ των δύο επιφανειών να εκφρασθεί ως γραμμική ελαστική σχέση τάσης συνάφειας (t έλξη) και ολίσθησης (δ μετατόπιση-αποχωρισμός). Οι όροι δυσκαμψίας αποτυπώνονται στην Εικόνα 4.2.2.

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{pmatrix}$$

Ο όρος δ_n αφορά τη μετατόπιση στη κάθετη προς τη διεύθυνση εξόλκευσης της ράβδου, ή αλλιώς στην ακτινική διεύθυνση που προκαλείται μετατόπιση στο σκυρόδεμα λόγω διόγκωσης διαβρωτικών προϊόντων. Συνεπώς επειδή η τιμή αυτή του δ_n είναι πολύ μικρή, η δυσκαμψία K_{nn} θα πρέπει να είναι αρκετά μεγαλύτερη από τις άλλες δύο. Ο όρος *Kss* σχετίζεται με τη διατμητική συνιστώσα δυσκαμψίας που είναι παράλληλη στη διεύθυνση που εφαρμόζεται το φορτίο στη ράβδο και αντίστοιχα ο άλλος όρος *Ktt* με την διατμητική συνιστώσα κάθετη στις δύο άλλες διευθύνσεις. Η τιμή του *K* για τις διατμητικές συνιστώσες λαμβάνεται ίδια ,θεωρώντας ίδια συμπεριφορά του δεσμού και στις δύο αυτές διευθύνσεις. Οι όροι *δs* δt αντιπροσωπεύουν τις ολισθήσεις στην διεπιφάνεια σκυροδέματος – χάλυβα.

Με αυτή τη προσέγγιση της συμπεριφοράς του δεσμού μπορεί να μοντελοποιηθεί και η επίδραση της διάβρωσης του χάλυβα στη συνάφεια των δύο υλικών τροποποιώντας κατάλληλα τις παραμέτρους του μοντέλου ,μειώνοντας κατάλληλα τις δυσκαμψίες K και τις ολισθήσεις δ . Το μοντέλο αρχικά είναι ελαστικό για έλξεις (τάσεις) μικρότερες της κρίσιμης διεπιφανειακής αντοχής. Όταν η τάση ξεπεράσει τη κρίσιμη τιμή, ο δεσμός θραύεται και η δυσκαμψία του δεσμού υποβαθμίζεται μέχρι να μηδενιστεί η συνεκτική έλξη. Η έναρξη της βλάβης και διάδοσης της, είναι οι παράμετροι που πρέπει να δοθούν στο πρόγραμμα μαζί με τους όρους του ασύζευκτου μητρώου. Δηλαδή οι όροι που χρησιμοποιούνται από το Model Code είναι οι εξής τέσσερις : K_{ss} , K_{nn} , δ_{init} , δ_{evol} ,που μειώνονται σε τρεις διότι ο όρος K_{nn} ευρίσκεται μέσω της σχέσης $K_{nn}=100K_{ss}$ [24],[37].





Η θεώρηση τους από το Model Code συνοψίζεται στην ερμηνεία του κώδικα με αποτελέσματα που επεξηγούνται και παρουσιάζονται παρακάτω.

Η διαδικασία υπολογισμού των παραμέτρων είναι η ίδια και για τις δύο ερμηνείες που προέκυψαν και συνοψίζεται στα εξής βήματα:

<u>Βήμα 1º</u>

Υπολογισμός του δ_{init} (το s στη σχέση 1) από τη σχέση του Model Code:

$$\tau_b = \tau_{bmax} \left(\frac{s}{s_1}\right)^a \tag{4.2-1}$$

Με το τ_b να δίνεται από τις σχέσεις:

$$f_{stm} = 54 \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25} \left(\frac{25}{\phi}\right)^{0.2} \left(\frac{l_b}{\phi}\right)^{0.55} \left[\left(\frac{c_{min}}{\phi}\right)^{0.25} \left(\frac{c_{max}}{c_{min}}\right)^{0.1} + k_m K_{tr} \right]$$
(4.2-3)

<u>Βήμα 2°</u>

Για τον υπολογισμό της μέγιστης τάσης τ_{max}, βρίσκεται η τάση που αναπτύσσεται στο χάλυβα μέσω μίας εκ των σχέσεων

$$f_{stm} = 54 \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25} \left(\frac{25}{\phi}\right)^{0.2} \left(\frac{l_b}{\phi}\right)^{0.55} \left[\left(\frac{c_{min}}{\phi}\right)^{0.25} \left(\frac{c_{max}}{c_{min}}\right)^{0.1} + k_m K_{tr}\right]$$
(4.2-3)

Ή

$$f_{stm} = 41 \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25} \left(\frac{25}{\emptyset}\right)^{0.2} \left(\frac{l_b}{\emptyset}\right)^{0.55} \left[\left(\frac{c_{min}}{\emptyset}\right)^{0.25} \left(\frac{c_{max}}{c_{min}}\right)^{0.1} + k_m K_{tr}\right]$$
(4.2-4)

Για ράβδους με νευρώσεις και υπό καλές συνθήκες σκυροδέτησης το Model Code προτείνει την ημι-εμπειρική σχέση (4.2-3) και υπό τον περιορισμό ότι ο χάλυβας βρίσκεται σε ελαστική περιοχή κατά τη φόρτιση του. Η τροποποίηση με τον πολλαπλασιαστικό συντελεστή της σχέσεως (4.2-4) στην σχέση (4) αναφέρεται σε υποσημείωση του Model Code και λήφθηκε υπόψιν για τη πληρότητα της εργασίας.

Επιπρόσθετα τα διαβρωμένα δοκίμια αναμένεται να έχουν και μειωμένη αντοχή συνάφειας ως φυσικό επακόλουθο της αλλοίωσης της διεπιφάνειας και αναλόγως για κάθε βαθμό διάβρωσης του οπλισμού πολλαπλασιάζεται πρώτα η τιμή τάσης από την εξίσωση (4.2-3) της αντοχής συνάφειας του αδιάβρωτου δοκιμίου με έναν μειωτικό συντελεστή *R* (τιμές μικρότερες της μονάδας) που προκύπτει από γραμμική παρεμβολή του Πίνακα 4.1 που δίδεται στο Model Code 2010, για τις περιπτώσεις ύπαρξης ή όχι εγκάρσιας περίσφιγξης και τη στήλη που αφορά ράβδους χάλυβα με νευρώσεις.

<u>Πίνακας 4.1</u> Υποβάθμιση συνάφειας βάσει βαθμού διείσδυσης και επιφανειακών ρωγμών υπό την ύπαρξη ή μη εγκάρσιου οπλισμού κατά το Model Code 2010

Corrosion penetration (mm)	Equivalent surface crack (mm)	Confinement	Residual capacity	,
(as % of f_{bd})				
			Bar type	
0.05	0.2 – 0.4	No links	50 - 70	70 - 90
0.10	0.4 – 0.8		40 - 50	50 - 60
0.25	1.0 – 2.0		25 - 40	30 - 40
0.05	0.2 – 0.4	Links	95 – 100	95 — 100
0.10	0.4 - 0.8		70 - 80	95 - 100
0.25	1.0 - 2.0		60 — 75	90 - 100

Η διαδικασία συνεχίζεται πολλαπλασιάζοντας με το εμβαδόν της διατομής $\pi \emptyset^2/4$ για να ληφθεί η δύναμη *Fb* που είναι η δύναμη αγκύρωσης και διαιρώντας με $\pi \emptyset L$ υπολογίζεται η τ_{max} .

<u>Βήμα 3°</u>

Υπολογισμός του Kss και Knn με βάση τα προηγούμενα από :

$$K_{ss} = \frac{\tau max}{\delta_{init}} \tag{4.2-5}$$

$$K_{nn} = 100k_{ss}$$
 (4.2-6)

$$K_{tt} = K_{ss} \tag{4.2-7}$$

<u>Βήμα 4°</u>

Υπολογισμός του δevol, το οποίο λαμβάνεται από πίνακα του Model Code και ισούται με 9mm για όλες τις αναλύσεις των δοκιμίων Φ8/120mm καθώς προκύπτει από το διάστημα αναμεταξύ δύο διαδοχικών νεύρων. Για τα δοκίμια χωρίς εγκάρσιο οπλισμό η τιμή αυτή λαμβάνεται ως 1.2δ_{init}. Αρχικά η τιμή αυτή λήφθηκε όπως προτείνει το Model Code αλλά διαπιστώθηκε ότι είναι πολύ συντηρητική και εφαρμόσθηκε στα 2mm, μετά από εξέταση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι τα περισσότερα πειράματα αφορούν εξεταζόμενα μήκη δεσμού 50, όπου Ø η διάμετρος της αγκυρωμένης ράβδου και ότι ο νόμος της συνάφειας του Model Code προτείνεται για μικρά μήκη δεσμού. Ωστόσο για να γίνει η συμπερίληψη της συνεισφοράς των εγκαρσίων συνδετήρων στην αντοχή της συνάφειας εξετάστηκε μεγαλύτερο μήκος δεσμού εφαρμόζοντας τον νόμο για την τοπική συνάφεια παρουσιάζοντας καλή εφαρμογή από τα προκύπτοντα αποτελέσματα. Ο τρόπος αστογίας των πειραμάτων εφελκυσμού της ράβδου, για μεγάλα μήκη δεσμού και μέτρια περίσφιγξη είναι εν γένει από αστογία του σκυροδέματος σε διάρρηξη κοντά στα άκρα και αστοχία εξολκεύσεως. Δηλαδή υπάρχει συνδυασμός και των δύο τρόπων αστοχίας. Βέβαια ρόλο παίζουν και οι διαστάσεις των χρησιμοποιούμενων ράβδων και η επικάλυψη του σκυροδέματος. Για μικρά μήκη δεσμού και υπό ελαφρύ οπλισμό οι ρωγμές διάρρηξης δεν περιορίζονται και φτάνουν στην επιφάνεια ενώ με γρήση πυκνού οπλισμού κατά το μήκος αγκύρωσης η τάση συνάφειας ενισχύεται με περιορισμό των ρωγμών όπου παρατηρείται αστοχία εξόλκευσης με ταυτόχρονη μικρής έκτασης διάρρηξη στο γύρω σκυρόδεμα της ράβδου (Σχήμα 4.2.1). Επομένως αφού το Model Code αναφέρεται σε μικρά μήκη δεσμού, χρησιμοποιήθηκαν οι στήλες 2 έως 4 του Πίνακα 4.2 που προβλέπει ο κανονισμός (table 6.1-1 Splitting failure) αφού πρώτα αξιολογήθηκε η αστοχία των εργαστηριακών δοκιμίων.



Σχήμα 4.2.1 a)Αριστερά στην εικόνα πρόσθιας όψεως φαίνονται οι ρηγματώσεις που οφείλονται σε αστοχία λόγω διάρρηξης και δεξιά στο (β) πλάγια όψη του μέλους σε αστοχία εξόλκευσης της ράβδους με ρηγμάτωση κατά το μήκος δεσμού

Είναι σημαντικό να σημειωθεί η ευνοϊκή επιρροή που έχει η ύπαρξη εγκάρσιου οπλισμού στην αύξηση της αντοχής συνάφειας και στο περιορισμό των μικρορωγμών και στη συνέχεια τον περιορισμό των ρωγμών διαρρήξεως ,καθότι οι σύγχρονες κατασκευές διαθέτουν εγκάρσια περίσφιγξη μέσω συνδετήρων και επομένως τέτοιες κατασκευές ενδιαφέρουν.

Λόγω της πολυδιάστατης φύσης της συνάφειας θα πρέπει να γίνεται προσεκτική σύγκριση με αριθμητικές τιμές και πάντα από τη πλευρά της ασφάλειας αφού δεν έχει καταστεί σαφές το πλαίσιο συμπεριφοράς της συνάφειας στις κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος.

<u>Πίνακας 4.2</u> Πίνακας παραμέτρων Μέσης Τάσης Συνάφειας-Ολίσθησης για ράβδους με νευρώσεις που προτείνει το Model Code για δοκίμιο με $l / \phi = 5$ και υποθέτοντας ομοιόμορφη τάση σε όλο το μήκος δεσμού

	1	2	3	4	5	6				
	Pull-ou	ut (PO)	Splitting (SP)							
	$\varepsilon_s < \varepsilon_{s,y}$			$\mathcal{E}_{s} < \mathcal{E}_{s,y}$						
	Good	All	Good bo	nd cond.	All other k	oond cond.				
	bond cond.	other bond	Unconfined	Stirrups	Unconfined	Stirrups				
		cond.								
τ_{bmax}	$2.5\sqrt{f_{cm}}$	$1.25\sqrt{f_{cm}}$	$2.5\sqrt{f_{cm}}$	$2.5\sqrt{f_{cm}}$	$1.25\sqrt{f_{cm}}$	$1.25\sqrt{f_{cm}}$				
τ _{bu,split}	_	_	$7.0 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25}$	$8.0 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25}$	$5.0 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25}$	$5.5 \cdot \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25}$				
<i>s</i> ₁	1.0 mm	1.8 mm	$s(\tau_{bu,split})$	$s(\tau_{bu,split})$	$s(\tau_{bu,split})$	$s(\tau_{bu,split})$				
<i>s</i> ₂	2.0 mm	3.6 mm	<i>s</i> ₁	<i>s</i> ₁	<i>s</i> ₁	<i>s</i> ₁				
S ₃	$c_{clear}^{1)}$	$c_{clear}^{1)}$	1.2s1	$0.5c_{clear}^{1)}$	1.2s ₁	$0.5c_{clear}^{1)}$				
a	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4				
τ_{bf}	$0.40 \tau_{max}$	$0.40 \tau_{max}$	0	$0.4\tau_{bu,split}$	0	$0.4\tau_{bu,split}$				

¹⁾ c_{clear} is the clear distance between ribs

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ΜΕ ΤΟ ABAQUS

5.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια μοντελοποιήθηκαν λαμβάνοντας τις κατασκευαστικές λεπτομέρειες από την εργασία An Experimental Study on Effects of Corrosion and Stirrups Spacing on Bond Behavior of Reinforced Concrete [9]. Οι διαστάσεις των πρισματικών δοκιμίων είναι 240×200×310 mm και περιλαμβάνουν συνδετήρες ανά 60 mm, 120 mm και 240mm και δοκίμια χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, όπου με τις παραπάνω πυκνότητες εγκαρσίου οπλισμού προκύπτουν δύο κατηγορίες δοκιμίων με πάχος επικάλυψης 25mm η πρώτη και 40mm η δεύτερη. Η γεωμετρία και τα διαστασιολογικά χαρακτηριστικά αποτυπώνονται καλύτερα στο Σχήμα 5.1



Σχήμα 5.1 Πρόσθια και πλάγια όψη δοκιμίου φ8/60 με πάχος επικάλυψης 25mm

Στη παρούσα εργασία μοντελοποιήθηκαν δοκίμια με πάχος επικάλυψης 25mm και αυτά με τη μέτρια περίσφιγξη ,ανά 120 mm (Stirrup) δηλαδή και αυτά με καθόλου περίσφιγξη (No Stirrup), καθότι τα πρώτα συμφωνούσαν περισσότερο με τα πειραματικά αποτελέσματα της εργασίας με τις οδηγίες του Model Code για την αντοχή συνάφειας συναρτήσει επιπέδου διάβρωσης της ράβδου Ø16. Οι χρόνοι διάβρωσης για την κατηγορία πυκνότητας εγκάρσιου οπλισμού ανά 120mm ήταν 5 σε αριθμό και συνολικά κατασκευάστηκαν 6 δοκίμια μαζί με το δοκίμιο αναφοράς, που δεν υποβλήθηκε σε διαδικασία διάβρωσης. Ομοίως τα απερίσφιγκτα δοκίμια διαθέτουν 5 χρόνους διαβρώσεως, που φαίνονται στο Πίνακα 5.1. Το μήκος διάβρωσης της ράβδου όπως και

το μήκος αγκύρωσης ήταν 250 mm σε όλα τα δοκίμια. Φροντίδα υπήρξε ώστε να μην διαβρωθούν οι συνδετήρες και ο διαμήκης οπλισμός όπου για αυτό το σκοπό καλύφθηκαν με εποξεική ρητίνη αντιδιαβρωτικής προστασίας. Η κλάση του σκυροδέματος μετά από σκλήρυνση 28 ημερών υπολογίσθηκε σε μια μέση τιμή 30 MPa. Ενώ σε ότι αφορά τους χάλυβες εγκαρσίου και διαμήκους οπλισμού είναι οι διφασικοί χάλυβες θερμής έλασης και υψηλής ολκιμότητας B500C με μία μέση αντοχή διαρροής 550 MPa.

Επίπεδο Διάβρωσης (% απώλεια μάζας)	Δοκίμιο αναφοράς 25-S120-0	Δοκίμιο 25- S120-1	Δοκίμιο 25- S120-2	Δοκίμιο 25- S120-3	Δοκίμιο 25- S120-4	Δοκίμιο 25- S120-4
Μ συνδετήρες Stirrup (φ8/120mm)	0	1.17	3.22	5.84	7.06	8.32
Επίπεδο Διάβρωσης	Δοκίμιο	Δοκίμιο 25-				
(% απώλεια μάζας)	αναφοράς 25-Ν-0	N-1	N-2	N-3	N-4	N-4
Χωρίς Συνδετήρες No Stirrup	0	0.97	2.05	4.12	5.83	7.73

Πίνακας 5.1 Πειραματικά αποτελέσματα απώλειας μάζας των διαβρωμένων ράβδων Φ16 ανά δοκίμιο.

5.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΡΑΒΔΟΥ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ (Pull Out Tests)

Η διαδικασία εξόλκευσης πραγματοποιήθηκε μετά από την χαρτογράφηση των επιφανειακών ρωγμών των δοκιμίων με βάση το πρότυπο ASTM C234-91a. Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1, η κύρια ράβδος ενίσχυσης ενσωματώθηκε έκκεντρα, στην κορυφή του τμήματος RC. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε μια ειδικά σχεδιασμένη συσκευή (Εικόνα 5α), η οποία επιτρέπει μόνο μονοαξονική φόρτιση κατά τη διάρκεια των δοκιμών, αποτρέποντας την ανάπτυξη καμπτικών ροπών. Όλα τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ελεγχόμενη σταθερή μετατόπιση του ελευθέρου άκρου της ράβδου Ø16 ρυθμού 0,4 mm/min, ώστε να ποσοτικοποιηθεί η αντίσταση συνάφειας, η οποία εκφράζεται με την εξίσωση:

$$f_{bd} = \frac{Fmax}{\pi \cdot \emptyset \cdot Lemb}$$

Fmax είναι το μέγιστο φορτίο εξόλκευσης.

Ø = 16 mm, η ονομαστική διάμετρος της ράβδου.

 $L_{emb} = 250mm$, το εγκιβωτισμένο μήκος.

Καταγράφηκε το φορτίο *Fmax* και η αντίστοιχη κανονικοποιημένη αντοχή δεσμού *fbd,cor/ fbd,non-cor*.



Εικόνα 5α Διάταξη του πειράματος εξόλκευσης

Η αντίστοιχη διαδικασία στο ABAQUS περιλαμβάνει τον περιορισμό της πρόσθιας όψεως με συνοριακή συνθήκη πάκτωσης (Εικόνα 5β) και η εφαρμογή του φορτίου



Εικόνα 5β Συνοριακή Συνθήκη Πάκτωσης στην πρόσθια όψη του δοκιμίου στο ABAQUS

ως σταθερή μετατόπιση του ελευθέρου άκρου 10mm στη διεύθυνση Z (Εικόνα 5γ). Η τιμή της μετατόπισης έχει ρυθμό που προσεγγίζει την ψευδοστατική φόρτιση και για αυτό χρησιμοποιήθηκε Στατική Ανάλυση και όχι δυναμική, καθώς η δεύτερη αύξανε κατά πολύ το υπολογιστικό κόστος.



Εικόνα 5γ Εφαρμογή του φορτίου μετατόπισης στο ελεύθερο άκρο της ράβδου στο ABAQUS

Η τιμή των 10mm θεωρήθηκε ως επαρκής για την εξαγωγή των καμπυλών συνάφειας προς ολίσθηση καθότι και οι πειραματικές καμπύλες δεν παρουσίαζαν κάποια περαιτέρω σημαντική πληροφορία με αύξηση της ολίσθησης πέραν των 10mm.

5.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ MODEL CODE ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ (Φ8/120mm) ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ

Όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4.2 το μοντέλο συνάφειας, παρουσιάζεται αναλυτικά ο τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων που εισήχθησαν στο ABAQUS.

Υπολογισμός τь από :

$$f_{stm} = 54 \left(\frac{f_{cm}}{25}\right)^{0.25} \left(\frac{25}{\emptyset}\right)^{0.2} \left(\frac{l_b}{\emptyset}\right)^{0.55} \left[\left(\frac{c_{min}}{\emptyset}\right)^{0.25} \left(\frac{c_{max}}{c_{min}}\right)^{0.1} + k_m K_{tr}\right]$$
(4.2-3)

Με βάση τη σχέση (4-2-3) αντικαθίσταται το *fstm* στο τ_b και υπολογίζεται το δ_{init} από τη σχέση (4-2-1) που δίνεται στο Model Code για την αντοχή συνάφειας.

$$\tau_b = \tau_{bmax} \left(\frac{s}{s_1}\right)^a \tag{4.2-1}$$

Mε $s_1 = 1$ mm και $\alpha = 0, 4$ από πίνακα του Model Code.

$$\tau_{bmax} = 2,5\sqrt{fcm} \tag{4.2-2}$$

Λύνοντας ως προς
ς προκύπτει η τιμή του δ_{init} .

Η ζητούμενη μέγιστη τάση τ_{max}, είναι γνωστή από τη σχέση (4-2-3) και χρησιμοποιείται για το προσδιορισμό των υπόλοιπων μεγεθών Kss, Knn, Ktt. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα και παράμετροι δίνονται στο Πίνακα 5.3.1 και Πίνακα 5.3.2 για τα δοκίμια με συνδετήρες.

Πίνακας 5.3.1 Παράμετροι για το μοντέλο έλξης-αποχωρισμού της μοντελοποίησης του δεσμού συνάφειας για δοκίμια με συνδετήρες (Φ8/120mm)

Κωδικός Δοκιμίου	Βαθμός Διάβρωσης(%)	Δυσκαμψία Kss(N/mm3)	Δυσκαμψία Knn(N/mm3)	Μετατόπιση δinit(mm)	Μετατόπιση δevol(mm)
25-S120-0	0.0	25.13	2513	0.366	9
25-S120-1	1.17	26.02	2602	0.320	9
25-S120-2	3.22	40.87	4087	0.196	9
25-S120-3	5.84	47.21	4721	0.154	9
25-S120-4	7.06	50.78	5078	0.137	9
25-S120-5	8.32	55.01	5501	0.119	9

Πίνακας 5.3.2 Κυριότερα μεγέθη μετά την ολοκλήρωση των αναλύσεων με το πρόγραμμα ABAQUS για δοκίμια με συνδετήρες (Φ8/120mm)

Κωδικός Δοκιμίου	Βαθμός Διάβρωσης(%)	Βάθος Διείσδυσης(mm)	Μέγιστη Τάση Συνάφειας (MPa)	Μέγιστο Φορτίο Fmax(kN)	Ολίσθηση στο Fmax(mm)	Απώλεια Συνάφειας
25-S120-0	0.0	0	8.77	110.318	1.17	1
25-S120-1	1.17	0.0464	8.54	107.393	1.21	0.973
25-S120-2	3.22	0.1298	7.85	98.77	1	0.895
25-S120-3	5.84	0.2371	7.13	89.60	0.9	0.812

25-S120-4	7.06	0.2875	6.78	85.2	0.85	0.772
25-S120-5	8.32	0.340	6.40	80.50	0.8	0.729

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία προκύπτουν και οι Πίνακες 5.3.3 και 5.3.4 για τα δοκίμια χωρίς συνδετήρες.

Πίνακας 5.3.3 Παράμετροι για το μοντέλο έλξης-αποχωρισμού της μοντελοποίησης του δεσμού συνάφειας για
δοκίμια χωρίς συνδετήρες

Κωδικός Δοκιμίου	Βαθμός	Δυσκαμψία	Μετατόπιση	Μετατόπιση
	Διάβρωσης(%)	K"(N/mm ^³)	δ _{init} (mm)	δ _{evol} (mm)
		55.		
25-N-0	0	74.148	0.0729	2.5
25-N-1	0.97	111.91	0.0367	2.5
25-N-2	2.05	171.85	0.0179	2.5
25-N-3	4.12	304.44	0.0069	2.5
25-N-4	5.83	519.82	0.0028	2.5
25-N-5	7.73	939.46	0.0011	2.5

Πίνακας 5.3.4 Κυριότερα μεγέθη μετά την ολοκλήρωση των αναλύσεων με το πρόγραμμα ABAQUS για δοκίμια χωρίς συνδετήρες

Κωδικός	Βαθμός	Βάθος	Μέγιστη	Μέγιστο	Ολίσθηση	Απώλεια
Δοκιμίου	Διάβρωσης(%)	Διείσδυσης(mm)	Τάση	Φορτίο	στο	Συνάφειας
			Συνάφειας	Fmax(kN)	Fmax(mm)	
			(MPa)			
25-N-0	0	0	5.12	64.22	0.68	1
25-N-1	0.97	0.0389	3.98	50.01	0.52	0.778
25-N-2	2.05	0.0824	3.02	38	0.35	0.591
25-N-3	4.12	0.1665	2.07	26.1	0.2	0.406
25-N-4	5.83	0.2367	1.44	18.19	0.23	0.283
25-N-5	7.73	0.3154	0.93	11.71	0.1	0.182

Με αξιολόγηση των προκυπτόντων αποτελεσμάτων για τα δοκίμια με συνδετήρες από την χρήση των παραμέτρων του Πίνακα 5.3.1 τα αποτελέσματα της στήλης τάσης συνάφειας και δύναμης

του Πίνακα 5.3.2 είναι σε πολύ καλή συμφωνία με τα πειραματικά. Οι μέγιστες αποκλίσεις σε όρους δύναμης είναι 9.38% και η μικρότερη 1.11%. Βέβαια στο πίνακα των αποκλίσεων υπάρχει και η τιμή 32.89% που εισάγει προβληματισμό για το εύρος των αποκλίσεων που μπορούν να παρατηρηθούν σε πειράματα κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος. Αν και θα ήταν αναμενόμενο η τιμή της μέγιστης δύναμης για το δοκίμιο 25-S120-4 να είναι ανάμεσα από τις αντίστοιχες μετρούμενες δυνάμεις των δοκιμίων 25-S120-3 και 25-S120-5 εντούτοις αυτό δεν συμβαίνει. Είναι πολύ πιθανό οι συνθήκες σκυροδέτησης να μην ήταν οι πρέπουσες και η συνένωση των δύο υλικών να έχει ατέλειες όπως μεγάλα κενά κοντά στη διεπιφάνεια όπως και ατελής να ήταν η συνένωση εγκαρσίου οπλισμού και σκυροδέματος με αποτέλεσμα να μην προσφέρεται η μέγιστη δυνατή περίσφιγξη των Ø8/120mm εγκαρσίων συνδετήρων. Το δοκίμιο εμφανίζει συμπεριφορά πιο αραιά περισφιγμένου και δεν ακολουθεί την πτωτική τάση των υπολοίπων εισάγοντας έναν παράγοντα αβεβαιότητας που υπάρχει στα πειράματα των κατασκευών σκυροδέματος καθώς απαντάται μεγάλη διακύμανση τάσεων συνάφειας σε όλη τη βιβλιογραφία από πείραμα σε πείραμα. Απαιτείται προσεκτική σύγκριση των αριθμητικών τιμών των δοκιμίων.

<u>ΜΕΓΙΣΤΗ</u> ΔΥΝΑΜΗ	25-S120-0	25-S120-1	25-S120-2	25-S120-3	25-S120-4	25-S120-5
Πείραμα(kN)	114.4	108.6	93.8	81.2	57.2	77.8
Abaqus(kN)	110.318	107.393	98.77	89.60	85.2	80.50
Απόκλιση (%)	3.23	1.11	5.035	9.38	32.89	3.36

Πίνακας 5.3.5 Αποκλίσεις της μέγιστης δύναμης από τις πειραματικές μετρήσεις για δοκίμια με συνδετήρες

Πίνακας 5.3.6 Αποκλίσεις μέγιστης τάσης συνάφειας από τις πειραματικές μετρήσεις για δοκίμια με συνδετήρες

<u>ΤΑΣΗ</u> ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ	25-S120-0	25-S120-1	25-S120-2	25-S120-3	25-S120-4	25-S120-5
Πείραμα(MPa)	9.1	8.65	7.46	6.46	4.55	6.19
Abaqus(MPa)	8.77	8.54	7.85	7.13	6.78	6.40

...,

Απόκλιση (%)	3.23	1.11	5.03	9.38	32.89	3.36

Παρόμοια εικόνα επικρατεί και στα δοκίμια χωρίς συνδετήρες με τις προβλέψεις να είναι πολύ κοντά στις πραγματικές πειραματικές τιμές. Τα αποτελέσματα φαίνονται στους Πίνακες 5.3.3 και 5.3.4. Οι τιμές τάσεις για χαμηλό επίπεδο διάβρωσης έως 4.12% (απώλεια μάζας) ,εμφανίζουν μικρή απόκλιση ,η μεγαλύτερη στα 8.77% και η μικρότερη 1.65%. Ωστόσο για μεγαλύτερα επίπεδα διάβρωσης συγκεκριμένα 5.83% και 7.73% οι αποκλίσεις ξεφεύγουν κατά πολύ των ορίων ανοχής από παρατήρηση των Πινάκων 5.3.7 και 5.3.8. Τα αποτελέσματα του ABAQUS φαίνεται πως υπερεκτιμούν την αντοχή συνάφειας πέραν του βαθμού διαβρώσεως 4.12%. Η πραγματική κατάσταση είναι πιο δυσμενής για τη συνάφεια από ότι προβλέπεται. Για μεγαλύτερη αζιοπιστία των αποτελεσμάτων απαιτείται εκτέλεση περισσότερων αναλύσεων του προτεινόμενου τρόπου μοντελοποίησης με αποτελέσματα άλλων ερευνητών.

Πίνακας 5.3.7 Αποκλίσεις της μέγιστης δύναμης από τις πειραματικές μετρήσεις για δοκίμια χωρίς συνδετήρες							
<u>ΜΕΓΙΣΤΗ</u> ΔΥΝΑΜΗ	25-N-0	25-N-1	25-N-2	25-N-3	25-N-4	25-N-5	
Πείραμα(kN)	65.1	57.3	40.4	26.7	12.4	9.8	
Abaqus(kN)	63.64	52.01	37.27	26.20	17.31	11.84	
Απόκλιση(%)	2.24	8.77	7.75	1.65	39.60	20.82	

.

~ ~

TT/	1			e	
Πινακας 5.3.8 Αποκλ	μσεις τασης συναφεια	ς απο τις πειρα	ματικές μετρησεις γ	για οοκιμια γυ	ρις συνοετηρες
2		J J J			

<u>ΤΑΣΗ</u> ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ	25-N-0	25-N-1	25-N-2	25-N-3	25-N-4	25-N-5
Πείραμα(MPa)	5.18	4.56	3.21	2.12	0.98	0.78
Abaqus (MPa)	5.06	4.13	3.02	2.08	1.45	0.93
Απόκλιση (%)	2.24	8.77	7.75	1.65	-9.6	20.82

Για καλύτερη αποτύπωση παρατίθενται τα διαγράμματα τάσης συνάφειας και αδιαστατοποιημένης αντοχής συνάφειας σε σύγκριση με το μέσο βάθος διείσδυσης των αποτελεσμάτων μοντελοποίησης με το ABAQUS των πειραματικών αποτελεσμάτων και των οδηγιών του Model Code που προκύπτουν από τον Πίνακα 4.1.Υπό μικρά επίπεδα διαβρώσεως



<u>Διάγραμμα 5.3.1</u> Απώλεια Συνάφειας των προσομοιώσεων σε σύγκριση με το Model Code και τα πειραματικά δεδομένα για δοκίμια με συνδετήρες



Διάγραμμα 5.3.2 Απώλεια Συνάφειας των προσομοιώσεων σε σύγκριση με το Model Code και τα πειραματικά δεδομένα για δοκίμια χωρίς συνδετήρες

μέχρι 0.05mm το Model Code προτείνει αύξηση ή διατήρηση της αντοχής συνάφειας για τη περίπτωση ύπαρξης συνδετήρων, με την πρόταση αυτή να εξαρτάται άμεσα από το επίπεδο

περίσφιγξης και το πάγος επικάλυψης του εξεταζόμενου κατασκευαστικού μέλους. Συγκεκριμένα μετά τα 0.05mm η κλίση στο διάγραμμα της ζώνης Model Code with Links προκύπτει από την ύπαρξη περίσφιγξης και την ύπαρξη θλιπτικής πιέσεως που δρα ενισχυτικά για το δεσμό που ωστόσο δεν υπάρχει αναφορά για τη διάταξη της περίσφιγξης των εγκάρσιων συνδετήρων ή τη πυκνότητα του - η ίδια ζώνη θα υπήρχε και σε περίπτωση πιο πυκνού ή πιο αραιού οπλισμού. Επίσης φαίνεται και στα αποτελέσματα του διαγράμματος ότι υπάρχει έλλειψη οδηγιών για μεγαλύτερα επίπεδα διαβρώσεως. Παρόλα αυτά για τα συγκεκριμένα δοκίμια των κατασκευαστικών λεπτομερειών που χρησιμοποιήθηκαν υπάρχει καλή συσχέτιση καθώς κινούνται στα ίδια επίπεδα απώλειας συνάφειας και ακολουθούν την ίδια πτωτική τάση, με μόνη παρατήρηση ότι αυτά μπορούν να συγκριθούν για βάθος διείσδυσης έως 0.25mm. Μοντελοποιώντας το πείραμα εξόλκευσης ράβδου υπάρχει μια υπερεκτίμηση των αποτελεσμάτων απώλειας συνάφειας για τα δοκίμια με συνδετήρες, αμελητέα για χαμηλά επίπεδα διαβρώσεως σταθερή για αυξανόμενες τιμές συγκριτικά με τις οδηγίες του Model Code. Σε αντίθεση τα δοκίμια χωρίς εγκάρσιο οπλισμό συμπίπτουν με την οριοθετημένη περιοχή του Model Code και συμβαδίζουν και με τις πειραματικές τιμές. Σε όρους τάσης συνάφειας τα αποτελέσματα (Διάγραμμα 5.3.3 και Διάγραμμα 5.3.4) εμφανίζουν μια γραμμική σχέση μείωσης στη περίπτωση των συνδετήρων και μια εκθετικά μειούμενη σχέση με αύξηση του βάθος διείσδυσης διάβρωσης στη περίπτωση απουσίας συνδετήρων. Πρέπει όμως να διεξαγθούν περισσότερα πειράματα για να μιλήσουμε για πιο αξιόπιστα αποτελέσματα αφού το φαινόμενο της διάβρωσης είναι τυχαίο και οι κατασκευές σκυροδέματος αρκετά σύνθετες ως προς τη συμπεριφορά και απόκριση. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής μελέτης [60] καταδεικνύουν ότι υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα πρόβλεψης της συμπεριφοράς της συνάφειας. Δεν είναι τυχαίο ότι υπάρχουν πολλές εμπειρικές σχέσεις του καταστατικού νόμου της συνάφειας ανάμεσα στους ερευνητές του θέματος και πόσο μάλλον όταν υπεισέρχονται περιβαλλοντικοί παράγοντες υποβάθμισης των κατασκευών όπως η διάβρωση. Το διάγραμμα αδιαστατοποιημένης αντοχής συνάφειας (Bond loss) είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν χρειάζεται μια ευρύτερη σύγκριση με δοκίμια διαφόρων κατασκευαστικών στοιγείων αφού επιτρέπει τη «συνεννόηση» μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων καθώς και τη σύγκριση με κανονιστικά πρότυπα εν αντιθέσει με το διάγραμμα τάσης συνάφειας που αποφαίνεται μόνο για το συγκεκριμένο είδος δοκιμίου.



Διάγραμμα 5.3.3 Αντοχή Συνάφειας των προσομοιώσεων σε σύγκριση με το Model Code και τα πειραματικά δεδομένα για δοκίμια με συνδετήρες



Διάγραμμα 5.3.4 Αντοχή Συνάφειας των προσομοιώσεων σε σύγκριση με το Model Code και τα πειραματικά δεδομένα για δοκίμια με συνδετήρες

5.3.1 ΟΛΙΣΘΗΣΗ (SLIP)

Για λόγους πληρότητας της εργασίας πρέπει να αναφερθούμε και στη παρατηρούμενη ολίσθηση κατά τη καταγραφή του μέγιστου φορτίου *F_{max}*. Τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων

μετά από σύγκριση καταδεικνύουν ,ότι ο συγκεκριμένος τρόπος μοντελοποίησης δεν είναι ο ορθότερος για να μπορέσει να ανιγνεύσει σωστά την ολίσθηση που παρατηρείται κατά το πείραμα. Συγκεκριμένα όσο μειώνεται η περίσφιγξη τόσο πιο πολύ απόκλιση παρουσιάζεται στα αποτελέσματα των προσομοιώσεων σε αντιστοίγιση με τα πειραματικά. Η ολίσθηση που παρατηρείται στη ράβδο στη περίπτωση των Ø8/120mm είναι μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιγη στα δοκίμια γωρίς συνδετήρες και αυτό διότι στη πρώτη περίπτωση περιορίζονται οι ρωγμές διάρρηξης λόγω διάβρωσης και οι ρωγμές λόγω της μετέπειτα φόρτισης του δοκιμίου, οπότε και περιορίζεται καλύτερα η περιοχή πλησίον του δεσμού συνάφειας. Επίσης η διάβρωση «ενθαρρύνει» την ολίσθηση της ράβδου καθότι καταστρέφει τη χημική πρόσφυση, απομειώνει το ύψος των νευρώσεων και παρεμβάλλεται ένα νέο στρώμα υλικού οξειδίων του σιδήρου με πολύ μικρές τιμές μέτρου ελαστικότητας (μερικά GPa, κατά [61]), που αποτέλεσμα έγουν μεγάλη παραμόρφωση υπό μικρές τάσεις. Οπότε οι τιμές της ολίσθησης εύλογα αυξάνουν με αύξηση της απώλειας μάζας και στις δυο κατηγορίες δοκιμίων. Στο μοντέλο που έχει κατασκευαστεί στο ABAQUS η επίδραση που έχει η διάβρωση στην αύξηση της ολίσθησης λόγω αυτής της παρεμβολής των οξειδίων, δεν μπορεί να επιτευχθεί με βάση το μοντέλο έλξης αποχωρισμού, κυρίως γιατί δεν προκύπτει μειωμένη τιμή της δυσκαμψίας K_{ss} , K_{tt} με αυξανόμενη τιμή της διάβρωσης ,αλλά και ούτε υπεισέργεται κάποιος παράγοντας που να ευνοεί την ολίσθηση όπως συμβαίνει πειραματικά. Στα αποτελέσματα των Πινάκων 5.3.1 και 5.3.3.η τιμή της δυσκαμψίας Kss αυξάνει όσο αυξάνει η απώλεια μάζας των οπλισμών των δοκιμίων.

ΟΛΙΣΘΗΣΗ(mm)	25-N-0	25-N-1	25-N-2	25-N-3	25-N-4	25-N-5	
ПЕІРАМА	1.27	2.07	1.48	1.29	1.96	2.05	
ABAQUS	1.176	1.22	0.985	0.9	0.85	0.827	
Πίνακας 5.3.1.2 Αποτελέσματα ολίσθησης δοκιμίων χωρίς συνδετήρες πειράματος και προσομοίωσης							
ΟΛΙΣΘΗΣΗ(mm)	25-N-0	25-N-1	25-N-2	25-N-3	25-N-4	25-N-5	
ΠΕΙΡΑΜΑ	1.76	2.14	2.84	3.55	4.57	0.78	
ABAQUS	0.5	0.53	0.29	0.23	0.2	0.17	

Πίνακας 5.3.1.1 Αποτελέσματα ολίσθησης δοκιμίων με συνδετήρες (φ8/120) πειράματος και προσομοίωσης

5.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕ ΤΙΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ

Τα διαγράμματα τάσης συνάφειας προς ολίσθηση που προκύπτουν από το ABAQUS για τη κατηγορία των δοκιμίων με συνδετήρες αποτυπώνονται στα 5.4.1 έως 5.4.4. Λόγω έλλειψης όλων των πειραματικών καμπυλών έγινε μόνο σύγκριση με τα δοκίμια 25-S120-0, 25-S120-1, 25-S120-4, 25-S120-5 και για τα δοκίμια χωρίς εγκάρσιο οπλισμό, 25-N-0, 25-N-3, 25-N-4.Τα τελευταία φαίνονται στα Διαγράμματα 5.4.5 έως 5.4.7.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ Ø8/120 mm



Διάγραμμα 5.4 1 Τάσης συνάφειας προς ολίσθηση για το δοκίμιο 25-S120-0





ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ ΕΓΚΑΡΣΙΟ ΟΠΛΙΣΜΟ





Διάγραμμα 5.4 7 Τάση Συνάφειας προς Ολίσθηση για το δοκίμιο 25-Ν-4

Αξιολογώντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την ερμηνεία των οδηγιών του Model Code για τα δοκίμια με μέτρια περίσφιγξη (συνδετήρες Ø8/120mm) και χωρίς περίσφιγξη, διαπιστώνει κανείς πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα στο μοντέλο αυτής της εργασίας. Οπότε μπορούμε να προβούμε στα εξής σχόλια:

- Καλή πρόβλεψη της συμπεριφοράς του δοκιμίου σε όρους ολίσθησης s και τάσης τ μέχρι το μέγιστο φορτίο F_{max}. Υπάρχει γραμμική σχέση σε όλα τα δοκίμια.
- Ανίχνευση με αρκετά μικρή απόκλιση της μέγιστης αναπτυσσόμενης τάσης συνάφειας
 σε όλες τις περιπτώσεις των δοκιμίων με συνδετήρες.
- Δείχνει να συμβαδίζει η κλίση της καμπύλης για τα δοκίμια με συνδετήρες μετά την ανίχνευση του μέγιστου φορτίου με την αντίστοιχη πειραματική, παρόλο που τα πειραματικά δεδομένα δεν δείχνουν σαφή εικόνα για την συμπεριφορά των δοκιμίων μετά από αυτό το σημείο. Μπορεί η πρόβλεψη της απόκρισης της συνάφειας να είναι καλή για τα δοκίμια 25-S120-0 και 25-S120-4 εν αντιθέσει με τις άλλες δύο μορφές καμπύλης, που δείχνουν μία ραγδαία πτώση στο πειραματικό αποτέλεσμα της τάσης συνάφειας του δοκιμίου 25-S120-1 μετά το τοπικό μέγιστο και μία διατήρηση της αντοχής συνάφειας στο δοκίμιο με τη χειρότερη υποθετικά υποβάθμιση δεσμού λόγω διάβρωσης.
- Το Model Code καλώς προτείνει αυτό το μοντέλο συνάφειας (Εικόνα 4.2.1) σε ότι αφορά τα δοκίμια με τους συνδετήρες μέτριας περίσφιγξης (Ø8/120 mm).
- Τα δοκίμια χωρίς συνδετήρες παρουσιάζουν μια πιο ακανόνιστη συμπεριφορά πλην όμως ότι και αυτά εμφανίζουν γραμμική σχέση τ-s πριν το μέγιστο φορτίο. Οι προβλέψεις αυτής της γραμμικής σχέσεις όσο αυξάνει το επίπεδο διάβρωσης αδυνατούν να προσεγγίσουν σε καλό επίπεδο τη πραγματικότητα σε αντίθεση με τα περισφιγμένα δοκίμια που είναι πολύ ικανοποιητικές. Η κλίση δείχνει να υπερεκτιμάται από το Model Code.
- Ωστόσο κακές είναι οι προβλέψεις της ολίσθησης όσο χειροτερεύει η ποιότητα του δεσμού λόγω διάβρωσης. Στα δοκίμια που έχουν υποστεί βλάβη του δεσμού λόγω διάβρωσης δεν αξιολογείται θετικά το μοντέλο της παρούσας εργασίας. Χρειάζεται βελτιώσεις όπως και το Model Code πρέπει να προτείνει ένα πλαίσιο για τη συμπεριφορά του νόμου συνάφειας- ολίσθησης υπό μεγαλύτερα επίπεδα διάβρωσης.
- Σημαντική παρατήρηση είναι ότι για το δοκίμιο του Διαγράμματος 5.4.5 η καμπύλη είναι γραμμική μέχρι τη θραύση καθώς στο συγκεκριμένο πείραμα υπήρξε αστοχία εξόλκευσης της ράβδου από διατμητική αστοχία του σκυροδέματος παράλληλα με τις νευρώσεις του χάλυβα. Στις υπόλοιπες καμπύλες τάσης-ολίσθησης η αστοχία είναι από ρωγμές διάρρηξης και παρατηρείται υπό γενικό πλαίσιο ο ίδιος νόμος για τη συμπεριφορά του δεσμού[63]. Βέβαια στη μοντελοποίηση με το ABAQUS, υποτέθηκε ότι η αστοχία είναι αστοχία

διαρρήξεως και καταλήγουμε σε αποτυχία πρόβλεψης της πραγματικής κατάστασης για το συγκεκριμένο δοκίμιο.

Γενικό σχόλιο από παρατήρηση όλων των διαγραμμάτων είναι ότι αποτυπώνεται ξεκάθαρα η τυχαιότητα του φαινομένου της διάβρωσης του οπλισμού και η δυσκολία πρόβλεψης της συμπεριφοράς της συνάφειας του κατασκευαστικού μέλους Ο/Σ, μετά την μέγιστη αντίσταση που καταγράφεται. Οι μορφές που ακολουθεί η καμπύλη αυτή είναι γραμμικού και συνηθέστερα εκθετικού τύπου χωρίς να υπάρχει κάποια σχέση με αύξηση του επιπέδου της διάβρωσης. Η κλίση αυτής της καμπύλης στο Model Code ορίζεται ως γραμμική.

5.4.1 ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΡΟΠΩΝ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το σκυρόδεμα ως υλικό δεν είναι ομοιογενές. Αποτελείται από αδρανή υλικά, τσιμέντο και νερό καθώς και διεπιφανειακές ζώνες δεσμού (ITZ) των αναμιχθέντων υλικών. Το σχήμα των αδρανών υλικών και τα κενά που υπάργουν στην μικροδομή επηρεάζουν τον σχηματισμό μικρορωγμών και έγουν σαφή ρόλο στη διάδοση των ρωγμών αυτών. Επομένως μια ακριβής μοντελοποίηση του υλικού θα απαιτούσε εισαγωγή των πραγματικών γεωμετρικών λεπτομερειών των υλικών που απαρτίζουν το σκυρόδεμα καθώς και τη μηχανική συμπεριφορά καθενός υλικού που το απαρτίζουν. Τέτοιου είδους μοντελοποίηση υλικού συνδέει άμεσα την εσωτερική μικροδομή του υλικού με την μηγανική απόκριση σε εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία και μπορεί να γίνει πρόβλεψη της ανάπτυξης του πραγματικού δικτύου των ρωγμών σε κατάσταση αστοχίας της κατασκευής. Βέβαια η μηγανική συνεχούς μέσου είναι ένα εργαλείο μακροσκοπικής κλίμακας που μας επιτρέπει να εκτιμήσουμε τη βλάβη και τον τρόπο αστογίας των κατασκευών γωρίς να γρειάζεται η πιο πάνω θεώρηση. Ειδικά στο ABAOUS για τις προσομοιώσεις της εργασίας, η εκτίμηση της αστοχίας των δοκιμίων κατά το πείραμα εξόλκευσης των ράβδων υλοποιήθηκε με το Concrete Damage Plasticity Model, που επιτρέπει την μοντελοποίηση ψευδό-ψαθυρών υλικών γρησιμοποιώντας θεωρήματα και αρχές της θεωρίας ελαστικότητας και πλαστικότητας. Με γρήση της συνάρτησης DAMAGET παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αστογίας στο σκυρόδεμα, όπου η βλάβη στο υλικό λαμβάνεται από τη μοντελοποίηση να προκύπτει από τα πεπερασμένα στοιχεία όπου η ισοδύναμη τάση των στοιχείων ξεπερνάει τη μέγιστη εφελκυστική τάση του σκυροδέματος. Στο σημείο αυτό όπου dt=0 (έναρξη ρηγμάτωσης) θεωρείται ότι ξεκινάει η

ρηγμάτωση και εξελίσσεται μέχρι την παραμόρφωση ε_{cr} όπου η παράμετρος βλάβης λαμβάνει τιμή dt=97.75 και θεωρήθηκε ως ολοκληρωτική αστοχία. Το μοντέλο ωστόσο δεν ενδείκνυται για υπολογισμός πλάτους ρωγμής καθώς είναι αρκετά ευαίσθητο ως προς το μέγεθος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται. Είναι περισσότερο ποιοτικό ως προς την αποτύπωση του μοτίβου ρωγμών που πρόκειται να παρατηρηθούν σε μια μοντελοποιημένη κατασκευή παρά ποσοτικής σύγκρισης της βλάβης με το πλάτος ρωγμών. Στις Εικόνες 5.4.1.1 έως 5.4.1.3 φαίνονται οι ρωγμές διάρρηξης των δοκιμίων 25-S120-1, 25-S120-4, 25-S120-5 για σύγκριση με τα δεδομένα αστοχίας που προβλέπει το ABAQUS Damaged Plasticity Modeling.

DAMAGET (Avg: 75%)

> 0.163 0.081 0.000







Εικόνα 5.4.1 1 α)Πειραματικό Δοκίμιο 25-S120-1 όψη κάτοψης β) Ρηγμάτωση στην κάτοψη γ) Ρηγμάτωση στη πίσω όψη δ) Ρηγμάτωση εντός του δοκιμίου σε κεντρική ημιτομή





Εικόνα 5.4.1 2 α)Πειραματικό Δοκίμιο 25-S120-4 όψη κάτοψης β) Ρηγμάτωση στην κάτοψη γ) Ρηγμάτωση στη πίσω όψη δ) Ρηγμάτωση εντός του δοκιμίου σε κεντρική ημιτομή





Εικόνα 5.4.1 3 α)Πειραματικό Δοκίμιο 25-S120-5 όψη κάτοψης β) Ρηγμάτωση στην κάτοψη γ) Ρηγμάτωση στη πίσω όψη δ) Ρηγμάτωση εντός του δοκιμίου σε κεντρική ημιτομή

Αποτιμώντας τα αποτελέσματα που φαίνονται στις Εικόνες 5.4.1.1 έως 5.4.1.3 η συσχέτιση μεταξύ της πραγματικής και προσομοιωμένης κατάστασης εστιάζεται μόνο στη κάτοψη του δοκιμίου όπου ανιχνεύεται η αστοχία μόνο ποιοτικά, με τη ρηγμάτωση να ξεκινάει λόγω μικρορωγμών κοντά στη περιοχή του δεσμού και να φθάνει στην επιφάνεια με το μικρότερο πάχος επικάλυψης σε όλο το μήκος του δοκιμίου. Αναμεταξύ των δοκιμίων μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι καθώς αυξάνεται η διάβρωση και συνεπώς απομειώνεται στο μοντέλο μας η αντοχή του σκυροδέματος σε μεγαλύτερη περιοχή περιοχή πέριξ του δεσμού, ότι οι ρηγματώσεις λαμβάνουν χώρα σε μεγαλύτερη έκταση. Αυτό προκύπτει από εξέταση των όψεων των Εικόνων γ) όπου είναι ανύπαρκτη η ρηγμάτωση σε διάβρωση 1.17% και πολλή εντονότερη στη περίπτωση διάβρωσης 8.32%.

Ο τύπος αστοχίας στο πείραμα εξόλκευσης για δοκίμια με εγκάρσιους συνδετήρες, λόγω της καλύτερης αγκύρωσης της ράβδου που προσφέρεται από την περίσφιγξη και τις νευρώσεις των χαλύβων B500C οδηγείται σε αστοχία διαρρήξεως του σκυροδέματος με εμφάνιση ρωγμών που ξεκινούν από τα ύψη των νευρώσεων όπου αναπτύσσονται ζώνες εφελκυστικών τάσεων και οδηγούνται με τη συνένωση των μικρορωγμών αυτών προς την εξωτερική επιφάνεια του μέλους. Καθοριστικό ρόλο σε αυτό έχει η διάβρωση που ανάλογα την επιδείνωση της αντοχής του δεσμού που προσφέρτιση. Οδηγεί την αστοχία του δεσμού όταν επιβληθεί φόρτιση, σε αστοχία εξόλκευσης χωρίς περαιτέρω σημαντική αύξηση της ρηγμάτωσης του σκυροδέματος αφού λόγω των ρωγμών Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχ/κων – Εφαρμοσμ. Μηχ/κης & Τεχν.Υλικών 74

διαρρήξεως περιμετρικά του οπλισμού και της απομείωσης των υψών των νευρώσεων χάνεται η σύνδεση των δύο υλικών. Βέβαια αυτό είναι σχετικό καθώς εξαρτάται από τη γεωμετρία του μέλους, την ύπαρξη θλιπτικής πιέσεως γύρω από το δεσμό χάλυβα σκυροδέματος και τον βαθμό διάβρωσης της δοκού και των οπλισμών αλλά γενικά αυτό είναι το ισχύον καθεστώς.

Γενικά ο τρόπος αστοχίας είναι δύσκολο να προβλεφθεί και να μοντελοποιηθεί για κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος και μάλιστα παρουσία διάβρωσης. Είναι κυρίως ποιοτική και ενδεικτική η αποτύπωση της μορφής αστοχίας των προσομοιώσεων που υλοποιήθηκαν με αρκετά καλή συμφωνία αλλά όχι η πραγματική κατάσταση σε όρους πλάτους ρωγμών και πρόβλεψης του δικτύου ρωγμών που μπορεί να αναπτυχθεί με εντελώς τυχαίο τρόπο. Πρέπει και εδώ να πούμε να πούμε ότι είναι αναγκαίο να διεξαχθούν αναλύσεις με βάσει το μοντέλο της εργασίας και για περισσότερους τύπους παρεμφερών δοκιμίων για να έχουμε πιο ορθά συμπεράσματα

5.5 ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σχετικά με την καταλληλόλητα του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων στο ABAQUS έγιναν οι απαραίτητοι χειρισμοί ώστε με χωρισμό της γεωμετρίας του δοκιμίου και σκυροδέματος και χάλυβα να αυξάνεται και να πυκνώνεται το πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων στη περιοχή που ενδιαφέρει. Όπως έχουμε αναφερθεί για λόγους μοντελοποίησης διάβρωσης απαραίτητη ήταν η ακτίνα μετώπου των ρωγμών (Κεφάλαιο 2.2.3) και ως προς τα κατασκευαστικά στοιχεία η δράση της περίσφιγξης των συνδετήρων. Για τους λόγους αυτούς και για λόγους ακρίβειας κοντά στη περιοχή του δεσμού χάλυβα σκυροδέματος ήταν αναγκαίο να χωριστεί σε διάφορα τμήματα η γεωμετρία και επακόλουθα να υπάρχουν αλλού πυκνότερα και αλλού αραιότερα πλέγματα (Εικόνα 5.5.1). Χρησιμοποιήθηκε αρκούντως μεγάλος αριθμός στοιχείων σε κάθε ανάλυση. Στη ζώνη που όριζε η ακτίνα του μετώπου ρωγμών ,το μέσο μέγεθος πεπερασμένου στοιχείου κυμαινόταν από *Ι* έως *1.55 mm* από ανάλυση σε ανάλυση και έξω από αυτή τη ζώνη μειωνόταν σταδιακά.



Εικόνα 5.5.1 Χωρισμός γεωμετρίας σκυροδέματος στο ABAQUS

Για λόγους σύγκλισης της λύσης θα αναφέρουμε ενδεικτικά ένα παράδειγμα για το δοκίμιο 25S-120-3 με 3 διαφορετικά πλέγματα μικρότερης και μεγαλύτερης πυκνότητας από αυτήν που χρησιμοποιήθηκε στα αποτελέσματα της εργασίας, ώστε να δειχθεί η ακριβής λήψη των ορθότερων αποτελεσμάτων. Ως προς τον τύπο των στοιχείων, χρησιμοποιήθηκαν κυβικά γραμμικά στοιχεία C3D8R [12] μειωμένης ολοκλήρωσης (Gauss reduced integration) λόγω μείωσης του αριθμού των απαιτούμενων σημείων ολοκλήρωσης εντός του πεπερασμένου στοιχείου και εξοικονόμησης χρόνου. Γενικά η ολοκλήρωση με full integration υπερεκτιμά τη δυσκαμψία της κατασκευής ενώ με reduced integration η δυσκαμψία προσεγγίζει τη πραγματική τιμή καλύτερα. Αρνητικό της μειωμένης ολοκλήρωσης (reduced integration) είναι το φαινόμενο αναληθούς ή ψευδούς παραμόρφωσης των στοιχείων (hourglass effect) [62] που μπορεί να συμβεί σε προβλήματα κάμψης ή σε μία πλεγματική διάταξη στοιχείων μη στοιχισμένη και ακανόνιστη .Ωστόσο δεν αναπτύσσονται καμπτικές ροπές και η διάταξη των 3D εξάεδρων κυβικών στοιχείων υλοποιήθηκε ώστε να είναι σε τάξη και στοιχισμένη με τους άξονες x,y,z.

Σύγκλιση λύσης δοκιμίου 25-S120-3

Από την ανάλυση σύγκλισης με 4 διαφορετικές πυκνότητες πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων προκύπτει το συμπέρασμα ότι η λύση συγκλίνει. Από εξέταση του διαγράμματος 5.5.1 μετά το αραιό πλέγμα των 28.132 πεπερασμένων στοιχείων (Mesh 1) οι καμπύλες που παρουσιάζονται δείχνουν σχεδόν πανομοιότυπες.



Διάγραμμα 5.5 1 Καμπύλες δύναμης ολίσθησης διαφορετικής πλεγματικής πυκνότητας πεπερασμένων στοιχείων

Με αύξηση περαιτέρω του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων δεν υπάρχει βελτίωση ως προς το εξαγόμενο αποτέλεσμα . Από τις 4 καμπύλες του διαγράμματος προτιμήθηκε η καμπύλη Mesh 3 με 60.268 πεπερασμένα στοιχεία. Η πύκνωση του αριθμού των πεπερασμένων στοιχείων γινόταν μόνο πέριξ του δεσμού και εντός της κυλινδρικής ζώνης που όριζε η ακτίνα του μετώπου ρωγμών σύμφωνα με το σχήμα 5.5.1.



Σχήμα 5.5 1 Αποτύπωση της ζώνης πύκνωσης πλέγματος για την προσέγγιση της λύσης στο ABAQUS

Τα 4 διαφορετικά ως προς τον αριθμό πεπερασμένων στοιχείων μοντέλα είχαν αντίστοιχα στη κυλινδρική ζώνη 11.570 (Mesh 1), 15.440 (Mesh 2), 30.992 (Mesh 3) και 36.140 (Mesh 4). Η λήψη της βέλτιστης λύσης προϋπέθετε την πύκνωση των στοιχείων πέριξ του δεσμού. Μακριά από αυτή τη περιοχή δεν ενδιέφερε αύξηση των πεπερασμένων στοιχείων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η ανάπτυξη του μοντέλου της διάβρωσης του οπλισμού και της προσομοίωσης του πειράματος εξόλκευσης με τη χρήση του πακέτου πεπερασμένων στοιχείων ABAQUS, χρησιμοποιήθηκε για την περίπτωση διαβρωμένου και μη διαβρωμένου οπλισμού εγκιβωτισμένου σε πρισματικό δοκίμιο σκυροδέματος με περίσφιγξη εγκάρσιων οπλισμών και σε δοκίμια χωρίς περίσφιγξη. Για το σκοπό της προσομοίωσης αυτής ,έγινε στατική ανάλυση του μη γραμμικού μοντέλου με χρήση της πλαστικής βλάβης σκυροδέματος για τη συμπεριφορά του δοκιμίου (Concrete Damage Plasticity Model). Η σύσταση του μοντέλου συμπεριφοράς της συνάφειας χάλυβα σκυροδέματος έγινε με βάση τις οδηγίες του Model Code 2010 για τη συνάφεια, υπό επίδραση του παράγοντα διάβρωση και με εξέταση της περίσφιγξης ή απουσίας αυτής. Στο ABAQUS ο νόμος που περιγράφει τη συμπεριφορά της συνάφειας είναι ο νόμος έλξης απογωρισμού των δύο επιφανειών (surface based cohesive behavior) $\gamma \alpha \lambda \nu \beta \alpha$ (master surface) και σκυροδέματος (slave surface).Ou επιπτώσεις της διάβρωσης στη συνάφεια, προήλθαν από τις οδηγίες του Model Code με βάσει το μέσο βάθος διείσδυσης στον σιδηρο-οπλισμό και μπορούσαν να τροποποιηθούν κατάλληλα οι καμπύλες συνάφειας-ολίσθησης για την συμπερίληψη όλων των δοκιμίων. Οι επιπτώσεις στο σιδηρο-οπλισμό συνοψίστηκαν σε απώλεια μηγανικών ιδιοτήτων και ειδικά μέτρο ελαστικότητας ,όριο διαρροής, όριο θραύσης και ολκιμότητα. Ενώ για το σκυρόδεμα υπολογίστηκε η έκταση της επίδρασης της ομοιόμορφα προσβαλλόμενης ράβδου ως συμμετρική βλάβη γύρω από αυτή ,με μείωση της αντοχής του υλικού στη περιοχή αυτή σε θλίψη και εφελκυσμό.

Η επικύρωση της ισχύος του αναπτυγμένου μοντέλου με τα πειραματικά αποτελέσματα των καμπυλών τάσης συνάφειας-ολίσθησης [9] και τρόπου αστοχίας των δοκιμίων, εξετάστηκε για διαφορετικά επίπεδα διάβρωσης η αντοχή συνάφειας για δύο περιπτώσεις περίσφιγξης ,με συνδετήρες Ø8/120 mm και χωρίς συνδετήρες τροποποιώντας τις ζώνες επιρροής της διάβρωσης στο σκυρόδεμα και αντίστοιχα στο χάλυβα. Από τα αποτελέσματα της εργασίας του Κεφαλαίου 5 μπορούν να εξαχθούν τα κάτωθι συμπεράσματα:

 Η προσομοίωση του πειράματος εξόλκευσης με τρισδιάστατα πεπερασμένα στοιχεία στο ABAQUS με το τρόπο που αναλύθηκε και ειδικά με το νόμο συνεκτικότητας (νόμος έλξης

αποχωρισμού των επιφανειών χάλυβα σκυροδέματος) ανάμεσα στα δύο κομμάτια του μοντέλου ήταν ο ευκολότερος και γρηγορότερος τρόπος για τη προσομοίωση του δεσμού των δύο υλικών σε σχέση με άλλους τρόπους όπως συνεκτικά στοιχεία που θα μπορούσαν να τοποθετηθούν στη διεπιφάνεια. Προϋπόθεση είναι η χρήση σωστών τιμών των επιμέρους δυσκαμψιών, έναρξης και διάδοσης της βλάβης για το δεσμό των δυο υλικών, που λαμβάνονται βέβαια από το Model Code.

- Το μοντέλο πλαστικής βλάβης και θεώρησης του σκυροδέματος ως ισότροπο ελαστικό υλικό χρήζει αποδοχής στο συγκεκριμένο προσομοιωμένο πείραμα καθώς και μετά την εισαγωγή των δεδομένων διάβρωσης.
- Οι ρηγματώσεις είναι αρκετά κοντά στη πραγματική κατάσταση και διακρίνεται μια πύκνωση των ρωγμών με αύξηση της διάβρωσης του οπλισμού.
- Το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων είναι χρήσιμο στην εύρεση του φορτίου αστοχίας του δεσμού και του τρόπου αστοχίας των δοκιμίων (ρωγμές διάρρηξης και εξόλκευση ράβδου με διατμητική αστοχία) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για τη πρόβλεψη της συμπεριφοράς της συνάφειας σε κατασκευές με διαβρωμένους χάλυβες και με ύπαρξη εγκάρσιου οπλισμού υπό τον όρο ότι δεν διαβρώνονται οι εγκάρσιοι οπλισμοί. Παρόλο που σε μια πραγματική κατασκευή η οξείδωση μπορεί να συμβαίνει σε όλους τους οπλισμούς εδώ μελετήθηκε με την υπόθεση μη προσβολής των συνδετήρων. Σε επόμενες προσομοιώσεις θα μπορεί να μοντελοποιηθεί και η διάβρωση των συνδετήρων, όπως έγινε και με τη περίπτωση της αγκυρωμένης ράβδου Ø16mm στην εργασία αυτή.
- Πρόσθετη δουλειά πρέπει να γίνει για καλύτερη πρόβλεψη της ολίσθησης των διαβρωμένων κυρίως δοκιμίων στα οποία η πραγματική ολίσθηση είναι μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει από το ABAQUS με χρήση των οδηγιών του Model Code με φανερή απόκλιση όσο αυξάνει η διάβρωση του οπλισμού. Η διαδικασία υπολογισμού όπως προκύπτει από το Model Code για το δ_{init} θα έπρεπε να μεγαλώνει με αυξανόμενο το επίπεδο διάβρωσης κάτι που δεν συμβαίνει και επομένως είναι ο κύριος λόγος που παρατηρούνται κακές προβλέψεις για την ολίσθηση της ράβδου στο μέγιστο φορτίο Fmax.

6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Με αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και παίρνοντας υπόψιν τα συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε στις ακόλουθες προτάσεις για τη βελτίωση του μοντέλου και εξέλιξη του:

- Η εργασία που έχει γίνει μπορεί κάλλιστα να εφαρμοστεί σε πειραματικά αποτελέσματα άλλων ερευνητών με σκοπό τη προσομοίωση του πειράματος είτε είναι δοκίμιο κάμψης τριών σημείων ή τεστ εξόλκευσης υπό γνωστό πάντα επίπεδο διάβρωσης.
- Επιπρόσθετη δουλειά πρέπει να γίνει όσον αφορά το επίπεδο περίσφιγξης και την επίδραση του στη συνάφεια, με αλλαγές σε παραμέτρους διαστάσεων της επικάλυψης και της διαμέτρου των χρησιμοποιούμενων ράβδων είτε εγκάρσιου οπλισμού είτε της υπό εκτίμησης ράβδου.
- Επίσης, η προσομοίωση του δεσμού γίνεται με το διγραμμικό μοντέλο έλξης αποχωρισμού που εφαρμόστηκε λόγω της ταύτισης του με τις οδηγίες του Model Code παρόλο που η σύγκριση με τις πειραματικές καμπύλες καταδεικνύει ότι η συμπεριφορά είναι γραμμικά αυξανόμενη μέχρι τη μέγιστη τάση συνάφειας και επακόλουθα εκθετικά μειούμενη. Οπότε προτείνεται σαν σχεδιαστική βελτίωση η χρήση εκθετικού νόμου για τη περιοχή χαλάρωσης μετά την μέγιστη τάση συνάφειας.
- Σχεδιαστική βελτίωση είναι και η χρήση της ενέργειας θραύσεως G_F (N/m), για τη πρόβλεψη της αστοχίας της συνάφειας με χρήση του Model Code 2010, ανεξάρτητα από τη τιμή δ_{evol} που χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα εργασία για την διάδοση ή καλύτερα πειραματική μελέτη της ενέργειας θραύσεως σε δοκίμια κάμψης τριών σημείων υπό διάβρωση, όπως προτείνεται από το πρότυπο [41].
- Για καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής κατάστασης, σε επόμενη εργασία πρέπει να ληφθούν υπόψιν και μετρήσεις διαβρώσεως των οπλισμών, διαμήκους και εγκαρσίου ανεξάρτητα από τη κύρια ράβδο του δοκιμίου.
- Επιπλέον ο προτεινόμενος τρόπος μελέτης συνάφειας με πεπερασμένα στοιχεία μπορεί να επεκταθεί και σε περίπτωση προσομοίωσης δυναμικής ανάλυσης.
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. ABAQUS (2014). ABAQUS 6.14 Documentation, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA
- 2. Hu B., Zhou, Y., Xing, F., Sui, L., & Luo, M. (2019). *Experimental and theoretical investigation on the hybrid CFRP-ECC flexural strengthening of RC beams with corroded longitudinal reinforcement*. Engineering Structures, 200, 109717
- 3. H. Lee, N. Takafumi, Tomosawa F. *Evaluation of the bond properties between concrete and reinforcement as a function of the degree of reinforcement corrosion*. Cement and Concrete Research 32 (2002) 1313–1318
- 4. Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50010-2010 Code for design of concrete structures.35 Beijing: China Architecture & Building Press; 2010
- 5. Haragli, M.; Hamad, B.; Karam, K. *Bond-slip response of reinforcing bars embedded in plain and fiber concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering, 2002, 14.6: 503-511
- 6. Mercan, Bulent. (2011). *Modeling and behavior of prestressed concrete spandrel beams*. Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy, https://hdl.handle.net/11299/112692.
- Zandi Hanjari, K. ; Kettil, P. ; Lundgren, K. (2011) "Analysis of Mechanical Behavior of Corroded Reinforced Concrete Structures". ACI Structural Journal, vol. 108(5), pp. 532-541
- 8. Bond and anchorage of embedded reinforcement: Background to the fib Model Code for Concrete Structures 2010: Technical report. fib-Fédération internationale du béton, 2014
- 9. Koulouris, Konstantinos; Apostolopoulos, Charis. *An experimental study on effects of corrosion and stirrups spacing on bond behavior of reinforced concrete*. Metals, 2020, 10, no 10: 1327.
- 10. EN-1992-1-1, Eurocode 2–Design of Concrete Structures. Part 1–1: General Rules and Rules for Buildings, Comité Européen de Normalisation (CEN), Brussels, Belgium, 2008.
- 11. Hejazi, F. Simplified damage plasticity model for concrete. Structural Engineering International, 2017, 5
- 12. Simulia D. ABAQUS 6.11 analysis user's manual. ABAQUS 611 Documentation, 2011
- 13. Cao, Vui V.; Ronagh, Hamid R. A model for damage analysis of concrete. Advances in concrete construction, 2013, 1.2: 187

- 14. Lubliner J, Oliver J, Oller S, & Onate E. *A plastic-damage model for concrete*. Int.J. Solids Struct. 1989; 25(3): 299–326.
- 15. Lee J, & Fenves GL. *Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures*. J. Eng. Mech. 1998; 124(8): 892–900.
- Ell-Maaddawy, T. E., Soudki, K., and Topper, T. Analytical Model to Predict Nonlinear Flexural Behavior of Corroded Reinforced Concrete Beams. ACI Structural Journal, 2005, 102 (4): 550-559
- 17. Ahmadi, Masoud; Kheyroddin, Ali; Kioumarsi, Mahdi. Prediction models for bond strength of steel reinforcement with consideration of corrosion. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 5829-5834
- 18. ACI 408R-03. Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension; ACI: Farmington Hills, MI, USA, 2012
- 19. CEB-FIP, 1990, "*Model Code for Concrete Structures*," Comité Euro-International du Béton, c/o Thomas Telford, London.
- 20. Fédération Internationale du Béton CEB-FIP Model Code 2010 vol. 1 (2010)
- 21. Mohammed Al-Huri. (2019). Numerical Investigation of RC Beam Strengthened with UHPFRC Layers Using Cohesive Surface Bonding Method. 5th International Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures, August 2019 in Potsdam, Germany (SMAR 2019), Saudi Arabia
- 22. Schlune, Hendrik. "Bond of corroded reinforcement. Analytical description of the bond-slip response." (2006).
- 23. Amleh, L., & Ghosh, A. (2006). *Modelling the effect of corrosion on bond strength at the steel-concrete interface with finite-element analysis*. Canadian Journal of Civil Engineering, 2006, 33(6), 673-682.
- 24. Du, Qixin. *Finite element modelling of steel/concrete bond for corroded reinforcement*. 2016. PhD Thesis. University of Ottawa
- 25. Tepfers R. *A theory of bond applied to overlapped tensile reinforcement splices for deformed bars*. Publication No. 73:2, Division of concrete structures. Goteborg: Charlmers University of Technology; 1973. 328 pp
- 26. Taqieddin Z. *Elasto-Plastic and Damage Modeling of Reinforced Concrete*. 2008. Ph.D. Dissertation, Louisiana State University, LA

- 27. Hyungrae K., Evaluation of Mechanical Performance of Corroded Reinforcement Considering the Surface Shape. ISIJ International, Vol. 49 (2009), No. 9, pp. 1392–1400
- 28. Wenjun Zhu. *Effect of corrosion on the mechanical properties of the corroded reinforcement and the residual structural performance of the corroded beams*. Civil Engineering. INSA de Toulouse, 2014. English . NNT : 2014ISAT0013. tel-01222175
- 29. Drakakaki, A. Study of the corrosion effect on the mechanical behavior of steel reinforcement. 2018. PhD Thesis. University of Patras
- 30. Tuutti, K. (1980). Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel [J]. ACI Special Publication ,(65), 223-236.
- 31. Weyers, R.E. (1998). Service Life Model for Concrete Structures in Chloride Laden Environments [J]. ACI Materials Journal, 95(4), 445-453.
- 32. Cairns, J., G. A. Plizzari, Y. Du, D. W. Law, and C. Franzoni. 2005. *Mechanical Properties of Corrosion-Damaged Reinforcement*. ACI Mat. J. 102(4), 256–264
- 33. Hongwei L. Yuxi Z. Effects of confinements on the bond strength between concrete and corroded steel bars. Construction and Building Materials ,Volume 118, 15 August 2016, 127-138
- 34. Lade, Otto-Arne. *Experimental and numerical crack form simulations of reinforced concrete beam*. (2018) Master's Thesis. University of Stavanger, Norway
- 35. Richard, Benjamin, et al. *A three-dimensional steel/concrete interface model including corrosion effects*. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77.6: 951-973.
- 36. Liu J., Hongshen Y., Renbo Z., Xiuli D. *A multi-stage mesoscopic numerical approach to simulate the flexural behavior of concrete beams with corroded rebars*. Engineering Structures, 2021, Vol 245, pp. 112913
- 37. Al-Sakkaf, Hamdi Ahmed. *Modelling of corroded reinforced concrete beams*. A thesis presented to the deanship of graduate studies, King Fahd university of petroleum and minerals, 2016, Saudi Arabia
- 38. ΝΕΟΣ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΧΑΛΥΒΩΝ ΟΠΛΙΣΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΤΧ. ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ ΚΑΙ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ. ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ. ΚΕΝΤΡΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΗΜΟΣΙΩΝ ΕΡΓΩΝ (ΚΕΔΕ). 2008, Αθήνα
- 39. *ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ*.ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΥΠΟΔΟΜΩΝ, ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ. ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΥΠΟΔΟΜΩΝ.ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ. 2016, Αθήνα

- 40. Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000 (ΕΚΩΣ 2000). Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (ΟΑΣΠ) .Σύλλογος Πολιτικών Μηχανικών Ελλάδος (ΣΠΜΕ). 2001, Αθήνα
- 41. Uday, Naik Partha. *Experimental determination of fracture energy by RILEM method*. Int. J. Eng. Sci (IJES), 2017, 6.03: 106-115
- 42. De Nardin, S., et al. *Non-linear analysis of the bond strength behavior on the steel-concrete interface by numerical models and pull-out tests*. In: Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond. 2005. p. 1-12
- 43. Arrayago I., Real E., Gardner L. *Description of stress–strain curves for stainless steel alloys.* Materials & Design. Vol. 87, December 2015, 540-552
- 44. Wang, X. H., & Liu, X. L. (2004). *Modelling effects of corrosion on cover cracking and bond in reinforced concrete*. Magazine of Concrete Research, 56(4), 191-199.
- 45. Pantazopoulou, S. J., & Papoulia, K. D. (2001). *Modeling cover-cracking due to reinforcement corrosion in RC structures*. Journal of Engineering Mechanics, 127(4), 342-351
- 46. Habibi S. *Finite Element Modelling of Corrosion Damaged Reinforced Concrete Structures.* (2017) Master 's Thesis .University of Toronto, Canada
- 47. Guifeng Z., Jiankun X., Yaoliang L., Meng Zhang, "Numerical Analysis of the Degradation Characteristics of Bearing Capacity of a Corroded Reinforced Concrete Beam", Advances in Civil Engineering, vol. 2018, Article ID 2492350, 10 pages, 2018
- 48. M. T. M. Soliman and C. W, Yu, "*The Flexural Stress-Strain Relationship of Concrete Confined by Rectangular Transverse Reinforcement*," Magazine of Concrete Research" Vol. 19, No 61, December 1967, pp 223-238
- 49. M. Sargin, S. K, Ghosh, and V. K. Handa," Effects of Lateral Reinforcement upon the Strength and Deformation Properties of Concrete," Magazine of Concrete Research, Vol. 23, No. 75-76, June September, 1971, pp. 99-110
- 50. Statista GmbH ,2021, assessed 2 February 2022 https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume
- 51. Zhang, M., Liu, R., Li, Y., & Zhao, G. (2018). Seismic performance of a corroded reinforce concrete frame structure using pushover method. Advances in Civil Engineering, 2018.
- 52. Du, Y. *Effect of reinforcement corrosion on structural concrete ductility*. 2001. PhD Thesis. University of Birmingham.

- 53. Γιαννόπουλος Π.Ι. Συνάφεια Ράβδων οπλισμού στο σκυρόδεμα. 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη, 25-27 Οκτωβρίου., 2006, Ελλάδα.
- 54. Hanjari, K.Z.; Lundgren, K.; Coronelli, D. Bond capacity of severely corroded bars with corroded stirrups. Mag. Concr. Res. 2011, 63, 953–968.
- 55. Cairns, J., Du, Y., & Law, D. (2007). *Influence of corrosion on the friction characteristics of the steel concrete interface*. Construction and Building Materials, 21(1), 190-197.
- 56. Al-Sulaimani, G. J., Kaleemullah, M., & Basunbul, I. A. (1990). *Influence of corrosion and cracking on bond behaviour and strength of reinforced concrete members*. ACI Structural Journal, 87(2).
- 57. Mangat P. S., and Elgarf, M. S. (1999) Flexural Strength of Concrete Beams with Corroding Reinforcement, ACI Structural Journal, V. 96, No. 1, pp. 149-158.
- 58. Lundgren, K (1999). Three-Dimensional Modelling of Bond in Reinforced Concrete. PHD Thesis, Chalmers University of Technology
- 59. Ngo, D. and Scordelis, A. C. (1967). Finite element analysis of reinforced concrete beams. J. Am. Concrete Inst., 64, 152-163
- 60. Koulouris, K., & Apostolopoulos, C. (2021). Study of the residual bond strength between corroded steel bars and concrete—A comparison with the recommendations of fib model code 2010. Metals, 11(5), 757
- 61. Xu, G., Liu, L., Bao, H., Wang, Q., & Zhao, J. (2017). *Mechanical properties of steel* corrosion products in reinforced concrete. Materials and Structures, 50(2), 1-10
- 62. https://www.quora.com/What-is-the-hourglass-effect-in-finite-element-analysis-How-does-the-reduced-integration-resulting-in-the-hourglass-effect-work-How-can-we-counter-the-hourglass-effect
- 63. Gan, Y., 2000. Bond stress and slip modeling in nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures. MS Thesis, University of Toronto
- 64. Lundgren, K., and Gylltoft, K. 2000. A model for the bond between concrete and reinforcement. Magazine of Concrete Research, **52**(1): 53–63.