



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ



**ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ**  
**ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ**  
**ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΖΩΗΣ**  
**ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ**  
**ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΣμηΕΑ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

της

**Παπαδάτου Αικατερίνης**

Επιβλέπων:

Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης | Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Αθήνα, Οκτώβριος 2021

ΣΠΜ-ΕΟΣ ΔΕ 2021/02

Παπαδάτου Ν. Α. (2021).  
Ανάπτυξη και εφαρμογή αυτοματοποιημένου υπολογιστικού μοντέλου εκτίμησης  
διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με χρήση ΣμηΕΑ  
Διπλωματική Εργασία ΣΠΜ-ΕΟΣ ΔΕ 2021/02  
Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Papadatou N. A. (2021).  
Development and Application of Automated Computational Model for the  
Estimation of Service Life of RC Infrastructures with Drones  
Diploma Thesis ΣΠΜ-ΕΟΣ ΔΕ 2021/02  
Laboratory of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens,  
Greece

## Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	viii
Abstract .....	ix
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Κατασκευές Οπλισμένου Σκυροδέματος .....	1
1.2.1 Το Οπλισμένο Σκυροδέμα (Ο.Σ).....	1
1.2.2 Φθορές Οπλισμένου Σκυροδέματος.....	2
1.3 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	3
2 Θεωρητικό Μέρος.....	5
2.1 Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος.....	5
2.2 Δράσεις Ανθεκτικότητας.....	6
2.3 Ο Μηχανισμός της Διάβρωσης .....	8
2.3.1 Συνέπειες Διάβρωσης.....	11
2.3.2 Ρηγμάτωση (Crack) και Αποκόλληση (Spalling).....	12
2.3.3 Το Νερό.....	13
2.3.4 Διάβρωση Παρουσία Χλωριόντων.....	14
2.3.5 Ενανθράκωση Σκυροδέματος.....	14
2.4 Μορφές Διάβρωσης.....	16
2.4.1 Γενική ή Ομοιόμορφη Διάβρωση.....	16
2.4.2 Τοπική Διάβρωση.....	17
2.4.3 Διάβρωση λόγω Ανάπτυξης Εξωτερικής Διαφοράς Δυναμικού .....	18
2.4.4 Διάβρωση υπό Μηχανική Τάση (stress corrosion) .....	18
3 Εκτίμηση Διάρκειας Ζωής Κατασκευής.....	19
3.1 Διάρκεια Ζωής.....	19
3.2 Προσεγγιστικά Μοντέλα Εκτίμησης Διάρκειας Ζωής.....	20
3.2.1 Μοντέλο Clear Kenneth (1976) .....	20
3.2.2 Μοντέλο Bazant (1979).....	21
3.2.3 Μοντέλο Tuutti (1982).....	23
3.2.4 Μοντέλο Morinaga (1988) .....	24
3.2.5 Μοντέλο Andrade (1998).....	25
3.2.6 Μοντέλο Wang and Zhao (1999) .....	25
3.2.7 Παραμετρική σύγκριση μοντέλων από Faiz Uddin Ahmed Shaikh (2018) ....	26
3.3 Εκτίμηση Διάρκειας Ζωής.....	29
3.3.1 Προτεινόμενη Μεθοδολογία Εκτίμησης Διάρκειας Ζωής .....	29
4 Μέθοδοι αποτίμησης κατάστασης υφιστάμενης κατασκευής .....	35
4.1 Διαθέσιμες μέθοδοι αποτίμησης κατάστασης υφιστάμενης κατασκευής .....	35
4.1.1 Επεμβατικές Μέθοδοι Αποτίμησης (Destructive Testing Methods).....	35
4.1.2 Μη-Καταστροφικές Μέθοδοι (Non-destructive Testing Methods).....	36
4.1.3 Η οπτική μέθοδος επιθεώρησης (Visual Inspection Method) .....	38
5 Θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη υπολογιστικής εφαρμογής.....	39
5.1 Ανάλυση της προγραμματιστικής εφαρμογής.....	40
5.1.1 Το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (Artificial Neural Network).....	40
5.1.2 Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου .....	44
5.1.3 Μεταφορά Μάθησης (Transfer Learning) .....	44

6	Πειραματικό Μέρος .....	46
6.1	Ανάπτυξη Υπολογιστικής Εφαρμογής σε περιβάλλον Matlab.....	46
6.2	Επεξεργασία εικόνων (Image Analysis and Processing).....	48
7	Αποτελέσματα και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων .....	54
7.1	Απόδοση της υπολογιστικής εφαρμογής και Διάγραμμα Ροής.....	54
7.2	Αποτελέσματα της Επεξεργασίας.....	56
7.2.1	1 <sup>η</sup> Σειρά Μέτρησης: .....	56
7.2.2	Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων.....	63
7.3	Εφαρμογή σε Γέφυρες.....	63
7.3.1	Γέφυρα Νέας Περάμου .....	65
7.3.2	Γέφυρα Μεγάρων.....	66
8	Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα .....	68
8.1	Συμπεράσματα.....	68
8.2	Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα .....	69
9	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	74

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.2.1 Αποκάλυψη Οπλισμού (Spalled Concrete).....	2
Σχήμα 1.2.2. Ρωγμές και spalling λόγω διάβρωσης.....	2
Σχήμα 1.3.1 Forth Road Bridge U.K. – Spencer Group.....	3
Σχήμα 1.3.2. Forth Road Bridge - Spencer Group .....	3
Σχήμα 1.3.3. Λήψη φωτογραφιών με επαγγελματική κάμερα (Γέφυρα Μεγάρων) (αριστερά) .....	4
Σχήμα 1.3.4. Οπτική Επιθεώρηση με Drone (κάτω και πάνω) .....	4
Σχήμα 2.1.1 Συμβολή των διαφόρων παραγόντων στη διάρκεια ζωής των υλικών (Ashby, Michael; Cebon, David; Shercliff, 2012). .....	6
Σχήμα 2.2.1. Μηχανισμός άμυνας σκυροδέματος στη διάβρωση.....	7
Σχήμα 2.2.2. Δράσεις Ανθεκτικότητας.....	7
Σχήμα 2.3.1. Αντιδράσεις στην άνοδο, κάθοδο, οξείδωσης και υδρόλυσης του διαβρωμένου χάλυβα.....	9
Σχήμα 2.3.2. Ηλεκτροχημικός σχηματισμός διάβρωσης .....	10
Σχήμα 2.3.3. Μηχανισμός Διάβρωσης .....	10
Σχήμα 2.3.4. Συσχέτιση του όγκου του σιδήρου με τον όγκο των προϊόντων των αντιδράσεων διάβρωσης .....	11
Σχήμα 2.3.5. Ανάπτυξη τάσεων λόγω διόγκωσης και σχηματισμός ρηγμάτωσης. .....	12
Σχήμα 2.3.6. Ρηγμάτωση δοκού και αποκόλληση σκυροδέματος λόγω διάβρωσης .....	13
Σχήμα 2.3.7. Επεξήγηση Αποκόλλησης Σκυροδέματος.....	13
Σχήμα 2.3.8. Η αποπαθητικοποίηση του χαλύβδινου οπλισμού .....	15
Σχήμα 2.4.1. Ομοιόμορφη διάβρωση (Κουρνέτας, Φεβρουάριος 2010) .....	16
Σχήμα 2.4.2. Τοπική Διάβρωση (Κουρνέτας, Φεβρουάριος 2010).....	17
Σχήμα 3.2.1. Μοντέλο Διάρκειας Ζωής Κατασκευής με Διάβρωση (Tuutti 1982) .....	24
Σχήμα 3.3.1. Απεικόνιση Γραμμικής Παλινδρόμησης μεταξύ πειραματικών και πραγματικών τιμών του $i_{cor}$ .....	29
Σχήμα 3.3.2. Επεξήγηση Διάρκειας Ζωής σύμφωνα με τους Torres et al. ....	31
Σχήμα 3.3.3. Διάγραμμα συσχέτισης αρχικής διαμέτρου οπλισμού με το χρόνο $t_{lim}$ .....	33
Σχήμα 3.3.4. Διάγραμμα συσχέτισης εναπομένουσας διάρκειας ζωής με διάμετρο ράβδου οπλισμού και Εύρος ρωγμής.....	34
Σχήμα 4.1.1. Διάγραμμα Ροής Προγράμματος .....	39
Σχήμα 5.1.1. Η δομική Μονάδα του Νευρωνικού Δικτύου: Ο νευρώνας.....	41
Σχήμα 5.1.2. Βηματική Συνάρτηση για τιμή $threshold = 0$ .....	41
Σχήμα 5.1.3. Η λογιστική Συνάρτηση για διάφορες τιμές του $\alpha$ (κλίσεις) .....	42
Σχήμα 5.1.4. Παράδειγμα αισθητήρα με 6 εισόδους και 4 νευρώνες εξόδου ...	43
Σχήμα 5.1.5. Πολυεπίπεδος αισθητήρας με δύο κρυφά επίπεδα.....	44
Σχήμα 6.1.1. Το GoogLeNet .....	46
Σχήμα 6.1.2. Στιγμιότυπο Εκπαίδευσης του GoogLeNet.....	47
Σχήμα 6.1.3. Κατηγοριοποίηση τυχαίων εικόνων από το δείγμα .....	48
Σχήμα 6.2.1. Μετατροπή αρχικής εικόνας ( $\alpha$ ) σε Grayscale ( $\beta$ ).....	49
Σχήμα 6.2.2. Διόρθωση εικόνας με Median Filter ( $\alpha$ ) και Gaussian Filter ( $\beta$ ) .50	

Σχήμα 6.2.3. Μορφολογική επεξεργασία και Blob Analysis .....	51
Σχήμα 6.2.4. Εξαγωγή συμπερασμάτων από τη μέτρηση των ρωγμών .....	52
Σχήμα 6.2.5. Εκτίμηση Εναπομένουσας Διάρκειας Ζωής .....	53
Σχήμα 7.1.1 Διάγραμμα Ροής Προγράμματος .....	55
Σχήμα 7.2.1. Αρχική εικόνα και υπο-εικόνα εστιασμένη στη ρωγμή-1 <sup>η</sup> σειρά μετρήσεων .....	56
Σχήμα 7.2.2. Αρχική εικόνα και υπο-εικόνες με ρωγμές- 2 <sup>η</sup> σειρά μετρήσεων	58
Σχήμα 7.2.3. Αποτέλεσμα Προγράμματος για Γέφυρα Μεγάρων .....	63
Σχήμα 7.3.1. Εικόνα από Drone (Γέφυρα Νέας Περάμου) .....	64
Σχήμα 7.3.2. Εικόνα από DSLR (Γέφυρα Μεγάρων) .....	64
Σχήμα 7.3.3. Εικόνα από Drone, Γέφυρα Νέας Περάμου.....	65
Σχήμα 7.3.4. Αποτέλεσμα Προγράμματος για Γέφυρα Ν. Περάμου .....	65
Σχήμα 7.3.5. Η γέφυρα των Μεγάρων .....	66
Σχήμα 7.3.6. Λεπτομέρειες επεξεργασίας υπό-φωτογραφιών από τη γέφυρα των Μεγάρων .....	67
Σχήμα 7.3.7. Λεπτομέρειες επεξεργασίας υπο-φωτογραφιών από τη γέφυρα των Μεγάρων .....	67

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 3.2.1. Συσχέτιση του αναμενόμενου χρόνου εμφάνισης φθοράς λόγω διάβρωσης με το ρυθμό διάβρωσης (Clear Kenneth) .....	20
Πίνακας 3.2.2. Σύνοψη της επίδρασης του εύρους ρωγμής στη διάβρωση του χάλυβα στο Ο.Σ. ....	27
Πίνακας 4.1.1. Επεμβατικές Μέθοδοι Αποτίμησης .....	36
Πίνακας 4.1.2. Κατηγοριοποίηση ΜΚΕ σύμφωνα με NMAB .....	37
Πίνακας 4.1.3. NDT μέθοδοι. D.M. McCann, M.C. Forde (McCann & Forde, 2001) .....	37
Πίνακας 7.2.1 Πίνακας αποτελεσμάτων 1 <sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων.....	57
Πίνακας 7.2.2. Πίνακας αποτελεσμάτων 2 <sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων.....	59
Πίνακας 7.2.3. Παράθεση Αποτελεσμάτων 3 <sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων.....	60
Πίνακας 7.2.4. Παράθεση Αποτελεσμάτων 4 <sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων.....	61
Πίνακας 7.2.5. Παράθεση Αποτελεσμάτων 5 <sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων.....	62

**Ανάπτυξη και εφαρμογή αυτοματοποιημένου υπολογιστικού  
μοντέλου εκτίμησης διάρκειας ζωής κατασκευών από οπλισμένο  
σκυρόδεμα με χρήση ΣμηΕΑ**

Παπαδάτου Ν. Α. (Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Ε.)

**Περίληψη**

Η διάβρωση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι κατασκευές κατά τη λειτουργία τους και συχνά εμφανίζεται μέσω των επιφανειακών φθορών. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται φθορές και συγκεκριμένα ρωγμές που εμφανίζονται σε κατασκευές από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο.Σ.) εξαιτίας της διάβρωσης, με σκοπό την εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής τους. Συγκεκριμένα, για την εξ' αποστάσεως αποτίμηση της λειτουργικής κατάστασης υφιστάμενων κατασκευών Ο.Σ., αναπτύσσεται αυτοματοποιημένη υπολογιστική εφαρμογή επεξεργασίας εικόνας και προτείνεται μεθοδολογία εκτίμησης της εναπομένουσας διάρκειας ζωής της, βασισμένη σε υφιστάμενα μοντέλα.

Για τις ανάγκες της εργασίας, αρχικά γίνεται θεωρητική ανάλυση των αιτιών που προκαλούν τις επιφανειακές φθορές, δίνοντας βαρύτητα κυρίως στη διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού εξαιτίας της δράσης χλωριόντων και της ενανθράκωσης. Στη συνέχεια παρατίθενται τα υφιστάμενα μοντέλα εκτίμησης της διάρκειας ζωής λόγω διάβρωσης με σκοπό την πρόταση μίας απλουστευμένης μεθοδολογίας, όπου μοναδικό δεδομένο για την εκτίμηση της διάρκειας ζωής αποτελούν τα χαρακτηριστικά της επιφανειακής φθοράς (π.χ. το εύρος ρωγμής). Τέλος, για την ανάπτυξη της υπολογιστικής εφαρμογής που μέσω της ψηφιακής εικόνας, θα υπολογίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τη θέση των επιφανειακών φθορών, αξιοποιείται η τεχνητή νοημοσύνη. Η τεχνητή νοημοσύνη διακρίνει και αξιοποιεί κατάλληλα την πληροφορία της οπτικής επιθεώρησης, δηλαδή εικόνων που έχουν ληφθεί από στατική κάμερα ή κάμερα ΣμηΕΑ.

Στόχος της εργασίας είναι η ανάπτυξη και εφαρμογή κατάλληλης μεθοδολογίας για την αρχική αποτίμηση της κατάστασης μίας υφιστάμενης κατασκευής που υποφέρει από τη διάβρωση ακόμα και όταν η πρόσβαση σε αυτή είναι δυσχερής, όπως π.χ. στην περίπτωση γεφυρών. Σε αυτό το πλαίσιο, γίνεται πιλοτική εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε δύο μελέτες περιπτώσεων, δηλαδή γεφυρών οι οποίες παρουσιάζουν εμφανείς βλάβες λόγω διάβρωσης.

**Λέξεις Κλειδιά:** Εύρος Ρωγμής, Επιφανειακές φθορές σκυροδέματος, Διάρκεια Ζωής Κατασκευής, Επιθεώρηση με ΣμηΕΑ (Drone), Ανάλυση Εικόνων, Νευρωνικά Δίκτυα (ΝΔ)



**Development and Application of Automated Computational Model  
for the Estimation of Service Life of RC Infrastructures with  
Drones**

Papadatou A. N. (2021) (supervised by Badogiannis E.)

**Abstract**

Corrosion of the steel rebars of the Reinforced Concrete (RC) is one of the most serious problems that the RC structures have to deal with, during their service life and most of the times, it appears through the formation of surface defects (i.e., cracks). This dissertation considers the study of the surface cracks due to the corrosion of the steel rebars, in order to estimate the residual service life of the structure by proposing a respective methodology. In particular, the development of an automated computational application using Artificial Intelligence (AI) technology and Image Analysis aims to assess remotely the condition of an existing RC structure and to estimate the residual service life using the proposed methodology.

Under the present dissertation, first of all, a theoretical analysis takes place concerning the natural causes and the mechanism of the steel corrosion (especially the chlorides' penetration and carbonation). Then, after reviewing the existing models concerning the estimation of the residual life, a new methodology is proposed respectively. Concretely, the objective of this methodology is to estimate the residual service life of an RC structure, only by knowing the width of the crack that has been created by the rebar corrosion. Last but not least, the AI technology is being used for the development of the automated computational application, which will be able to locate the crack on the images taken by Drones or cameras, calculate its width and estimate the residual service life of the corroded structure using the proposed methodology. AI technology is capable of discerning and deploying the information of the visual inspection, videlicet images that have been captured by Drone Cameras or Static Cameras.

The point of this thesis is the development and the application of an appropriate methodology in order to facilitate the in-situ inspection and the initial assessment of a structure that suffers from defects of corrosion even if it has large spans (i.e., bridges) and the access to them is risky and difficult. In addition, two pilot case studies of bridges are being held where the computational model is applied in order to assess the bridges' condition.

**Keywords: Crack Width, Surface Concrete Defects, Service Life, Inspection with Drone, Image Analysis, CNN**

## Ευχαριστίες

*Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον κ. Μπαδογιάννη Ευστράτιο, Αναπληρωτή Καθηγητή της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, για τη συνεργασία, την εμπιστοσύνη και τη συνολική καθοδήγηση που μου προσέφερε όλο το διάστημα της εκπόνησής της. Η αμεσότητα και η ουσιαστική ενασχόλησή του, καθώς και οι χρήσιμες συμβουλές και παρατηρήσεις του, αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα στη διεκπεραίωση της παρούσας εργασίας.*

*Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα Φερετζάκη Αλέξανδρο, η συνεισφορά του οποίου ήταν επίσης καθοριστική από την αρχή έως το πέρας. Τον ευχαριστώ θερμά για τη συνεργασία μας, για την εκτίμηση που μου έδειξε και για τη βοήθειά του τόσο στο θεωρητικό υπόβαθρο όσο και πρακτικά για την οργάνωση των απαραίτητων επισκέψεων καθώς και την παροχή του αντίστοιχου εξοπλισμού.*

*Τέλος, ευχαριστώ την οικογένεια και τους φίλους μου, που μου συμπαραστάθηκαν αμέριστα σε όλο αυτό το ταξίδι το οποίο επισφραγίζεται με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.*

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Γενικά

Το οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα ισχυρό, ανθεκτικό στο χρόνο δομικό υλικό που μπορεί να διαμορφωθεί σε πολλά διαφορετικά γεωμετρικά σχήματα και μεγέθη, προσφέροντας με αυτόν τον τρόπο μηχανική αλλά και αισθητική υπόσταση στην κατασκευή. Η συμβολή του στη σύγχρονη αρχιτεκτονική, τη διαμόρφωση της κατοικίας και των χώρων που φιλοξενούν κάθε είδος εργασίας στο σύγχρονο κόσμο, είναι σαφώς τεράστια. Το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει ανακηρυχθεί κυρίαρχος των δομικών υλικών στον κόσμο αλλά και την Ελλάδα καθώς έχει χαμηλό κόστος και συνδυάζει άψογα τις μηχανικές ιδιότητες των δυο υλικών από τα οποία και αποτελείται: του σκυροδέματος και του χάλυβα. Ωστόσο, όπως κάθε υλικό έτσι κι αυτό, κατά την περίοδο λειτουργίας της κατασκευής εμφανίζει φθορές, σημαντικές ή ασήμαντες. Ως αποτέλεσμα, κατά τη διάρκεια ζωής ενός έργου από οπλισμένο σκυρόδεμα, η συμβολή του Πολιτικού Μηχανικού τόσο στη φάση της κατασκευής όσο και στη φάση λειτουργίας του, κρίνεται αναγκαία για την ασφάλεια των χρηστών του έργου (Mosley, Bill; Bungey, John; Hulse, 2016).

## 1.2 Κατασκευές Οπλισμένου Σκυροδέματος

### 1.2.1 Το Οπλισμένο Σκυρόδεμα (Ο.Σ).

Τα υλικά από τα οποία συντίθεται το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως αναφέρθηκε, είναι το σκυρόδεμα και ο χάλυβας. Η βασική ιδέα της συνεργασίας αυτών των δύο υλικών προκύπτει από το γεγονός ότι διαθέτουν πολύ διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, οι οποίες όμως συνδυαστικά λειτουργούν πολύ καλά. Η κυριότερη ιδιότητα που εκμεταλλεύεται ο συνδυασμός των δύο αυτών υλικών είναι η μεγάλη αντοχή του χάλυβα σε εφελκυσμό, σε αντιδιαστολή με την αντίστοιχα μικρή εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Επιπλέον, η αντοχή των δύο υλικών σε θλίψη είναι αμφοτέρα καλή αλλά ο χάλυβας για ραβδόμορφα μέλη (όπως ο χαλύβδινος οπλισμός του Ο.Σ.) ελλοχεύει τον κίνδυνο του λυγισμού κατά τη θλιπτική φόρτιση, κάτι το οποίο αποφεύγεται εγκιβωτίζοντάς τον στο περιβάλλον του σκυροδέματος και περιορίζοντας με αυτόν τον τρόπο τις πλευρικές μετακινήσεις. Σε κάθε περίπτωση, όσο καλύτερα γίνει η μελέτη και η επίβλεψη μιας κατασκευής από Ο.Σ., τόσο καλύτερα θα συνεργαστούν οι ιδιότητες των δύο υλικών και ταυτόχρονα θα επιτευχθεί εξοικονόμηση υλικών και χρόνου και κυρίως η ασφαλής μελλοντική χρήση της (Mosley, Bill; Bungey, John; Hulse, 2016).

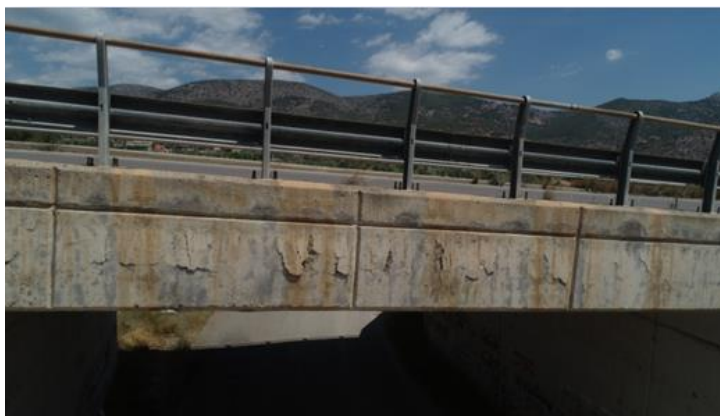
Το οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να χαρακτηριστεί επιπλέον ως ένα βιώσιμο και περιβαλλοντικό υλικό. Η επιλογή του για τη διαμόρφωση ενός φορέα, σε συνδυασμό με την κατάλληλη μόρφωση του φέροντος συστήματος, συνεισφέρει σημαντικά στην αειφορία της κατασκευής. Αρχικά το σκυρόδεμα διατίθεται από τοπικές πηγές και γι' αυτό απαιτεί μικρές αποστάσεις μεταφοράς έως το εργοτάξιο. Ταυτόχρονα διαθέτει μεγάλη θερμική μάζα, δηλαδή απορροφάει την περίσσεια θερμικής ενέργειας και την εκλύει με αργό ρυθμό ώστε να αποφευχθούν οι μεγάλες θερμοκρασιακές διακυμάνσεις εντός της ημέρας. Επίσης, είναι ένα ανθεκτικό υλικό, που εν γένει απαιτεί μικρή συντήρηση, έχει καλή αντίσταση στη φωτιά, τις πλημμύρες και το θόρυβο. Μάλιστα, στο τέλος της ζωής μιας κατασκευής από οπλισμένο σκυρόδεμα, είναι δυνατή η ανακύκλωση του υλικού για μετέπειτα χρήση. Επομένως η χρήση του αλλά και η βελτιστοποίησή του ως δομικό υλικό ενδείκνυται τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς (The Concrete Centre, n.d.).

## 1.2.2 Φθορές Οπλισμένου Σκυροδέματος

Όπως και κάθε άλλο δομικό υλικό, το οπλισμένο σκυρόδεμα στη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής εμφανίζει φθορές που σε κάθε περίπτωση οφείλουν να εκτιμηθούν από το μηχανικό. Ειδικά στον ελλαδικό χώρο που η σεισμική δραστηριότητα είναι αυξημένη, τα φαινόμενα φθορών των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι ακόμα πιο έντονα. Η ύπαρξη φθοράς συνήθως εντοπίζεται πρώτα οπτικά, μιας και οι φθορές είναι και επιφανειακές. Οι αιτίες των φθορών μπορεί να είναι μηχανικές, περιβαλλοντικές ή φυσικές. Όταν η εμφάνιση επιφανειακών ρωγμών είναι σε φέροντα στοιχεία και έχοντας αποκλείσει ως αιτία τη μηχανική φόρτιση, είναι πολύ πιθανή η ύπαρξη διάβρωσης. Όμως, ακόμα και αν η ρωγή δημιουργηθεί λόγω μηχανικής φόρτισης, η διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού ξεκινάει ή και επιδεινώνεται ταχύτατα, λόγω της άμεσης επαφής του με το ατμοσφαιρικό περιβάλλον, γεγονός που καθιστά τον εντοπισμό, την αξιολόγηση και την επισκευή των ρωγμών βήματα υψίστης σημασίας για τη διατήρηση της ασφαλούς λειτουργίας της κατασκευής. Στα παρακάτω σχήματα (σχήματα 1.2.1 και 1.2.2) φαίνονται οι επιφανειακές φθορές σε φορείς γέφυρας εξαιτίας της διάβρωσης. Συγκεκριμένα, στο σχήμα 1.2.1 φαίνεται η κατά μήκος αποκάλυψη του διαμήκους οπλισμού ο οποίος έχει διογκωθεί και έχει οδηγήσει σε εφελκυστική αστοχία το σκυρόδεμα που τον περιβάλλει. Αντίστοιχα, στο σχήμα 1.2.2 φαίνεται το αποτέλεσμα της διάβρωσης των εγκάρσιων συνδετήρων οι οποίοι επίσης έχουν οδηγήσει το σκυρόδεμα που τους επικαλύπτει σε εφελκυστική αστοχία.



Σχήμα 1.2.1 Αποκάλυψη Οπλισμού (Spalled Concrete) λόγω διάβρωσης (αριστερά)



Σχήμα 1.2.2. Ρωγμές και spalling λόγω διάβρωσης στη γέφυρα Νέας Περάμου (δεξιά)

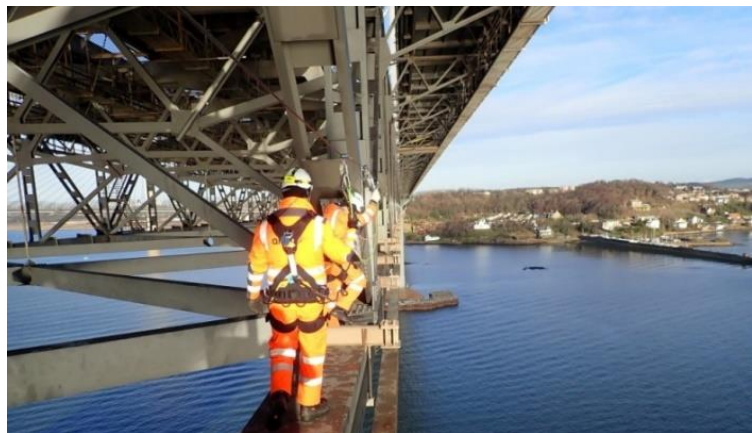
### 1.3 Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία προσπάθεια απομακρυσμένης αξιολόγησης των επιφανειακών ρωγμών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, κυρίως γεφυρών, με σκοπό την εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής τους. Η αξιολόγηση βασίζεται αποκλειστικά στην οπτική επιθεώρηση της κατασκευής και των ρωγμών και μάλιστα η μέτρηση και αξιολόγηση αυτών γίνεται με αυτοματοποιημένο πρόγραμμα τεχνητής νοημοσύνης. Η εκτίμηση της διάρκειας ζωής γίνεται με παραδοχές. Ωστόσο, η ακρίβεια εντοπισμού και μέτρησης των ρωγμών και των ιδιοτήτων τους επιδιώκεται να είναι αρκετά υψηλή.

Γενικά, η αξία της δυνατότητας απομακρυσμένης αξιολόγησης των επιφανειακών φθορών κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα εντοπίζεται ιδιαίτερα σε κατασκευές όπου η κλασική οπτική επιθεώρηση, δηλαδή το πρώτο από τα βήματα επιθεώρησης, είναι αρκετά επικίνδυνο, χρονοβόρο και αντιοικονομικό για να γίνει σε όλο το μήκος του φορέα. Τέτοιες κατασκευές κυρίως είναι οι γέφυρες, των οποίων τα ανοίγματα μπορεί να βρίσκονται σε πολύ μεγάλο ύψος, σε δύσβατη περιοχή, ή πάνω από υγρά στοιχεία μεγάλου όγκου (π.χ. θάλασσα). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η αποστολή ειδικά εκπαιδευμένων ομάδων στα κρίσιμα σημεία αποτελεί την υπάρχουσα προσέγγιση του ζητήματος, σκοπός του οποίου είναι η οπτική επιθεώρηση της κατασκευής και η αρχική αξιολόγηση των ευρημάτων, ώστε να κριθούν απαραίτητες ή μη, ενδεχόμενες ενέργειες συντήρησης και επισκευής. Πρόκειται όμως για εργασίες επικίνδυνες και με μεγάλο οικονομικό κόστος. Στα σχήματα 1.3.1 και 1.3.2 φαίνονται οι συνθήκες κάτω από τις οποίες η ειδική ομάδα αξιολογεί την κατάσταση της γέφυρας Forth Road Bridge στο Ηνωμένο Βασίλειο.



**Σχήμα 1.3.1 Forth Road Bridge U.K. – Spencer Group.**  
Αποστολή ειδικής ομάδας για επιθεώρηση



**Σχήμα 1.3.2. Forth Road Bridge - Spencer Group**



Όπως φαίνεται και από τις εικόνες, η διαδικασία αυτή μπορεί να καταστεί αρκετά δύσκολη. Αντίθετα, η προτεινόμενη διαδικασία απομακρυσμένης αξιολόγησης των επιφανειακών φθορών απλοποιεί αρκετά τη διαδικασία. Χωρίζεται σε δύο μέρη: α) τη συλλογή φωτογραφιών κατόπιν επίσκεψης στο πεδίο είτε με επαγγελματική κάμερα υψηλής ανάλυσης, είτε με σύστημα μη επανδρωμένου αεροσκάφους (Drone), είτε με συνδυασμό αυτών, β) την ανάλυση των φωτογραφιών με τον προτεινόμενο αλγόριθμο και την εξαγωγή αποτελεσμάτων για την εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής (με παραδοχές). Η διαδικασία θα αναλυθεί περαιτέρω στα κεφάλαια 3 και 6.

Στα σχήματα 1.3.3 και 1.3.4 παρατίθενται στιγμιότυπα από τη λήψη εικόνων για εφαρμογή της απομακρυσμένης αξιολόγησης.

Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου έγινε σε δύο γέφυρες όπως αναλύεται στα επόμενα κεφάλαια. Στο παράρτημα επισυνάπτεται ο κώδικας που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab.



**Σχήμα 1.3.3. Λήψη φωτογραφιών με επαγγελματική κάμερα (Γέφυρα Μεγάρων) (αριστερά)**



**Σχήμα 1.3.4. Οπτική Επιθεώρηση με Drone (κάτω και πάνω)**



## 2 Θεωρητικό Μέρος

### 2.1 Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος

Η ανθεκτικότητα σε διάρκεια ορίζεται ως η ικανότητα των υλικών να αντιστέκονται στην αλλοίωση των φυσικών χαρακτηριστικών τους υπό τη δράση κλιματικών συνθηκών της ατμόσφαιρας και εν γένει περιβαλλοντικών επιδράσεων (π.χ. υγρασία, ηλιακή ακτινοβολία, θερμοκρασιακές μεταβολές, παγετός, χημικές ουσίες). Γενικά, μία κατασκευή ορίζεται ως ανθεκτική εάν εξυπηρετήσει το σκοπό δημιουργίας της για τη διάρκεια ζωής για την οποία είχε αρχικά σχεδιαστεί και με τη λιγότερο δυνατή επέμβαση (Τριανταφύλλου, 2018).

Το οπλισμένο σκυρόδεμα, όπως και όλα τα σύνθετα υλικά, εμφανίζει φθορές κατά τη διάρκεια λειτουργίας της κατασκευής, έχει δηλαδή πεπερασμένο χρόνο ζωής που πέρα από αυτόν, το υλικό κρίνεται λειτουργικά ανεπαρκές έχοντας υποστεί αλλοιώσεις, των οποίων η επισκευή είναι είτε αντιοικονομική είτε επισφαλής. Οι αλλοιώσεις αυτές είναι αποτέλεσμα του περιβάλλοντος, του σχεδιασμού, του ανθρωπίνου παράγοντα, των ιδιοτήτων του υλικού και της χρήσης του. Συγκεκριμένα, αν και το σκυρόδεμα μπορεί υπό προϋποθέσεις<sup>1</sup> να θεωρηθεί ότι έχει δυνατότητα απεριόριστης ζωής, σε συνδυασμό με το χάλυβα οπλισμού, επηρεάζεται από διάφορους διαβρωτικούς παράγοντες και το γεγονός ότι η πλειοψηφία των κατασκευών από Ο.Σ. είναι κατασκευασμένα αρκετά χρόνια πριν, καθιστά την ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος μείζον ζήτημα του οπλισμένου σκυροδέματος στο σύγχρονο κατασκευαστικό και επιστημονικό κλάδο.

Ειδικότερα, η χαμηλή ανθεκτικότητα του σύνθετου αυτού υλικού μπορεί να οφείλεται είτε στο εξωτερικό περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται και εκτίθεται συνεχώς η κατασκευή, είτε στο εσωτερικό περιβάλλον του σκυροδέματος το οποίο δύναται να δημιουργεί αιτίες διάβρωσης από μόνο του. Εξωτερικά, οι αιτίες αλλοίωσής του σκυροδέματος μπορεί να είναι φυσικές, χημικές ή μηχανικές. Παραδείγματος χάριν, οι καιρικές συνθήκες, οι ακραίες θερμοκρασίες ή θερμοκρασιακές μεταβολές, η πυρκαγιά, η όξινη βροχή, η τριβή, η εναπόθεση μεγάλου φορτίου, αποτελούν εξωτερικούς παράγοντες αλλοίωσης του σκυροδέματος, επηρεάζοντας όμως σε πρώτο στάδιο μόνο το σκυρόδεμα και όχι το χαλύβδινο οπλισμό του. Αντίστοιχα, εσωτερικές αιτίες διάβρωσης του χαλύβδινου οπλισμού αποτελούν τα χλωριόντα και η ενανθράκωση. Στην περίπτωση, λοιπόν, που σημειωθεί ενανθράκωση του σκυροδέματος, χημική αντίδραση των συστατικών του ή διείδυση χλωριόντων θα προκληθεί ομοιόμορφη/ανομοιόμορφη διάβρωση, ρηγμάτωση και εκτίναξη (spalling) της επικάλυψης του σκυροδέματος και τότε το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται πλέον από χαμηλή ανθεκτικότητα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην Ελλάδα, σε αντίθεση με άλλες χώρες, το φαινόμενο σταδιακής αποδόμησης του σκυροδέματος λόγω εναλλαγών ψύξης-απόψυξης του νερού των πόρων, είναι εξαιρετικά σπάνιο λόγω ήπιου κλίματος, γεγονός που καθιστά ως κύρια αιτία υποβάθμισης της ανθεκτικότητας του οπλισμένου σκυροδέματος τη διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού.

Ως γνωστόν, η όπλιση του σκυροδέματος με χάλυβα γίνεται κυρίως για να επιτευχθεί μεγαλύτερη φέρουσα ικανότητα του στατικού στοιχείου σε εφελκυσμό, μιας και το σκυρόδεμα από μόνο του υπολείπεται σε αυτού του είδους την καταπόνηση. Όμως εν τέλει, οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα υποφέρουν από τη διάβρωση του χαλύβδινου οπλισμού, η οποία μπορεί να οδηγήσει μέχρι και σε κατάρρευση, ενώ οι επιδιορθώσεις της κοστίζουν δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως (Almusallam, 2001).

---

<sup>1</sup> εκτός και αν εκτεθεί σε χημικές διεργασίες, περιβαλλοντικές ή τεχνητές, ή δεχθεί φυσική καταστροφή, όπως ο σεισμός

Το επιθυμητό επίπεδο ανθεκτικότητας των κατασκευών ανάλογα με την προβλεπόμενη μελλοντική τους χρήση εξαρτάται από τις συνθήκες έκθεσης του περιβάλλοντος, καθώς και από τις επιθυμητές ιδιότητες. Γι' αυτό πλέον, οι κατασκευές σχεδιάζονται ακολουθώντας συγκεκριμένες προδιαγραφές, μεταξύ αυτών και η απαιτούμενη ανθεκτικότητα όπως ορίζεται από τον εκάστοτε κανονισμό. Τελικά, η ανθεκτικότητα και η ζωή του σκυροδέματος καθορίζεται από τα συστατικά του, την αναλογία τους, την αλληλεπίδραση τους, αλλά και από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες και συνθήκες. Στο σχήμα 2.1.1 απεικονίζεται η συμβολή τους.



Σχήμα 2.1.1 Συμβολή των διαφόρων παραγόντων στη διάρκεια ζωής των υλικών (Ashby, Michael; Cebon, David; Shercliff, 2012).

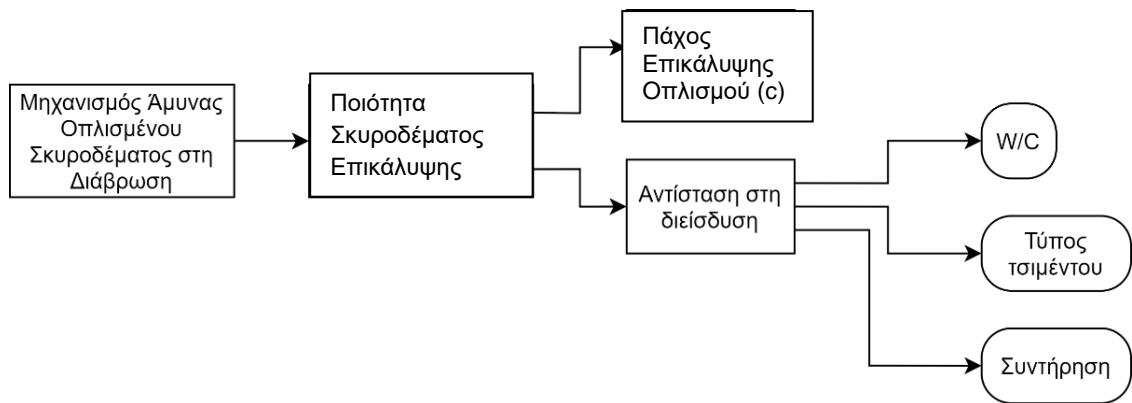
## 2.2 Δράσεις Ανθεκτικότητας

Είναι γεγονός ότι όλα τα υλικά αλλοιώνονται με την πάροδο του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, η αλλοίωση αυτή μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση του περιβάλλοντος, του σχεδιασμού, του ανθρωπίνου παράγοντα, των ιδιοτήτων του υλικού και της χρήσης του.

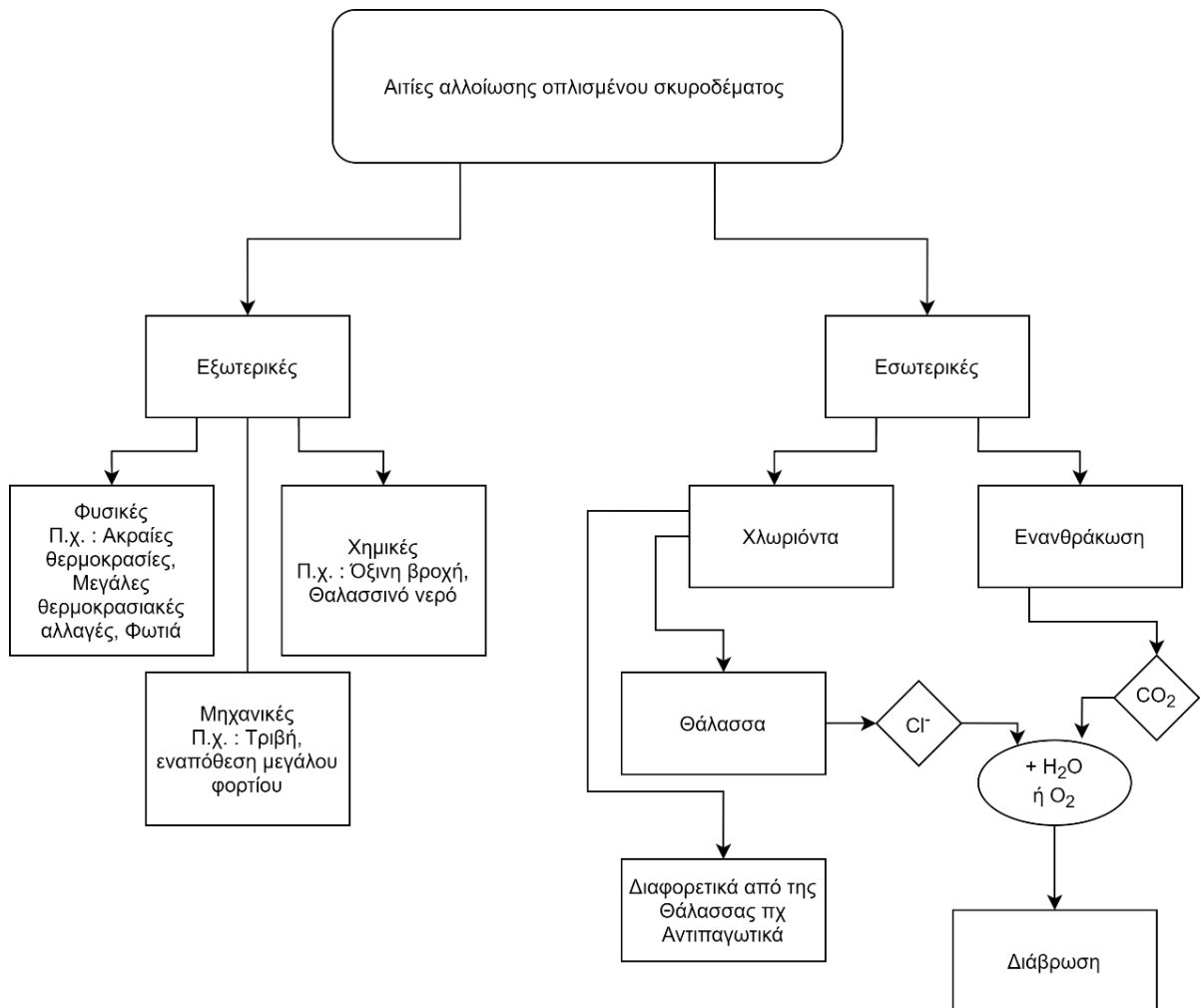
Η ανθεκτικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται από εκείνα τα φυσικά χαρακτηριστικά του που ελέγχουν τη διάχυση αερίων, όπως CO<sub>2</sub> και O<sub>2</sub> ή υγρών (κυρίως του νερού), δια μέσω των πόρων του, καθώς επίσης και τη διάχυση ιόντων, όπως τα Cl<sup>-</sup> χλωριόντα, που διαλύονται στο νερό του πορώδους. Αυτά τα φυσικά χαρακτηριστικά εξαρτώνται από τη σύνθεση του σκυροδέματος, τη χημική σύσταση και τον τύπο του τσιμέντου, αλλά και από τη σχετική υγρασία και θερμοκρασία του περιβάλλοντος, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.2.1.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την ανθεκτικότητα, όπως αναφέρθηκε ήδη, μπορούν να χωριστούν σε 1) φυσικούς, 2) χημικούς και 3) μηχανικούς και στη συνέχεια σε α) εξωτερικούς και β) εσωτερικούς, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2.2.





Σχήμα 2.2.1. Μηχανισμός άμυνας σκυροδέματος στη διάβρωση



Σχήμα 2.2.2. Δράσεις Ανθεκτικότητας

Τα υγρά και αέρια στοιχεία που επιδρούν στην ανθεκτικότητα είναι:

- το νερό (H<sub>2</sub>O)
- το διοξείδιο του άνθρακα που βρίσκεται στην ατμόσφαιρα (CO<sub>2</sub>)
- ιόντα που εισέρχονται ή βρίσκονται στο εσωτερικό του σκυροδέματος (Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, O<sub>2</sub>)

Η επίδραση των στοιχείων αυτών στην ανθεκτικότητα είναι αισθητή με το χρόνο καθώς είναι πιθανή και η συνύπαρξη δύο ή και περισσότερων παραγόντων γεγονός που, αν συμβεί, επιταχύνει ακόμα περισσότερο το μηχανισμό αλλοίωσης του υλικού (Papadakis, Vagelis G.; Vayenas, Costas G.; Fardis, 1991).

## 2.3 Ο Μηχανισμός της Διάβρωσης

Η διάβρωση είναι ένα φαινόμενο που οδηγεί στην υποβάθμιση ή την αποσύνθεση ενός υλικού ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται. Η διάβρωση του οπλισμένου σκυροδέματος είναι μία ηλεκτροχημική διαδικασία στην οποία λαμβάνει χώρα μία σειρά από ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Ο χάλυβας στο οπλισμένο σκυρόδεμα βρίσκεται σε παθητικές συνθήκες και προστατεύεται από ένα λεπτό στρώμα οξειδίου εξαιτίας της αλκαλικότητας του σκυροδέματος (pH=12-13) που τον περιβάλλει. Η αλκαλικότητα αυτή αντιστοιχεί στην υπό συνθήκη θερμοκρασία συγκέντρωση ισορροπίας του υδροξειδίου του ασβεστίου Ca(OH)<sub>2</sub> στο νερό των πόρων. Όταν το pH μειωθεί σε τιμές κάτω του 9, τότε ο χάλυβας αποπαθητικοποιείται και διαβρώνεται. Αιτίες αυτής της μείωσης του pH αποτελούν η ενανθράκωση και η επίδραση των χλωριόντων (Almusallam, 2001) (Τσίκας & Παπασπυριδάκος, 2006).

Μετά τη διάτρηση του προστατευτικού στρώματος του οπλισμού, ξεκινά η διαδικασία της διάβρωσης, μία ηλεκτροχημική διαδικασία με ηλεκτρολύτη το νερό, συγκεκριμένα το νερό των πόρων. Με αυτή τη διαδικασία επιτυγχάνεται η διέλευση ηλεκτρικού φορτίου (Τσίκας & Παπασπυριδάκος, 2006).

Συγκεκριμένα στην περιοχή που έχει γίνει η διάτρηση δημιουργείται «άνοδος» όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση:



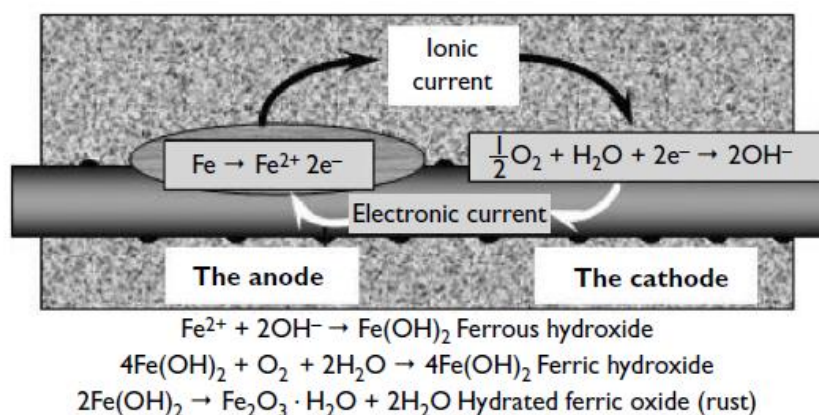
Τα δύο ελεύθερα ηλεκτρόνια (2e<sup>-</sup>) που προκύπτουν, πρέπει να καταναλωθούν κάπου αλλού στην επιφάνεια του χάλυβα, ώστε να διατηρηθεί η ηλεκτρική ουδετερότητα. Γι' αυτό, κινούνται μέσω της χαλύβδινης ράβδου σε κάποιο άλλο σημείο της όπου δημιουργείται η «κάθοδος» και καταναλώνονται σύμφωνα με την αντίδραση:



Τα ανιόντα αυτά κινούνται προς την άνοδο που αντιδρούν με τα οξείδια του σιδήρου με την παρακάτω αντίδραση:



Αυτή η διαδικασία φαίνεται στο σχήμα 2.3.1 (Broomfield, 2007).

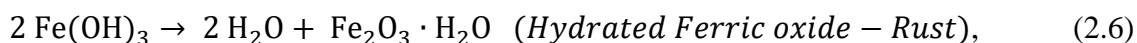
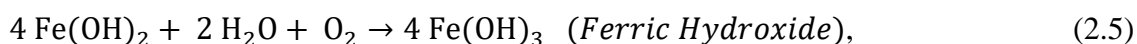
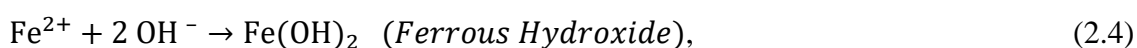


**Σχήμα 2.3.1. Αντιδράσεις στην άνοδο, κάθοδο, οξειδωσης και υδρόλυσης του διαβρωμένου χάλυβα**

Παρατηρείται ότι στην καθοδική αντίδραση δημιουργούνται ελεύθερα υδροξύλια. Αυτά τα ιόντα αυξάνουν την τοπική αλκαλικότητα και γι' αυτό ενδυναμώνουν το στρώμα παθητικής προστασίας, εκμηδενίζοντας έτσι τις πιθανότητες εμφάνισης των συνεπειών της ενανθράκωσης και της παρουσίας χλωριόντων στην κάθοδο.

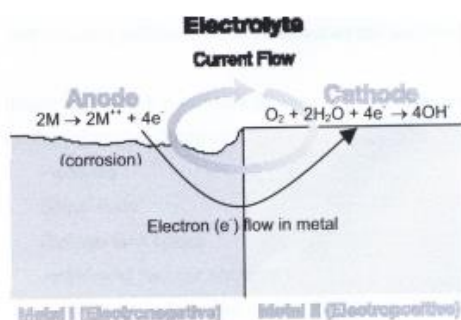
Η ανοδική και καθοδική αντίδραση είναι μόνο τα πρώτα βήματα της διαδικασίας δημιουργίας της οξειδωσης (παρ' όλ' αυτά, αποτελούν βασικές δράσεις για την κατανόηση της διάβρωσης). Εάν ο σίδηρος διαλυόταν στο νερό των πόρων, δεν θα υπήρχαν ρωγμές και αποφλοιώση. Συμβαίνουν πολλά ακόμα βήματα για να δημιουργηθεί η οξειδωση.

Απαραίτητη προϋπόθεση για να συμβεί η ηλεκτρολυτική διάβρωση ωστόσο, αποτελεί η παρουσία οξυγόνου και η υγρασία (ηλεκτρολύτης), παράμετροι χωρίς τις οποίες δεν θα μπορούσε να συμβεί η διάβρωση. Ο βαθμός της διάβρωσης είναι αργός εάν η ποσότητα του νερού ή του οξυγόνου είναι περιορισμένη. Η παρουσία υγρασίας και οξυγόνου δρα ως καταλύτης της διάβρωσης δημιουργώντας περισσότερα ελεύθερα  $OH^{-}$  που κατ' επέκταση παράγουν τη σκουριά  $Fe(OH)_x$ , ( $x = 2, 3$ ), σύμφωνα με τις αντιδράσεις 2.4-2.6 που αναπαριστούν την διαμόρφωση της οξειδωσης μετά τη διάσπαση του σιδήρου στην ανοδική πλευρά του οπισμού.



Αυτό σημαίνει ότι η διάβρωση εμφανίζεται μόνο στην άνοδο και όχι στην κάθοδο. Επιπλέον, κάθοδο ή άνοδο μπορεί να αποτελούν δύο διαφορετικά μέταλλα συνδεδεμένα μεταξύ τους, που δημιουργούν ένα διμεταλλικό έλασμα. Χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 2.3.2 η διαδικασία κατά την οποία υπάρχει ροή ηλεκτρονίων από την άνοδο προς την κάθοδο και επίσης φαίνονται

και οι αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα. Μεταβολή του ρυθμού των αντιδράσεων αυτών είναι δυνατή είτε με πρόσθεση είτε με αφαίρεση ηλεκτρονίων. Σε αυτή τη μεταβολή βασίζεται η μέθοδος καθοδικής προστασίας.



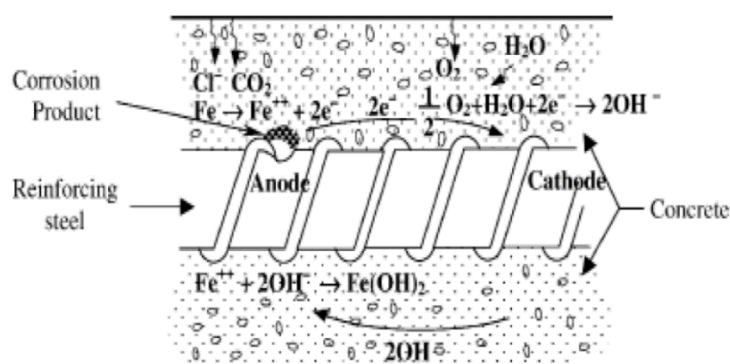
Σχήμα 2.3.2. Ηλεκτροχημικός σχηματισμός διάβρωσης

Γενικά η διάβρωση συμβαίνει ουσιαστικά εξαιτίας της δημιουργίας ηλεκτροχημικών δυναμικών λόγω των παρακάτω:

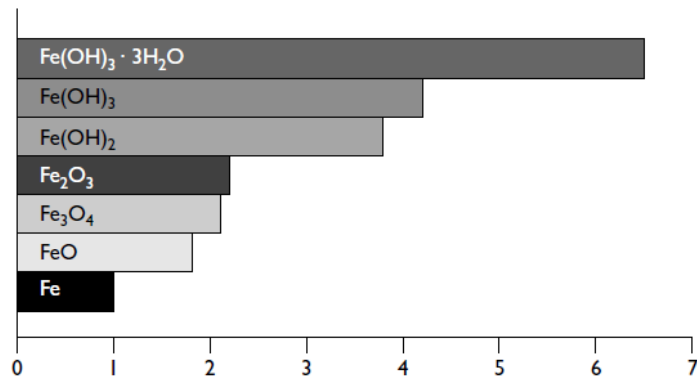
- Όταν δύο διαφορετικά μέταλλα συνυπάρχουν στο σκυρόδεμα, όπως για παράδειγμα ο χαλύβδινος οπλισμός και ο σωλήνας-αγωγός από αλουμίνιο, ή όταν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στα επιφανειακά χαρακτηριστικά του χάλυβα που διαφοροποιούν τη χημική του σύσταση (Quraishi et al., 2017)
- Μπορεί να δημιουργηθούν πυκνά μόρια κοντά στον οπλισμό εξαιτίας των διαφορών της πυκνότητας των διαλυμένων ιόντων όπως αλκάλια και χλωρίδια (Quraishi et al., 2017).

Έτσι, συμβαίνουν οι αντιδράσεις αυτές, όπως ειπώθηκε και όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.3 (Ahmad, 2003), στην άνοδο και κάθοδο.

Όπως φαίνεται στα σχήματα 2.3.1 και 2.3.3, το οξείδιο του σιδήρου ( $Fe_2O_3$ ) έχει όγκο περίπου δύο φορές τον όγκο του χάλυβα που αντικαθιστά. Όταν υδρολύεται, φουσκώνει ακόμα περισσότερο και γίνεται πορώδες. Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση του όγκου στη διεπιφάνεια του χάλυβα και του σκυροδέματος είναι περίπου έξι με δέκα φορές όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3.4 (Broomfield, 2007). Αυτή είναι η αιτία που δημιουργούνται η ρηγμάτωση και η αποφλοίωση του σκυροδέματος.



Σχήμα 2.3.3. Μηχανισμός Διάβρωσης



**Σχήμα 2.3.4. Συσχέτιση του όγκου του σιδήρου με τον όγκο των προϊόντων των αντιδράσεων διάβρωσης**

Γενικά, ανάλογα με τη σύνθεση του σκυροδέματος, το περιβάλλον της κατασκευής αλλά και τις συνθήκες κατά τις οποίες διαβρώνεται ο χάλυβας, τα προϊόντα της μπορεί να διαφέρουν. Ανάλογα με τα προϊόντα, διαφέρει και ο όγκος τους. Σύμφωνα με τον (Ahmad, 2003) (Παρ. 8.1.1) για τα μοντέλα εκτίμησης της διάρκειας ζωής θεωρείται αύξηση του όγκου λόγω της παραγωγής της ερυθράς σκουριάς ( $\text{Fe(OH)}_3$ ) γύρω από τη ράβδο οπλισμού. Αυτή η κόκκινη σκουριά, που είναι εκ φύσεως διογκωτική, καταναλώνει τέσσερις φορές τον όγκο του χάλυβα από τον οποίο προήλθε.

### 2.3.1 Συνέπειες Διάβρωσης

Μετά την εκκίνηση της διαδικασίας της διάβρωσης:

1. μειώνεται η διατομή του οπλισμού, αφού μέρος του έχει μετατραπεί σε οξείδιο, με συνέπεια τη μείωση της αντοχής της κατασκευής, αφού πλέον αδυνατεί να αναλάβει τα φορτία για τα οποία σχεδιάστηκε,
2. μειώνεται η ολκιμότητα του υλικού και μάλιστα με ρυθμό μεγαλύτερο από εκείνο της μείωσης της διατομής, γεγονός που υποβαθμίζει τη συμπεριφορά της κατασκευής σε σεισμό,
3. η σκουριά καταλαμβάνει περίπου 2 με 6 φορές μεγαλύτερο όγκο, ανάλογα το χημικό περιβάλλον, σε σχέση με το χάλυβα από τον οποίο προέκυψε, με συνέπεια την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων στο σκυρόδεμα από το χάλυβα, προκαλώντας ρηγματώσεις.

Στις περισσότερες βιομηχανίες, η διάβρωση είναι ανησυχητική λόγω της απώλειας του μετάλλου που οδηγεί σε στατική ανεπάρκεια, όπως κατάρρευση, διάτρηση των κοντέινερ ή των σωλήνων κ.α. Ωστόσο, τα περισσότερα προβλήματα με τη διάβρωση έχουν να κάνουν με τη διόγκωση του οξειδίου παρά με τη μείωση του χάλυβα. Η στατική κατάρρευση λόγω διάβρωσης εξάλλου, είναι σπάνια και οι κατασκευές που ενέχουν κίνδυνο λόγω διάβρωσης είναι κυρίως αυτές με προεντεταμένο σκυρόδεμα, μιας και οι τένοντες που τοποθετούνται σφραγίζονται και δεν εντοπίζεται έκδηλα η διάβρωση. Το πιο κοινό πρόβλημα λοιπόν, είναι η αποκόλληση του σκυροδέματος.

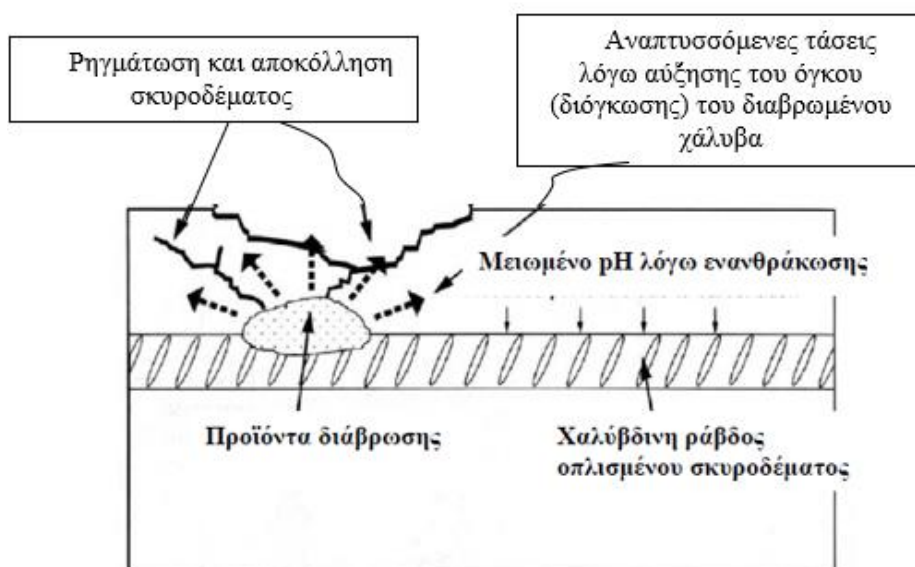
### 2.3.2 Ρηγμάτωση (Crack) και Αποκόλληση (Spalling)

Όπως ειπώθηκε, η σκουριά  $Fe(OH)_2$ , προϊόν της αλληλουχίας των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων της διάβρωσης έχει ως συνέπεια, πλην άλλων, την αύξηση του όγκου του οπλισμού κατά 2 με 6 φορές, αριθμός που εξαρτάται από τα συναντιδρώντα. Η αύξηση αυτή του όγκου προκαλεί εσωτερική θλίψη στο σκυρόδεμα, το οποίο αντιδρώντας εφελκυστικά αστοχεί, εκδηλώνοντας ρηγμάτωση όπως φαίνεται και στα σχήματα 2.3.5 (Γκίβαλου & Μιτζήθρα, n.d.) και 2.3.7 (Broomfield, 2007). Αν μάλιστα η επικάλυψη του σκυροδέματος ή η ποσότητα του εγκάρσιου οπλισμού στο σημείο που γίνεται η διάβρωση είναι μικρή, η ρηγμάτωση μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια. Η προκύπτουσα ρωγμή είναι ευθύγραμμη και παράλληλη με τη ράβδο οπλισμού.

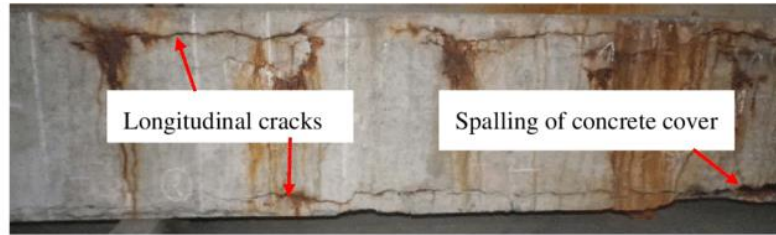
Με την ύπαρξη ρωγμής, επιτυγχάνεται ακόμα μεγαλύτερη έκθεση της ράβδου σε διάβρωση με αποτέλεσμα τη ραγδαία εξέλιξη της διάβρωσης. Γενικά, η ύπαρξη ρωγμών στο σκυρόδεμα λειτουργεί καταλυτικά στην επιτάχυνση της διάβρωσης, είτε οφείλονται στην ίδια τη διάβρωση, είτε έχουν προκύψει από υψηλή φόρτιση, συγκρούσεις, σεισμικές δυνάμεις ή συστολή ξήρανσης. Αυτό συμβαίνει διότι η ρωγμή αποτελεί άμεσο δρόμο διείσδυσης τόσο του διοξειδίου του άνθρακα, όσο και των χλωριόντων και τα βοηθάει να φτάσουν πιο γρήγορα στον οπλισμό, κάτι το οποίο ενδεχομένως να μη συνέβαινε άμεσα.

Στις περιοχές της κατασκευής που φορτίζονται εφελκυστικά, ο χαλύβδινος οπλισμός αναλαμβάνει τον εφελκυσμό. Αν το εφελκυστικό φορτίο όμως υπερβεί την εφελκυστική αντοχή του, εμφανίζονται μικρές ρωγμές ( $<0.05\text{mm}$ ). Συνήθως δεν επηρεάζουν το ρυθμό της διάβρωσης, μιας και οι μικρές ποσότητες χλωριόντων και υγρασίας που διεισδύουν, αναλαμβάνονται τοπικά από την αλκαλικότητα του σκυροδέματος. Αν όμως αυτές οι ρωγμές υπερβούν τα  $0.05\text{mm}$  και παραμείνουν ανοιχτές, αποτελούν αιτία επιτάχυνσης του ρυθμού διάβρωσης.

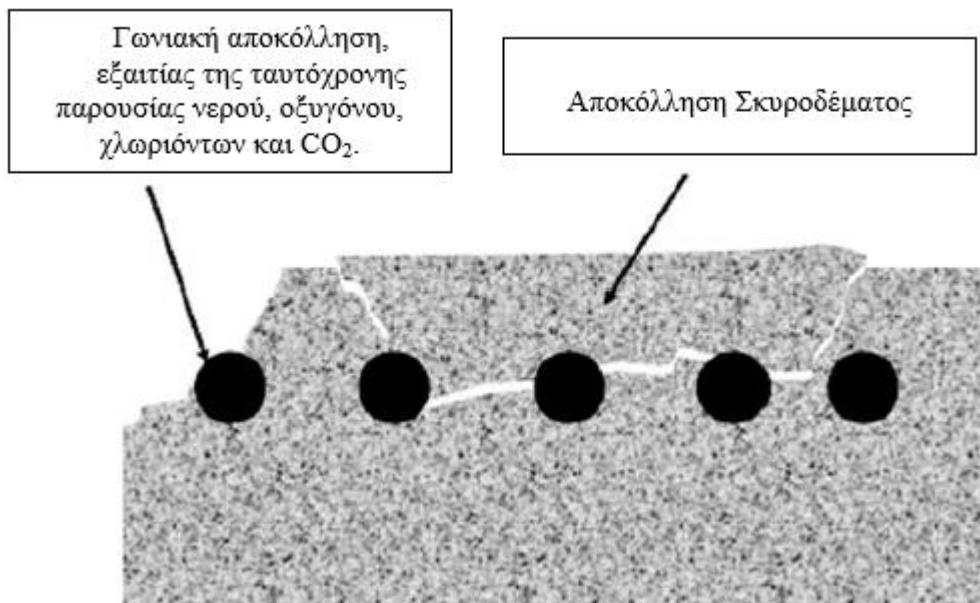
Όπως ειπώθηκε, η διάβρωση προκαλεί οριζόντια διαμήκη ρηγμάτωση (longitudinal cracking) παράλληλα με τις ράβδους που διαβρώνονται (σχήμα 2.3.6 αριστερά (Zhu & Francois, 2015)). Αυτό οδηγεί σε μείωση της επικάλυψης οπλισμού, κύρια συνέπεια της οποίας είναι η πτώση της (αποκόλληση) (σχήμα 2.3.6 δεξιά) και η μη αποδεκτή εμφάνιση με τον κίνδυνο τραυματισμού των χρηστών της κατασκευής.



Σχήμα 2.3.5. Ανάπτυξη τάσεων λόγω δίογκωσις και σχηματισμός ρηγμάτωσης.



Σχήμα 2.3.6. Ρηγμάτωση δοκού και αποκόλληση σκυροδέματος λόγω διάβρωσης



Σχήμα 2.3.7. Επεξήγηση Αποκόλλησης Σκυροδέματος

### 2.3.3 Το Νερό

Το νερό αποτελεί τον πιο καθοριστικό παράγοντα για την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Ως ένας από τους καλύτερους διαλύτες, είναι υπεύθυνο για τη διάλυση πολλών ουσιών εντός του σκυροδέματος με το μικρό μέγεθος των μορίων του να του επιτρέπει την είσοδο σε πολύ λεπτούς πόρους και κοιλότητες. Επιπλέον, σχεδόν όλοι οι μηχανισμοί αποσάθρωσης του σκυροδέματος λειτουργούν με τη βοήθεια του νερού. Ως προς τη διάβρωση-οξείδωση του οπλισμού, το νερό εισχωρεί στην επιφάνεια του και καταστρέφει την παθητική προστασία του. Επίσης, συμμετέχει στην ενανθράκωση του σκυροδέματος καθώς επίσης και αποτελεί το μέσο διάλυσης των διαβρωτικών συστατικών στους πόρους του σκυροδέματος. Γενικά, με απουσία νερού δεν θα προχωρούσε καμία δράση φθοράς.



### 2.3.4 Διάβρωση Παρουσία Χλωριόντων

Η διείσδυση χλωριόντων είναι μία από τις κυριότερες αιτίες εμφάνισης της διάβρωσης του οπλισμού. Κύρια πηγή χλωριόντων είναι το θαλασσινό νερό και το αντιπαγωτικό αλάτι. Το τσιμέντο, το νερό, τα αδρανή και καμιά φορά τα πρόσθετα, μπορούν επίσης να διευκολύνουν τη διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Η διείσδυση  $\text{Cl}^-$  στο σκυρόδεμα γίνεται μέσω του πορώδους και των μικρορωγμών, διατρύπουν τη μεμβράνη οξειδίου παθητικής προστασίας γύρω από το χάλυβα οπλισμού, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση της αντίδρασης της διάβρωσης και της αλλοίωσης του σκυροδέματος. Η παθητικότητα του χάλυβα αποδυναμώνεται και εξαντλείται με την παρουσία αρκετής ποσότητας χλωριόντων. Το προστατευτικό στρώμα οξειδίου μπορεί να διατηρηθεί τοπικά από ιόντα χλωρίου ( $\text{Cl}^-$ ), αν η συγκέντρωση των τελευταίων υπερβεί το 0.4% έως 0.6% κατά βάρος τσιμέντου. Τα χλωριόντα μπορεί να προέρχονται είτε από το εσωτερικό του σκυροδέματος, είτε από το εξωτερικό περιβάλλον της κατασκευής.

Η παθητικότητα του χάλυβα επιπλέον εξαρτάται και από τη συγκέντρωση των υδροξυλίωντων  $\text{OH}^-$ . Στο παραθαλάσσιο περιβάλλον, πέρα από τα  $\text{CO}_2$  σημαντικό ρόλο παίζουν και τα  $\text{Cl}^-$  για το επίπεδο διείσδυσης των οποίων, έχει σημασία και το είδος του τσιμέντου.

Τα διαλυμένα στο θαλασσινό νερό χλωριούχα και θειικά άλατα αντιδρούν με τα συστατικά του τσιμεντοπολτού σχηματίζοντας χλωριούχο ασβέστιο, θεικό ασβέστιο, υδροξείδιο του μαγνησίου και ετρινγκίτη. Η μεγαλύτερη φθορά στις κατασκευές που είναι σε επαφή με το θαλασσινό νερό, εμφανίζεται στην παλιρροιακή ζώνη (μεταξύ της άνω και της κάτω παλιρροιακής στάθμης), λόγω της ταυτόχρονης δράσης των κυμάτων, της χημικής επίδρασης των αλάτων και της ενανθράκωσης από το  $\text{CO}_2$  του αέρα. 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 οξείδωσης του χάλυβα

Τα χλωριόντα που μπορεί να διατρήσουν το προστατευτικό στρώμα, προέρχονται από το εσωτερικό του σκυροδέματος, στις περιπτώσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί για το σκυρόδεμα συλλεκτά αδρανή από παράλιες, από τον πυθμένα της θάλασσας ή από προσθετά βελτιωτικά του σκυροδέματος που περιέχουν χλωριούχα άλατα. Χλωριόντα από το εξωτερικό περιβάλλον είναι πολύ συνηθισμένο φαινόμενο σε παραθαλάσσιες περιοχές, όπου σε μεγάλες αποστάσεις από την ακτή ο ατμοσφαιρικός αέρας περιέχει χλωριούχα άλατα, ιδίως αν οι επικρατούντες άνεμοι κατευθύνονται από τη θάλασσα προς την ξηρά. Στις περιοχές όπου υπάρχει μεγάλη χιονόπτωση, βασική πηγή χλωριόντων είναι τα χλωριούχα άλατα που ρίχνονται στους δρόμους για την τήξη του χιονιού. Χλωριόντα μπορεί να προέρχονται επίσης και από τα επιταχυντικά πήξης που χρησιμοποιούνται ειδικά το χειμώνα.

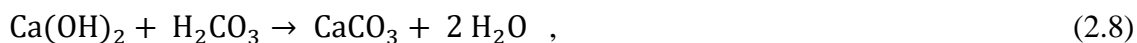
Οι επιπτώσεις εξαιτίας της φθοράς των κατασκευών από το θαλασσινό νερό, μπορούν να περιοριστούν με τη μείωση της διαπερατότητας (permeability) του σκυροδέματος και με την αύξηση του πάχους της επικάλυψης των οπλισμών.

### 2.3.5 Ενανθράκωση Σκυροδέματος

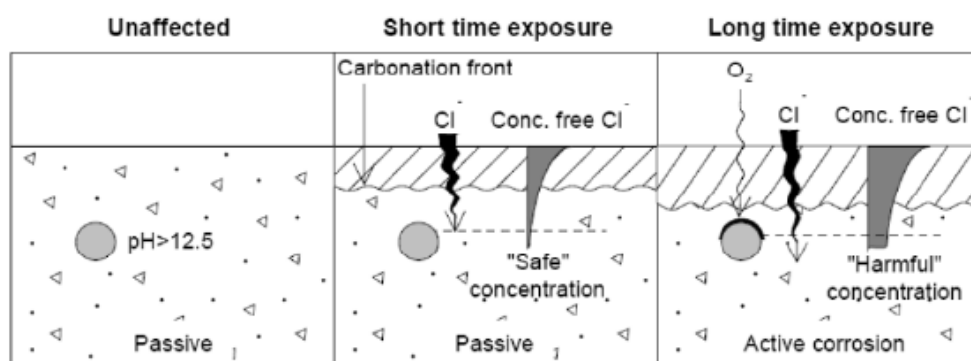
Οι ράβδοι οπλισμού προστατεύονται από τη διάβρωση μέσω ενός πολύ λεπτού επιφανειακού στρώματος ένυδρου οξειδίου του σιδήρου, που δημιουργείται λόγω της υψηλής αλκαλικότητας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Η μείωση του pH του σκυροδέματος σε τιμές κάτω του 9.0 οφείλεται στη χημική αντίδραση του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  του νερού των πόρων (και γενικότερα του στερεού ιστού του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού) με το διοξείδιο του άνθρακα  $\text{CO}_2$  της ατμόσφαιρας, που



σταδιακά διαχέεται προς το εσωτερικό του σκυροδέματος μέσω της αέριας φάσης των πόρων. Η διαδικασία αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μετατροπή του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  σε ανθρακικό ασβέστιο  $\text{CaCO}_3$  σύμφωνα με την αντίδραση:



Το σύνολο της διαδικασίας ονομάζεται ενανθράκωση του σκυροδέματος. Είναι αξιοσημείωτο ότι η ενανθράκωση, η οποία αποτελεί κατά τα άλλα διαδικασία σκλήρυνσης του ασβέστη, για το οπλισμένο σκυρόδεμα έχει δυσμενείς επιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, η ύπαρξη του  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  μαζί με αυτή άλλων υδροξειδίων που υπάρχουν σε μικρότερες ποσότητες εξασφαλίζουν την προστατευτική μεμβράνη μέσω του έντονου αλκαλικού περιβάλλοντος. Το λεπτό αυτό στρώμα οξειδίων και υπεροξειδίων προστατεύει το χάλυβα από τη διάβρωση, όχι απαραίτητως αποτρέποντάς την εντελώς, αλλά κυρίως περιορίζοντας το ρυθμό της. Η ένωση όμως του  $\text{CaO}$  με  $\text{H}_2\text{O}$  δημιουργεί ανθρακικά οξέα που αντιδρούν και μετατρέπουν το  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  σε ασβεστόλιθο μειώνοντας σταδιακά την αλκαλικότητα του περιβάλλοντος έως ότου να πέσει σε επίπεδα που η παθητική προστασία του χάλυβα αναιρείται (αποπαθητικοποίηση). Η αρχή της διαδικασίας της αποπαθητικοποίησης σηματοδοτείται περίπου στο  $\text{pH}=9$ , ενώ ένα πλήρως ενανθρακωμένο σκυρόδεμα έχει  $\text{pH}=8$  (Σχήμα 2.3.8 (Quraishi et al., 2017)).



Σχήμα 2.3.8. Η αποπαθητικοποίηση του χαλύβδινου οπλισμού

Η ενανθράκωση δεν αποτελεί πρόβλημα για το ίδιο το σκυρόδεμα. Μάλιστα, η μετατροπή του υδροξειδίου του ασβέστιου σε ασβεστίτη καθιστά το σκυρόδεμα περισσότερο πυκνό, με χαμηλό πορώδες, προσφέροντάς του επιπλέον θλιπτική αντοχή. Αυτή που επηρεάζεται αρνητικά από το περιβάλλον αυτό, είναι η προστασία του οπλισμού η οποία αδυνατεί να παράσχει προστασία έναντι διάβρωσης όσο φθείρεται και έτσι ξεκινάει η διάβρωση του χάλυβα οπλισμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ταυτόχρονη δράση ενανθράκωσης και χλωριόντων μπορεί να είναι καταγιγιστική.

Ως παράμετροι που επηρεάζουν την ενανθράκωση, αναφέρονται:

1. Οι συνθήκες περιβάλλοντος: Για σχετική υγρασία περιβάλλοντος 50% έως 70% παρατηρείται το μέγιστο ποσοστό ενανθράκωσης.
2. Η ποιότητα και πάχος της επικάλυψης:
  - a. Χαμηλή διαπερατότητα. Μειώνει ή και αναστέλλει τη διείσδυση του CO<sub>2</sub>.
  - b. Ύπαρξη ρωγμών. Επιταχύνει πολύ τη διαδικασία ενανθράκωσης.
  - c. Μικρές τιμές N/T. Περιορίζεται πολύ η διείσδυση υγρασίας και CO<sub>2</sub>.
3. Το είδος τσιμέντου:
  - a. Κατά τον U. Ludwig (1890): Τσιμέντα που περιέχουν σκωρίες υψικαμίνων και ποζολάνες ενανθρακώνονται πιο γρήγορα από το Portland.
  - b. Κατά τον Matthews (1984). Η προσθήκη ιπταμένων τεφρών στο τσιμέντο επιταχύνει την ενανθράκωση σε σκυροδέματα με αντοχή μικρότερη από 30 έως 35 MPa.
  - c. Από τους A. Zhu (1982), και X. Tan (1982). Η προσθήκη λιγνοσουλφόνης στο σκυρόδεμα σε ποσότητα 0,25% κ.β. μειώνει την ταχύτητα ενανθράκωσης κατά 10 έως 30%.
  - d. Η προσθήκη πυριτικής παιπάλης επιταχύνει την ενανθράκωση.

## 2.4 Μορφές Διάβρωσης

### 2.4.1 Γενική ή Ομοιόμορφη Διάβρωση

Σε αυτή την περίπτωση η επιφάνεια του χάλυβα καλύπτεται σχεδόν ομοιόμορφα από τα προϊόντα της διάβρωσης. Όταν η αλκαλικότητα του σκυροδέματος έχει μειωθεί σε μια ευρεία περιοχή, το προστατευτικό στρώμα έχει καταστραφεί και γι' αυτό εμφανίζονται σε ένα μεγάλο ποσοστό της επιφάνειας του χάλυβα τα προϊόντα της διάβρωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.1 (Κουρνέτας, 2010). Αιτίες μείωσης του pH σε ευρεία περιοχή του σκυροδέματος αποτελούν:

- Η απόπλυση του Ca(OH)<sub>2</sub> από το σκυρόδεμα λόγω επίδρασης μαλακού νερού,
- Η ενανθράκωση του σκυροδέματος
- Η επίδραση ανθρακικών ή θεικών αλάτων



Σχήμα 2.4.1. Ομοιόμορφη διάβρωση (Κουρνέτας, Φεβρουάριος 2010)

## 2.4.2 Τοπική Διάβρωση

Διακρίνεται σε:

- Διάβρωση κατά βελονισμό (pitting corrosion)

Αποκλειστική αιτία αυτού του τύπου διάβρωσης είναι τα χλωριόντα που μπορούν να βρίσκονται εξ αρχής στο σκυρόδεμα, είτε να διεισδύσουν από το περιβάλλον αργότερα, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.4.2 (Κουρνέτας, 2010).

- Μικρορηγματώδης διάβρωση (crevice corrosion)

Ανάλογη με τη διάβρωση κατά βελονισμό με τη διαφορά ότι ξεκινάει από μικρορωγμές ή μικροκοιλότητες του χάλυβα και όχι από έναν υγιή χάλυβα.

- Περικρυσταλλική διάβρωση (intergranular corrosion )

Εμφανίζεται μέσα στο μέταλλο και όχι στην επιφάνεια του. Συμβαίνει σε κράματα όταν μεταξύ τους υπάρχει διαφορά ηλεκτροχημικού δυναμικού. Αποφεύγεται σε χάλυβες με μικρό ποσοστό άνθρακα (<0,05%).



Σχήμα 2.4.2. Τοπική Διάβρωση (Κουρνέτας, Φεβρουάριος 2010)

### 2.4.3 Διάβρωση λόγω Ανάπτυξης Εξωτερικής Διαφοράς Δυναμικού

Διακρίνεται σε:

➤ Γαλβανική δράση (galvanic)

Είναι η ηλεκτροχημική δράση η οποία συμβαίνει όταν δύο μέταλλα με διαφορετικό ηλεκτροχημικό δυναμικό έρχονται σε επαφή μεταξύ τους. Όταν ένα μέταλλο, που έχει το δικό του ηλεκτροχημικό δυναμικό, έρχεται σε επαφή με ένα άλλο, με τη βοήθεια μικρής ποσότητας υγρασίας μπορεί να σχηματιστεί ένα γαλβανικό στοιχείο διάβρωσης. Συγκεκριμένα κίνδυνος διάβρωσης υφίσταται εάν η διαφορά δυναμικού μεταξύ δύο μετάλλων είναι  $>50$  mV. Η κατάσταση δυσχεραίνεται από την παρουσία χλωριούχων ή θεικών αλάτων.

➤ Ηλεκτρολυτική διάβρωση (electrolytic)

Άμεση εφαρμογή ρεύματος στην κατασκευή μπορεί να προκαλέσει διάβρωση. Τρόποι περιορισμού:

- Σκυρόδεμα πολύ καλής ποιότητας χωρίς χλωριόντα
- Ηλεκτρική μόνωση μεταξύ της πηγής ηλεκτρικού ρεύματος και κατασκευής.

### 2.4.4 Διάβρωση υπό Μηχανική Τάση (stress corrosion)

Εμφανίζεται σε χάλυβες υψηλής αντοχής υπό τάσεις μεγαλύτερες από  $0.8 f_{py}$  (με  $f_{py}$  συμβολίζεται η τάση διαρροής τους). Δεν παρατηρείται σκουριά ή κάποια απώλεια διατομής λόγω διάβρωσης. Ο μηχανισμός είναι περίπλοκος και δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμα πλήρως (Son & Yuen, 1993).

## 3 Εκτίμηση Διάρκειας Ζωής Κατασκευής

### 3.1 Διάρκεια Ζωής

Όπως είναι φανερό, η μελέτη των μηχανισμών φθοράς του οπλισμένου σκυροδέματος πλην άλλων επιτρέπει την ορθή εκτίμηση της διάρκειας ζωής των κατασκευών. Η κατανόηση του φαινομένου έχει ιδιαίτερη σημασία και διπλή εφαρμογή, καθώς η γνώση των μηχανισμών φθοράς είναι απαραίτητη τόσο για την κατασκευή ανθεκτικότερων έργων από οπλισμένο σκυροδέμα, ήτοι έργων με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, όσο και για τη σωστή πρόβλεψη του βαθμού ασφάλειας και κατάρτιση του κατάλληλου προγράμματος επισκευών για υφιστάμενες κατασκευές.

Ο ορισμός της διάρκειας ζωής μίας κατασκευής (service life) ποικίλει μιας και έχει απασχολήσει διάφορους ερευνητές και προσεγγίζεται κάθε φορά από διαφορετική οπτική. Ανάλογα με την εκάστοτε προσέγγιση, καθώς επίσης και με το σκοπό χρήσης (τεχνικός, οικονομικός, νομικός) του όρου «διάρκεια ζωής», έχουν επικρατήσει οι εξής ορισμοί: (Selvaraj, 2016)

- ❖ Ο (Weyers, 1998)(Weyers Richard E., 1998) περιγράφει το τέλος της εν λειτουργία ζωής ως «Η συνθήκη η οποία καθορίζει το τέλος της εν λειτουργία ζωής είναι η μείωση της φέρουσας ικανότητας ή της ασφάλειας.»
- ❖ Το δεύτερο CEB/RILEM International workshop Ανθεκτικότητας κατασκευών από Ο.Σ. περιγράφει το service life ως ακολούθως:
  - Τεχνική Διάρκεια Ζωής (Technical Service Life): Ο χρόνος που χρειάζεται για να φτάσει η κατασκευή σε ένα προκαθορισμένα τεχνικά μη αποδεκτό σημείο.
  - Λειτουργική Διάρκεια Ζωής (Functional Service Life) : Ο χρόνος μέχρι η κατασκευή να καταστεί παρωχημένη εξαιτίας αλλαγών στις λειτουργικές απαιτήσεις.
  - Οικονομική Διάρκεια Ζωής (Economic Service Life) : Ο χρόνος έως ότου η αντικατάσταση της κατασκευής να καθίσταται πλέον συμφέρουσα οικονομικά σε σχέση με τη διατήρηση της σε λειτουργική κατάσταση.
  - Διάρκεια Ζωής Σχεδιασμού (Design Service Life) : Το χρονικό διάστημα, εντός του οποίου μία κατασκευή έχει σχεδιαστεί πιθανοτικά να βρίσκεται σε λειτουργία υπό προκαθορισμένη συντήρηση και σε προκαθορισμένες συνθήκες. Το πέρας αυτού του χρονικού διαστήματος είναι προκαθορισμένο και ταυτίζεται με την στιγμή που η κατασκευή θα ξεπεράσει την πιθανότητα να βρίσκεται σε τεχνικά μη αποδεκτό επίπεδο, ακόμα και αν στην πραγματικότητα η κατασκευή δεν έχει κάποια φθορά.
  - Τέλος Ζωής (End of Life) : Πρακτικά, η στιγμή που θα κριθεί ότι δεν είναι οικονομικά βιώσιμο να διατηρηθεί η κατασκευή ή το στοιχείο σε λειτουργική κατάσταση.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας ως service life θα εννοείται η τεχνική διάρκεια ζωής (technical service life).

Το βασικό ζήτημα που ωθεί την επιστημονική κοινότητα στην αποσαφήνιση της έννοιας της διάρκειας ζωής είναι η πρόβλεψη αυτής και η ανάπτυξη πιθανοτικών, πειραματικών ή προσεγγιστικών μοντέλων με σκοπό την προσομοίωση των αληθινών περιβαλλοντικών συνθηκών και την εξαγωγή συμπεράσματος για τη φάση ζωής που βρίσκεται μια κατασκευή.

## 3.2 Προσεγγιστικά Μοντέλα Εκτίμησης Διάρκειας Ζωής

Γενικά, η γνώση της «φάσης ζωής» στην οποία βρίσκεται μία κατασκευή, πλην της έγκαιρης επέμβασης που αποτελεί βασική συνιστώσα της ασφαλούς χρήσης της κατασκευής, προσφέρει και οικονομική εκτίμηση του κόστους της επέμβασης ενώ ταυτόχρονα βοηθάει να ληφθούν σωστές αποφάσεις για τη μελλοντική διαχείρισή της. Άρα, είναι πολύ βασικό να μπορεί να προσεγγίσει κανείς την εσωτερική κατάσταση της κατασκευής από τα εξωτερικά χαρακτηριστικά της.

Στο πλαίσιο των μοντέλων που έχουν αναπτυχθεί με ακριβώς αυτόν τον σκοπό, της εκτίμησης της εναπομένουσας διάρκειας ζωής, τα πιο βασικά καταλήγουν σε συμπεράσματα λαμβάνοντας κυρίως υπόψη το μέγεθος και τη σοβαρότητα της διάβρωσης της κατασκευής ή του δομικού στοιχείου πιο συγκεκριμένα. Γι' αυτό και η μελέτη της διάβρωσης αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της παρούσας έρευνας.

Παρακάτω παρατίθενται χρονολογικά τα βασικότερα μοντέλα που υπάρχουν για την πρόβλεψη της διάρκειας ζωής. Αξίζει να σημειωθεί ότι ως διάρκεια ζωής για την πλειονότητα των μοντέλων, ορίζεται ο συνολικός χρόνος από την στιγμή που έγινε η κατασκευή έως τη στιγμή που εμφανίστηκε η πρώτη ρωγμή. Ωστόσο, υπάρχουν και άλλες διαφορετικές προσεγγίσεις.

### 3.2.1 Μοντέλο Clear Kenneth (1976)

Ο Clear Kenneth (Clear Kenneth, 1976) πρότεινε ένα μοντέλο εκτίμησης της ζωής μίας κατασκευής θεωρώντας βασικές μεταβλητές όπως το πάχος της επικάλυψης, το λόγο N/T και τη συγκέντρωση των χλωριόντων (σε ppm) σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Life = \frac{129}{\frac{W}{c}} \frac{(cover)^{1.22}}{Cl^{0.42}}, \quad (3.1)$$

Ο Clear βασισμένος σε ένα συνδυασμό εργαστηριακών και πραγματικών δεδομένων πρότεινε επιπλέον την παρακάτω συσχέτιση του ρυθμού διάβρωσης  $I_{cor}$  με τον αναμενόμενο χρόνο εμφάνισης φθοράς στην κατασκευή λόγω διάβρωσης (Πίνακας 3.2.1).

Πίνακας 3.2.1. Συσχέτιση του αναμενόμενου χρόνου εμφάνισης φθοράς λόγω διάβρωσης με το ρυθμό διάβρωσης (Clear Kenneth)

Κατηγορία	$I_{cor}$ ( $\mu A/cm^2$ )	Χρόνος Εμφάνισης Φθοράς
1	$I_{cor} < 0.5$	Δεν αναμένεται φθορά λόγω διάβρωσης
2	$0.5 \leq I_{cor} < 2.7$	Είναι πιθανή φθορά λόγω διάβρωσης σε χρόνο από 10 έως 15 χρόνια
3	$2.7 \leq I_{cor} < 27$	Αναμένεται φθορά σε χρόνο από 2 έως 10 χρόνια
4	$27 \leq I_{cor}$	Αναμένεται φθορά σε 2 χρόνια ή λιγότερο

### 3.2.2 Μοντέλο Bazant (1979)

Ο Bazant et al. (1979) (Zdenek & Bazant, 1979) πρότεινε ένα αριθμητικό μοντέλο για να εκτιμήσει το χρόνο διάβρωσης που πιθανώς θα οδηγήσει στο άνοιγμα επιφανειακών ρωγμών στην επικάλυψη του σκυροδέματος. Ως φθορά εξαιτίας της διάβρωσης, λαμβάνεται ο όγκος της διόγκωσης εξαιτίας της ανάπτυξης οξειδωσης γύρω από τον άξονα του οπλισμού. Τα οξείδια του σιδήρου είναι σχεδόν τετραπλάσια σε σχέση με τον όγκο του αρχικού οπλισμού. Εξαιτίας της διόγκωσης, το σκυρόδεμα που περιβάλλει το σκουριασμένο οπλισμό αναπτύσσει εφελκυστικές τάσεις. Σύμφωνα με το εν λόγω μοντέλο, η αύξηση του όγκου του χαλύβδινου οπλισμού εξαιτίας της σκουριάς συνεπάγεται την αύξηση της ακτίνας του από  $D$  σε  $D + \Delta D$  έως ότου σχηματιστεί ρωγμή στην επιφάνεια. Ο χρόνος έως το σχηματισμό της πρώτης ρωγμής,  $t_{cor}$ , εξαρτάται κυρίως από το ρυθμό διάβρωσης, το βάθος της διάδοσης, τις αποστάσεις των ράβδων οπλισμού ή την περίμετρό τους.

$$t_{cor} = \rho_{cor} \frac{D\Delta D}{pj_r} , \quad (3.2)$$

όπου,

- $t_{cor}$ : ο σταθερός ρυθμός διάβρωσης (steady state corrosion) ή η περίοδος διάδοσης (propagation period) σε χρόνια,
- $\rho_{cor}$ : η πυκνότητα διαβρωμένου χάλυβα ( $\sim 3600 \text{kg/m}^3$ ),
- $D$ : η διάμετρος της ράβδου οπλισμού (mm),
- $\Delta D$ : η αύξηση της διαμέτρου της ράβδου λόγω της σκουριάς (cm),
- $p$ : η περίμετρος της ράβδου (mm),
- $j_r$ : ο στιγμιαίος ρυθμός διάβρωσης ( $\text{g/m}^2\text{-s}$ ).

Ο στιγμιαίος ρυθμός διάβρωσης υπολογίζεται από τη σχέση (3.3) :

$$j_r = i_{cor} \frac{W}{F} = 0.288i_{cor} , \quad (3.3)$$

όπου,

- $W$ : ισοδύναμο βάρος του χάλυβα =  $27,925 \text{kg/m}^3$ ,
- $F$ : η σταθερά του Faraday =  $96,847\text{C}$ ,
- $i_{cor}$ : η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης ( $\mu\text{A/cm}^2$ ).

Η κρίσιμη αύξηση της διατομής του χάλυβα  $\Delta D$ , με την παραδοχή ότι οι αποστάσεις μεταξύ των ράβδων είναι μεγαλύτερες από  $6D$  (Reale & O'Connor, 2012) υπολογίζεται από την εξίσωση (3.4) :

$$\Delta D = 2f_t \frac{L}{D} \delta_{pp} , \quad (3.4)$$

όπου,

- $L$  : το πάχος της επικάλυψης,
- $f_t$  : η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος,
- $D$  : η διάμετρος της χαλύβδινης ράβδου,
- $\delta_{pp}$  : η ελαστικότητα της οπής της ράβδου.

Η ελαστικότητα  $\delta_{pp}$  της οπής της ράβδου υπολογίζεται από τη σχέση (3.5) :

$$\delta_{pp} = \left[ \frac{D(1+\phi_{cr})}{E} \right] (1 + \gamma) + D^2 \left[ \frac{2}{s^2} + \frac{1}{4L(L+D)} \right], \quad (3.5)$$

όπου,

- $\phi_{cr}$  : σταθερά ερπυσμού του σκυροδέματος,
- $\gamma$  : ο λόγος Poisson του σκυροδέματος,
- $E$  : το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος.

Ο κρίσιμος χρόνος κατά τον οποίο η διάβρωση προκαλεί ρωγμές σε όλη την επιφάνεια της επικάλυψης του σκυροδέματος ονομάζεται  $t_{cr}$  (critical) και ισούται με (3.6) :

$$t_{cr} = t_p + t_{cor}, \quad (3.6)$$

όπου,

- $t_p$  : χρόνος αποπαθητικοποίησης (χρόνια),
- $t_{cor}$  : χρόνος διάβρωσης με σταθερό ρυθμό (χρόνια).

Ο χρόνος αποπαθητικοποίησης σύμφωνα με τον Bazant et al. μπορεί να υπολογιστεί από την κάτωθι εξίσωση (3.7) :

$$t_p = \frac{1}{12D_{app}} \left( \frac{L}{1 - \sqrt{\frac{C_{th}}{C_s}}} \right)^2, \quad (3.7)$$

όπου,

- $L$  : πάχος επικάλυψης (mm)
- $C_{th}$  : οριακή τιμή συγκέντρωσης χλωριόντων ( $\text{kg/m}^3$  σκυροδέματος),
- $C_s$  : συγκέντρωση των χλωριόντων στους επιφανειακούς πόρους του σκυροδέματος ( $\text{kg/m}^3$  σκυροδέματος),
- $D_{app}$ : φαινόμενος συντελεστής διάχυσης χλωριόντων ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ).



Επιπλέον ο Bazant (Bažant & Oh, 1983) πρότεινε ένα ακόμα πιο απλοποιημένο μοντέλο λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό διάβρωσης του χάλυβα οπλισμού σύμφωνα με την εξίσωση (3.8) :

$$L_f = \frac{1.72 \left( \frac{f'_t}{E} \right) f \left( \frac{C_t}{D} \right) D}{j_r}, \quad (3.8)$$

όπου,

- $L_f$  : η διάρκεια ζωής σε χρόνια,
- $j_r$  : ο στιγμιαίος ρυθμός διάβρωσης ( $\text{g/m}^2\text{-s}$ ),
- $f'_t$  : η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος,
- $E$  : το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος,
- $C_t$  : το πάχος της επικάλυψης-σκυροδέματος του οπλισμού,
- $D$  : η διάμετρος της χαλύβδινης ράβδου (mm).

### 3.2.3 Μοντέλο Tuutti (1982)

Ο Tuutti το 1982 ήταν ο πρώτος που παρατήρησε ότι η διαδικασία της διάβρωσης μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια καθώς με αυτόν τον τρόπο προσομοιάζεται επαρκώς η εξέλιξη της διάβρωσης με το χρόνο. Με την παρατήρηση αυτή λοιπόν, όρισε τα παρακάτω στάδια:

- Το αρχικό στάδιο που συμβολίζεται με  $t_i$  (Initiation (Start) Stage).

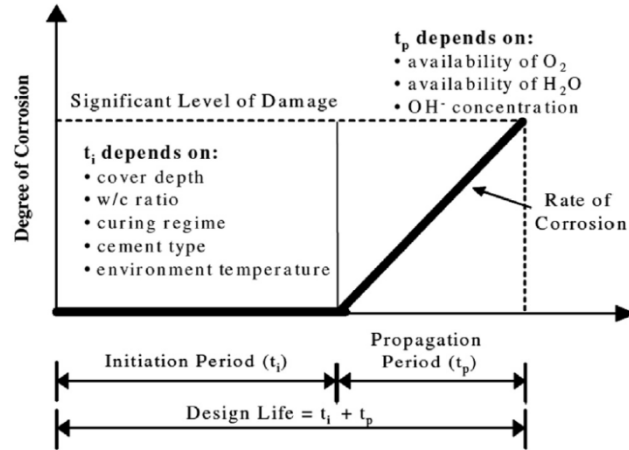
Το αρχικό στάδιο διάβρωσης είναι ο χρόνος που μετράει από την εισαγωγή των διαβρωτικών παραγόντων έως την αποπαθητικοποίηση του χάλυβα. Κυρίως εξαρτάται από το ρυθμό με τον οποίο τα χλωριόντα διεισδύουν στην επικάλυψη του σκυροδέματος, αλλά και από το πάχος της επικάλυψης, το λόγο νερού-τσιμέντου, τον τύπο του τσιμέντου καθώς και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

- Το στάδιο διάδοσης της διάβρωσης που συμβολίζεται με  $t_p$  (Propagation Stage)

Το στάδιο αυτό ξεκινάει από τη στιγμή που συμβαίνει η πρώτη αλλοίωση στην επιφάνεια του χαλύβδινου οπλισμού έως την πρώτη παρατηρήσιμη ρωγμή (περίπου 0.6mm) (Reale & O'Connor, 2012) ή την εκτίναξη της επικάλυψης. Εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  και  $\text{OH}^-$  (Ahmad, 2003)(Tuutti, 1982).

Επιπλέον, πέρα από τους χρόνους  $t_i$  και  $t_p$ , ορίζονται η διάρκεια ζωής σχεδιασμού ως το άθροισμα των χρόνων αυτών, καθώς επίσης και ο ρυθμός διάβρωσης (rate of corrosion), ως η κλίση της καμπύλη διάβρωσης στο στάδιο διάδοσης.

Λεπτομερέστερα, στο Σχήμα 3.2.1 φαίνονται σαφώς οι χρόνοι  $t_i$  και  $t_p$ .



Σχήμα 3.2.1. Μοντέλο Διάρκειας Ζωής Κατασκευής με Διάβρωση (Tuutti 1982)

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη βιβλιογραφία (Ranjith et al., 2016) αναφέρεται ότι το μοντέλο του Tuutti υποτιμάει το χρόνο  $t_p$ .

### 3.2.4 Μοντέλο Morinaga (1988)

Ο Morinaga (Morinaga et al., 1994) πρότεινε το 1988 ένα εμπειρικό μοντέλο που συσχετίζει τη διάρκεια ζωής της κατασκευής με το ρυθμό διάβρωσης σύμφωνα με τη σχέση (3.9) :

$$t_{cor} = \frac{Q_{cr}}{j_r} , \quad (3.9)$$

με

- $t_{cor}$  : χρονική περίοδος (χρόνια) σταθερού ρυθμού διάβρωσης,
- $j_r$  : ο στιγμιαίος ρυθμός διάβρωσης ( $\text{g/m}^2\text{-s}$ ),

όπου,

$$Q_{cr} = 0.602D \left[ 1 + \left( \frac{2C_V}{D} \right) \right]^{0.85} , \quad (3.10)$$

με

- $Q_{cr}$ : η ποσότητα της διάβρωσης τη στιγμή που ρηγματώνεται το σκυρόδεμα ( $\times 10^{-4} \text{g/cm}^2$ ),
- $C_V$  : η επικάλυψη σκυροδέματος (mm),
- $D$  : η διάμετρος της χαλύβδινης ράβδου (mm).

### 3.2.5 Μοντέλο Andrade (1998)

Το 1989 οι Andrade et al. (Alonso et al., 1998) πρότειναν ένα μοντέλο υπολογισμού της εναπομένουσας διαμέτρου της διαβρωμένης χαλύβδινης ράβδου. Βασισμένη στο ποσοστό μείωσης της ακτίνας της χαλύβδινης ράβδου και στη σταθερά πυκνότητας της διάβρωσης, η εναπομένουσα ζωή μιας κατασκευής μπορεί να υπολογιστεί με την ακόλουθη διαδικασία (Selvaraj, 2016) (σχέση (3.11)) :

$$\varphi(t) = \varphi_i - 0.023i_{cor} t, \quad (3.11)$$

όπου,

- $\varphi(t)$  : η εναπομένουσα διάμετρος της ράβδου στο χρόνο  $t$  (mm),
- $\varphi_i$  : η αρχική διάμετρος της ράβδου (mm),
- $i_{cor}$  : η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).

Ο συντελεστής  $0.023=0.0116 \times a$  χρησιμεύει στη μετατροπή της πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης σε ρυθμό διάβρωσης, με αντίστοιχες μονάδες  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  σε  $\mu\text{m}/\text{year}$  και με  $a=2$  για ομοιόμορφη διάβρωση.

Το παραπάνω μοντέλο οδήγησε σε παρόμοια κατηγοριοποίηση με το μοντέλο του Clear Kenneth (Πίνακας 3.2.1). Βάσει αυτού του μοντέλου, έχουν αναπτυχθεί πολλές προσεγγίσεις για την εναπομένουσα διάρκεια ζωής, απαιτώντας σε κάθε περίπτωση να οριστεί ποιο είναι το όριο εκείνο, πέρα από το οποίο η κατασκευή δεν κρίνεται ασφαλής.

### 3.2.6 Μοντέλο Wang and Zhao (1999)

Το 1999 οι Wang και Zhao (Liang et al., 1999) ανέπτυξαν ένα μοντέλο που, μέσω ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, υπολογίζει το πάχος των προϊόντων διάβρωσης ( $\Delta$ ) του χαλύβδινου οπλισμού που προκαλεί ρηγμάτωση στο σκυροδέμα. Η σταθερά ανάπτυξης των προϊόντων της διάβρωσης ( $\gamma$ ) σε όρους αντοχής κύβου σκυροδέματος δίνεται από:

$$\gamma = \frac{\Delta}{H} = 0.33 \left( \frac{D}{C_r} \right)^{0.565} f_{cu}^{1.436}, \quad (3.12)$$

όπου,

- $\gamma$  : η σταθερά επέκτασης των προϊόντων διάβρωσης,
- $\Delta$  : το πάχος των προϊόντων της διάβρωσης ,
- $H$  : πλήθος ρωγμών στην επιφάνεια του σκυροδέματος,
- $D$  : η διάμετρος της χαλύβδινης ράβδου σε mm,
- $C_r$  : η επικάλυψη σκυροδέματος σε mm,
- $f_{cu}$  : η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $\text{kN}/\text{cm}^2$ ),
- Ο λόγος  $\frac{\Delta}{H}$  είναι σχεδόν σταθερός και ίσος με 7.6. Έτσι αρκεί ο προσδιορισμός του  $\Delta$  για την εξαγωγή αποτελέσματος.

Ως εκ τούτου, η τιμή  $H$  μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση του απαραίτητου χρόνου ανάπτυξης διαμήκους ρηγματώσης εξαιτίας της διάβρωσης ως εξής (σχέση 3.13) :

$$t_{cor} = \frac{H}{P_r}, \quad (3.13)$$

όπου,

- $t_{cor}$  : χρονική περίοδος (χρόνια) σταθερού ρυθμού διάβρωσης,
- $P_r$  : ο ρυθμός διείδυσης της διάβρωσης στη ράβδο.

επιπλέον ο  $P_r$  υπολογίζεται από τη σχέση (3.14) :

$$P_r = \frac{W}{F\rho_{st}} i_{cor}, \quad (3.14)$$

όπου,

- $W$  : ισοδύναμο βάρος του χάλυβα = 27,925 kg/m<sup>3</sup>,
- $F$  : η σταθερά του Faraday = 96,847C,
- $i_{cor}$ : η πυκνότητα ρεύματος διάβρωσης (μΑ/cm<sup>2</sup>).
- $\rho_{st}$  : η πυκνότητα του χάλυβα (kg/m<sup>3</sup>).

### 3.2.7 Παραμετρική σύγκριση μοντέλων από Faiz Uddin Ahmed Shaikh (2018)

Στην πράξη, η εφαρμογή των παραπάνω μοντέλων φαίνεται απαιτητική και πολύπλοκη. Μία απλοποίηση της εφαρμογής είναι η συσχέτιση των παραπάνω μεγεθών με το εύρος της ρωγμής. Μία τέτοια παραμετρική μελέτη έχει γίνει σε διάφορες εργασίες που συνοψίζει ο Faiz Uddin Ahmed Shaikh (2018) (Shaikh, 2018) σε μορφή πίνακα όπως παρατίθεται παρακάτω (Πίνακας 3.2.2). Στις εργασίες αυτές, έχει γίνει προσπάθεια συσχέτισης του ρυθμού διάβρωσης με τα εύρη των εγκάρσιων ρωγμών. Σύμφωνα με τον (Shaikh, 2018) οι εγκάρσιες ρωγμές είναι αυτές που εμφανίζονται συχνότερα και είναι λιγότερο κρίσιμες, καθώς δεν εκτίθεται μεγάλη επιφάνεια στην ατμόσφαιρα. Αντίθετα, οι διαμήκεις ρωγμές είναι κρίσιμότερες, μιας και η επιφάνεια του οπλισμού που έρχεται σε επαφή με τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι μεγάλη, αλλά εμφανίζονται σπανιότερα. Μάλιστα, συνήθως η ύπαρξη των διαμηκών ρωγμών προϋποθέτει την ύπαρξη των εγκάρσιων που έχουν εμφανιστεί πρώτα, γι' αυτό και οι δεύτερες έχουν μελετηθεί ευρέως.

Με αυτή την μελέτη, γίνεται δυνατή η κατανόηση της λειτουργίας του μηχανισμού της διάβρωσης καθώς επίσης και η επίδραση που έχει το εύρος της ρωγμής  $w_{crack}$  στο ρυθμό της διάβρωσης  $I_{cor}$  (Otiemo et al., 2010). Αξίζει να σημειωθεί ότι σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση αποτελούν επίσης η ποιότητα του σκυροδέματος, ο λόγος νερού τσιμέντου οι προσμίξεις και η επικάλυψη του οπλισμού, συνιστώσες που έχουν ληφθεί υπόψη στην παραμετρική έρευνα που παρατίθεται στον πίνακα.

Κατά την παράθεση των εργασιών ο (Shaikh, 2018) σχολιάζει ότι, παρά την κοινώς αποδεκτή άποψη ότι το εύρος των ρωγμών επιταχύνει τη διάβρωση, δεν μπορεί να εξαχθεί βέβαιο συμπέρασμα που να επιβεβαιώνει αυτόν τον ισχυρισμό από σημαντικό πλήθος εργασιών. Ωστόσο, παρατηρείται μία αναλογική συσχέτιση του εύρους ρωγμής με το ρυθμό διάβρωσης όταν πρόκειται για εύρη ρωγμών μικρότερα των 0.30 mm. Ειδικότερα, για εύρη ρωγμών μεγαλύτερα από 0.5-0.7 mm δεν παρατηρείται καμία συσχέτιση των δύο μεγεθών.

**Πίνακας 3.2.2. Σύνοψη της επίδρασης του εύρους ρωγμής στη διάβρωση του χάλυβα στο Ο.Σ.**

References	Type of concrete	Water/cement	Study period	Corrosion rate ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), or corrosion current ( $\mu\text{m}/\text{year}$ ), or corrosion potential (mV), or mass loss (%)						
				Uncracked	Crack width = 0.1 mm	Crack width = 0.2 mm	Crack width = 0.3 mm	Crack width = 0.4 mm	Crack width = 0.5 mm	Crack width = 0.7 mm
Otieno et al. (2010)	OPC concrete	0.4	28 Weeks	0.04 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.14 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			0.36 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		0.69 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
	OPC concrete	0.55	28 Weeks	0.10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.31 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			0.78 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		0.93 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
	50% Slag	0.4	28 Weeks	0.04 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.07 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			0.26 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		0.38 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
	50% Slag	0.55	28 Weeks	0.05 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.07 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			0.41 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		0.55 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Mohammed et al. (2001a)	OPC	0.30	14 Weeks				0.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			
		0.50	14 Weeks	0.00 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		1.4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
		0.70	14 Weeks				0.15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			
Sistonen et al. (2007)	OPC	0.46	4 Years	0.24 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.27 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.52 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.59 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.44 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.54 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	0.41 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Quero et al. (2010)	OPC	0.3	4 Years	- 400 mV	- 600 mV	- 440 mV	- 500 mV	- 400 mV		
		0.4		- 500 mV	- 600 mV	- 500 mV	- 480 mV	- 400 mV		
		0.5		- 600 mV	- 600 mV	- 540 mV	- 540 mV	- 400 mV		
		0.6		- 500 mV	- 700 mV	- 540 mV	- 540 mV	- 450 mV		
Sahmaran and Yaman (2008)	OPC mortar	0.48	100 hours	1.3% Mass loss	1.5% Mass loss	1.6% Mass loss	2.3% Mass loss			
Montes et al. (2004)	OPC concrete	0.37	1 Year	0.15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			1.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	
		0.45	1 Year	1.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			1.7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		3.3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	
	20% Fly ash	0.37	1 Year	0.45 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			1.1 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		1.6 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	
		0.45	1 Year	0.75 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			1.7 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		2.9 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	
	40% Fly ash	0.37	1 Year	0.15 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			0.65 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		1.0 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	
		0.45	1 Year	0.25 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$			1.4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$		2.4 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	

Πίνακας 3.2.2 (συν.). Σύνοψη της επίδρασης του εύρους ρωγμής στη διάβρωση του χάλυβα στο Ο.Σ.

References	Type of concrete	Water/cement	Study period	Corrosion rate ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), or corrosion current ( $\mu\text{m}/\text{year}$ ), or corrosion potential (mV), or mass loss (%)						
				Uncracked	Crack width = 0.1 mm	Crack width = 0.2 mm	Crack width = 0.3 mm	Crack width = 0.4 mm	Crack width = 0.5 mm	Crack width = 0.7 mm
Scott and Alexander (2007)	OPC		90 Weeks		Cover = 20 mm	2.65 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				3.23 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
					Cover = 40 mm	1.20 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				1.48 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
	30% Fly ash		90 Weeks		Cover = 20 mm	0.64 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				0.50 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
					Cover = 40 mm	0.39 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				0.71 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
	50% Slag		90 Weeks		Cover = 20 mm	0.39 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				0.53 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
					Cover = 40 mm	0.35 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				0.51 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
	7% Silica fume		90 Weeks		Cover = 20 mm	0.67 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				1.03 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
					Cover = 40 mm	0.59 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$				1.12 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$
Otsuki et al. (2000)	OPC concrete	0.30	4 Weeks			0.95 $\mu\text{m}/\text{year}$				
		0.50	4 Weeks			1.45 $\mu\text{m}/\text{year}$				
		0.70	4 Weeks			3.39 $\mu\text{m}/\text{year}$				
Berke et al. (1993)	OPC concrete		1 Year			Corrosion area = 1600 $\text{mm}^2$				
Schiebl and Raupach (1997)	OPC concrete	0.6	24 Weeks		5 mg (loss)	15 mg (loss)	35 mg (loss)		100 mg (loss)	
		0.6	2 Years		90 mg (loss)	20 mg (loss)	70 mg (loss)		70 mg (loss)	
		0.5	24 Weeks		4 mg (loss)	10 mg (loss)	14 mg (loss)		12 mg (loss)	
		0.5	2 Years		9 mg (loss)	50 mg (loss)	110 mg (loss)		100 mg (loss)	
Raupach (1996)	OPC concrete cover 35 mm	0.5	24 Weeks		1.3 mg (loss)	2.4 mg (loss)	3.7 mg (loss)		2.1 mg (loss)	
		0.6			3.5 mg (loss)	13.7 mg (loss)	26.4 mg (loss)		65.7 mg (loss)	
		0.5	2 Years		4.9 mg (loss)	38.8 mg (loss)	107.1 mg (loss)		83.5 mg (loss)	
		0.6			11.3 mg (loss)	30.7 mg (loss)	104.8 mg (loss)		110.7 mg (loss)	
	Cover 15 mm	0.6	24 Weeks		123.6	124.7	158.4		241.3	
	Cover 15 mm	0.6	2 Years		243.9	268.4	273.1		365.8	

### 3.3 Εκτίμηση Διάρκειας Ζωής

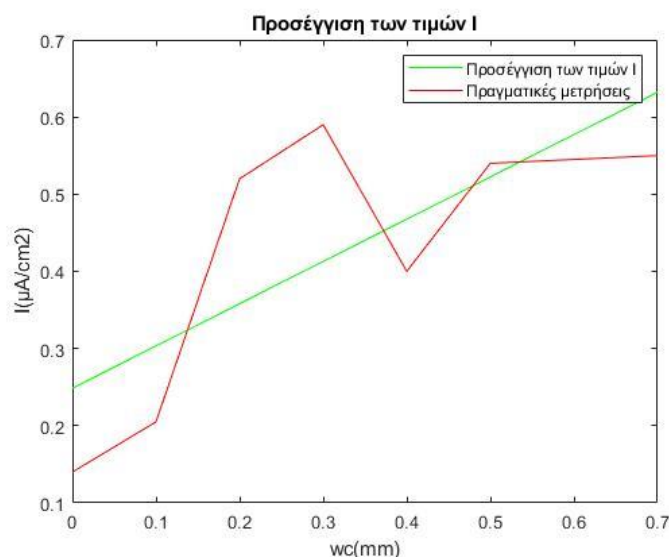
Όπως φαίνεται από τα παραπάνω μοντέλα, η πρόβλεψη και η εκτίμηση της διάρκειας ζωής μίας κατασκευής έχει απασχολήσει πολλούς ερευνητές. Σύμφωνα με την εργασία των A. Ranjith et al. (Ranjith et al., 2016), προτείνονται κάποιες βελτιστοποιήσεις στα ήδη υπάρχοντα μοντέλα που προαναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3.2. Στην εργασία, παρατηρείται ότι τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στο παραπάνω κεφάλαιο εκτιμούν ικανοποιητικά τη διάρκεια ζωής από τη στιγμή που αρχίζει η διάβρωση έως τη στιγμή που συμβαίνει η πρώτη ρηγμάτωση. Επίσης, αναδεικνύεται η σημασία του πάχους της επικάλυψης σκυροδέματος, είτε πρόκειται για διάβρωση λόγω χλωριόντων, είτε λόγω ενανθράκωσης. Επίσης, επισημαίνεται ότι το υπάρχον μοντέλο του Bazant λαμβάνει υπόψη μόνο την επίδραση της ονομαστικής περιμέτρου της χαλύβδινης ράβδου για τον υπολογισμό της πυκνότητας ρεύματος διάβρωσης. Τέλος, είναι άξιο αναφοράς το γεγονός ότι αρκετές σταθερές που χρησιμοποιούνται, δεν υπολογίζονται ακριβώς, με αποτέλεσμα να υπάρχει διακύμανση στις μετρήσεις, της τάξης του 20-40%.

#### 3.3.1 Προτεινόμενη Μεθοδολογία Εκτίμησης Διάρκειας Ζωής

Η παρακάτω μεθοδολογία βασίζεται στο προτεινόμενο μοντέλο από τους (Torres-Acosta et al., 2007). Αναπτύσσεται, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί το εύρος της ρηγμάτωσης ( $w_{crack}$ ), ως βασική παράμετρος υπολογισμού της διάρκειας ζωής της κατασκευής.

Για το σκοπό αυτό ακολουθήθηκε η παρακάτω διαδικασία:

1. Θεωρήθηκε σκυρόδεμα OPC και λόγος Νερού-Τσιμέντου = 0.4.
2. Θεωρήθηκε χρόνος ίσος με των πειραματικών δεδομένων δηλαδή  $t = 48 \text{ weeks} = 0.92 \text{ years}$ ,
3. Προσεγγίστηκε η σχέση του εύρους ρωγμής  $w_{crack}$  με το ρυθμό διάβρωσης  $I_{cor}$  με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.



Σχήμα 3.3.1. Απεικόνιση Γραμμικής Παλινδρόμησης μεταξύ πειραματικών και πραγματικών τιμών του  $i_{cor}$

Από τη γραμμική παλινδρόμηση προέκυψε η παρακάτω συσχέτιση (3.15) :

$$\hat{I}(w_{crack}) = 0.2486 + 0.5477 \cdot w_{crack} \quad (3.15)$$

για  $\hat{I} < \frac{15\mu A}{cm^2}$ ,  
όπου,

- $\hat{I}(w_{crack})$  : η προσέγγιση της τιμής του  $I$  σε  $\mu A/cm^2$ ,
- $w_{crack}$  : το εύρος ρωγμής σε mm.

Προκύπτει από τη στατιστική ανάλυση, αν και με μικρό πλήθος δεδομένων, ότι υπάρχει θετική γραμμική συσχέτιση  $r = 0.7319$ , η οποία κρίνεται ικανοποιητική. Επιπλέον το μέσο τετραγωνικό σφάλμα προκύπτει ίσο με  $MSE = 0.0181$ . (Παπαδάτος et al., 2010)

Στην εργασία των (Alonso et al., 1998), ως δεύτερο συμπέρασμα αναφέρεται ότι το εύρος ρωγμής  $w_{crack}$  φαίνεται να συσχετίζεται γραμμικά με τη μείωση της ακτίνας της ράβδου λόγω διάβρωσης. Στην ίδια εργασία το προτεινόμενο μοντέλο υπολογισμού της μείωσης της ακτίνας είναι  $\Delta\varphi(t) = 0.023I_{corr}t$ . Για συγκεκριμένο χρόνο  $t$ , το  $\Delta\varphi$  συσχετίζεται γραμμικά με το  $I_{corr}$ . Αυτό σημαίνει ότι η παραδοχή για γραμμική συσχέτιση των  $w_{crack}$  και  $I_{corr}$  τεκμηριώνεται. Σημειώνεται επίσης ότι η παραδοχή αυτή ισχύει για τιμές του  $I_{corr} < 15-16\mu A/cm^2$ .

Άρα η προσέγγιση της συσχέτισης των δύο μεταβλητών,  $I$  και  $w_{crack}$  μπορεί να εκφραστεί ικανοποιητικά από τη σχέση 3.15.

Επιπλέον σύμφωνα με τον (Stanish, 1997), το εφελκυστικό φορτίο που παραλαμβάνει ο χαλύβδινος οπλισμός μειώνεται σε αναλογία με την απώλεια διατομής χάλυβα εξαιτίας της διάβρωσης η οποία εκφράζεται με τη μείωση της μάζας του χάλυβα. Δηλαδή, αν συμβολιστεί με  $F_0$  το εφελκυστικό φορτίο που έχει σχεδιαστεί να παραλάβει ο χάλυβας, και με  $\Delta F_{loss} = F_0 - F(t)$  τη μείωση του εφελκυστικού φορτίου που μπορεί να παραληφθεί τη χρονική στιγμή  $t$ , τότε:

$$\Delta F_{loss} \sim \Delta m_{loss}, \quad (3.16)$$

όπου,

- $\Delta m_{loss}$  : η μείωση της μάζας =  $m_0 - m(t)$

Άρα, η ποσοστιαία μεταβολή του εφελκυστικού φορτίου αντοχής,  $f_{loss}$ , ισούται με την ποσοστιαία μεταβολή της μάζας εξαιτίας της διάβρωσης,  $\mu_{loss}$ . Δηλαδή:

$$\frac{\Delta F_{loss}}{F_0} = f_{loss} = \frac{\Delta m_{loss}}{m_0} = \mu_{loss}, \quad (3.17)$$

Επιπλέον, βάσει του μοντέλου των Torres et al. η διάρκεια ζωής μπορεί να προσεγγιστεί από το παρακάτω διάγραμμα (Σχήμα 3.3.2). Πιο συγκεκριμένα, ολόκληρη η διάρκεια ζωής (LFT) από τη στιγμή της κατασκευής μέχρι τη στιγμή που θα επέλθει η ορισμένη ως οριακή κατάσταση φόρτισης ( $F_{ultimate}$ ) ισούται με τους χρόνους  $T_1 + T_2 + t_{lim}$ . Άρα:

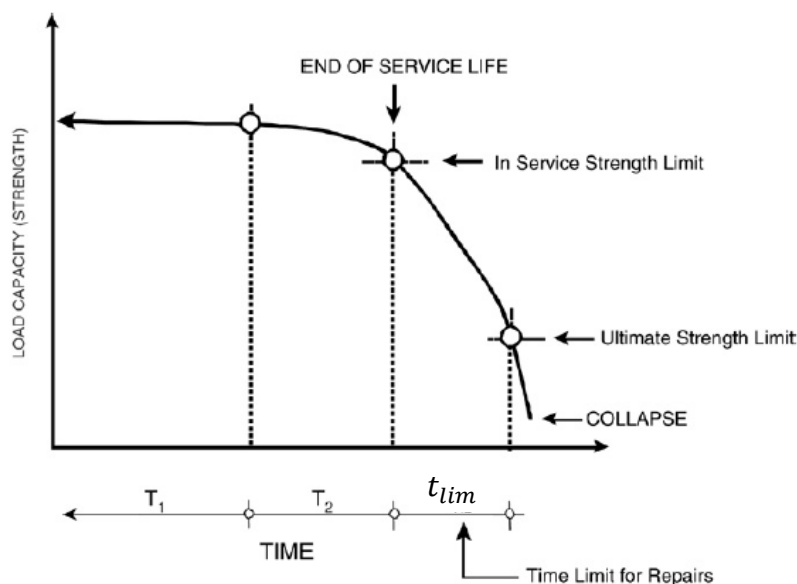


$$Lifetime = T_1 + T_2 + t_{lim}, \quad (3.18)$$

όπου,

- $T_1$  : το αρχικό χρονικό διάστημα από την κατασκευή έως την έναρξη της διάβρωσης (ταυτίζεται με το  $t_i$  (initiation period) του μοντέλου του Tuutti και με το  $t_p$  (depassivation time) του Bazant),
- $T_2$  : ο χρόνος διάβρωσης σταθερού ρυθμού (ταυτίζεται με το  $t_p$  (propagation period) του Tuutti και με το  $t_{cor}$  του Bazant) που σημαίνει ο χρόνος από τη στιγμή που ξεκινάει η διαδικασία της διάβρωσης μέχρι την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής στην επικάλυψη,
- $t_{lim}$  : ο χρόνος από το σχηματισμό της πρώτης ρωγμής έως τη στιγμή που θα επέλθει σημαντική μείωση της ικανότητας παραλαβής εφελκυστικών φορτίων (αντοχή) του χάλυβα (οριακή τιμή που έχει προδιαγραφεί κατά το σχεδιασμό).

Από το σχήμα 3.3.2 φαίνεται ότι το δυνατό παραλαμβανόμενο εφελκυστικό φορτίο (αντοχή) από το χάλυβα μέχρι και το χρόνο  $T_2$  δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα. Αντίθετα, μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής, η αντοχή του χάλυβα μειώνεται ραγδαία μέχρι να φτάσει την οριακή τιμή της.



Σχήμα 3.3.2. Επεξήγηση Διάρκειας Ζωής σύμφωνα με τους Torres et al.

Για την παρούσα μεθοδολογία, γίνεται η παραδοχή ότι η οριακή τιμή της αντοχής του χάλυβα, πέραν της οποίας η κατασκευή δε θεωρείται ασφαλής για χρήση, ορίζεται ως η τιμή εκείνη όπου οι συντελεστές των φορτίων σχεδιασμού στην οριακή κατάσταση αστοχίας (Ευρωκώδικας:  $1.35G+1.50Q$ ) γίνουν ίσοι με τη μονάδα. Ο συντελεστής που θα φτάσει πρώτος τη μονάδα είναι ο 1.35 γι' αυτό και επιλέγεται αυτός ως πιο κρίσιμος. (Torres-Acosta et al., 2007)-Παράγραφος 1. Ως εκ τούτου η οριακή αποδεκτή ποσοστιαία μείωση του φορτίου που μπορεί να παραληφθεί από το χάλυβα είναι:

$$f_{loss,lim} = \frac{\Delta F_{loss}}{F_0} = \frac{1.35-1}{1.35} \times 100\% = 26\%, \quad (3.19)$$

Άρα ανάλογη είναι και η αποδεκτή ποσοστιαία μείωση της μάζας του χάλυβα:

$$\mu_{loss,lim} = \frac{\Delta m_{loss}}{m_0} = 26\% \Rightarrow m_0 - m(t_{lim}) = 0.26m_0, \quad (3.20)$$

Επιπλέον ισχύει ότι:

$$\Delta m_{loss}(t) = \rho_{Fe} \cdot \pi \cdot L \cdot \Delta \varphi_{loss}^2(t), \quad (3.21)$$

όπου,

- $\rho_{Fe}$  : η πυκνότητα του χάλυβα = 7.86 g/m<sup>3</sup>,
- $\Delta m_{loss}(t)$  : η μείωση της μάζας (g) του χάλυβα τη χρον. στιγμή t,
- $L$  : το μήκος της διαβρωμένης ζώνης (mm),
- $\Delta \varphi_{loss}(t)$  : η μείωση της ακτίνας της χαλύβδινης ράβδου (mm) τη χρον. στιγμή t.

Ταυτόχρονα, οι Torres et al. συσχέτισαν πειραματικά τη μέγιστη ρωγμή που εμφανίζεται σε μία κατασκευή με τη μείωση της ακτίνας μέσω της σχέσης (3.22) :

$$\Delta \varphi_{loss}(t) = \frac{W_{crack,max}}{6.4} \quad (3.22)$$

Ο χρόνος που θα επιτευχθεί η οριακή μείωση της αντοχής είναι, όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο  $t_{lim}$ . Λύνοντας την 3.21 ως προς τη μείωση της ακτίνας προκύπτει για την οριακή μείωση:

$$\Delta \varphi_{loss,lim}(t_{lim}) = \sqrt{\frac{\Delta m_{loss,lim}(t_{lim})}{\rho_{Fe} \cdot \pi \cdot L}} \xrightarrow{m_0 = \rho V_0 = \rho_{Fe} \cdot \pi \cdot L \cdot \varphi_0^2} \Delta \varphi_{loss,lim}(t_{lim}) = \sqrt{0.26} \cdot \varphi_0 \rightarrow \Delta \varphi_{loss,lim}(t_{lim}) = 0.51\varphi_0. \quad (3.23)$$

όπου,

- $\Delta \varphi_{loss,lim}(t_{lim})$  : η οριακή μείωση της ακτίνας της ράβδου που θα συμβεί για  $T_{RL}$ ,
- $\varphi_0$  : η αρχική ακτίνα της ράβδου σε mm.

Όμως, από την εξ. 3.22 προκύπτει:

$$W_{crack,max,lim} = 6.4\Delta \varphi_{loss,lim}(t_{lim}) = 6.4 \cdot 0.51 \cdot \varphi_0 = 3.264\varphi_0, \quad (3.24)$$

Από την εξ. 3.24 υπολογίζεται το μέγιστο εύρος ρωγμής στην κατασκευή, προκειμένου (οριακά) η εφελκυστική ικανότητα της διατομής να μειωθεί κατά 26%

Για την έκφραση των παραπάνω δεδομένων ε μονάδες χρόνου, γίνεται η παρακάτω διαδικασία: Βάσει του προσεγγιστικού μοντέλου από τη γραμμική παλινδρόμηση είναι:

$$\widehat{I}_{lim} = 0.2486 + 0.5477 \cdot W_{crack,max,lim} = 1.79 \cdot \varphi_0 + 0.2486, \quad (3.25)$$

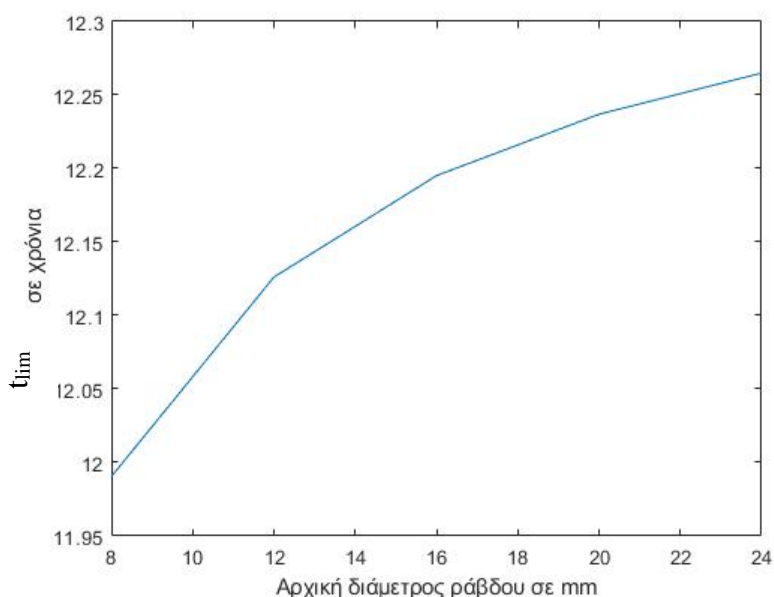
Από το μοντέλο Andrade (1998) ισχύει ότι:

$$\Delta\varphi_{loss,lim}(t_{lim}) = 0.023 \cdot I_{cor,lim} \cdot (t_{lim}), \quad (3.26)$$

και άρα:

$$(t_{lim}) = \frac{\varphi_0}{0,0112+0,0806 \cdot \varphi_0} \quad (3.27)$$

Από ό,τι φαίνεται από την εξ. 3.27, το  $t_{lim}$  εξαρτάται μόνο από την αρχική ακτίνα της ράβδου σπλισμού. Στο παρακάτω Σχήμα 3.3.3 φαίνεται η συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.



Σχήμα 3.3.3. Διάγραμμα συσχέτισης αρχικής διαμέτρου σπλισμού με το χρόνο  $t_{lim}$

Υπενθυμίζεται ότι ο χρόνος  $t_{lim}$  είναι ο χρόνος που απαιτείται από τη στιγμή του σχηματισμού της πρώτης ρωγμής μέχρι τη στιγμή που πλέον, εξαιτίας της διάβρωσης, ο σπλισμός αναλαμβάνει μειωμένο κατά 26% το φορτίο σχεδιασμού.

Επιπλέον, γίνεται η παραδοχή ότι εφόσον η κατασκευή εμφανίζει πολλές ρωγμές, σίγουρα βρίσκεται σε χρόνο  $T_2 < t < t_{lim}$ . Άρα, κατ' αναλογία, όταν μετρηθεί εύρος ρωγμής  $W_{crack} < W_{crack,max,lim}$ , από τη σχέση (3.11) λύνοντας ως προς το χρόνο προκύπτει:

$$t(W_{crack}) = \frac{\frac{W_{crack}}{6.4}}{0.023 \times (0.2486 + 0.5477 \cdot W_{crack})} = \frac{W_{crack}}{0.03659 + 0.08062 \cdot W_{crack}}, T_2 < t < t_{lim} \quad (3.28)$$

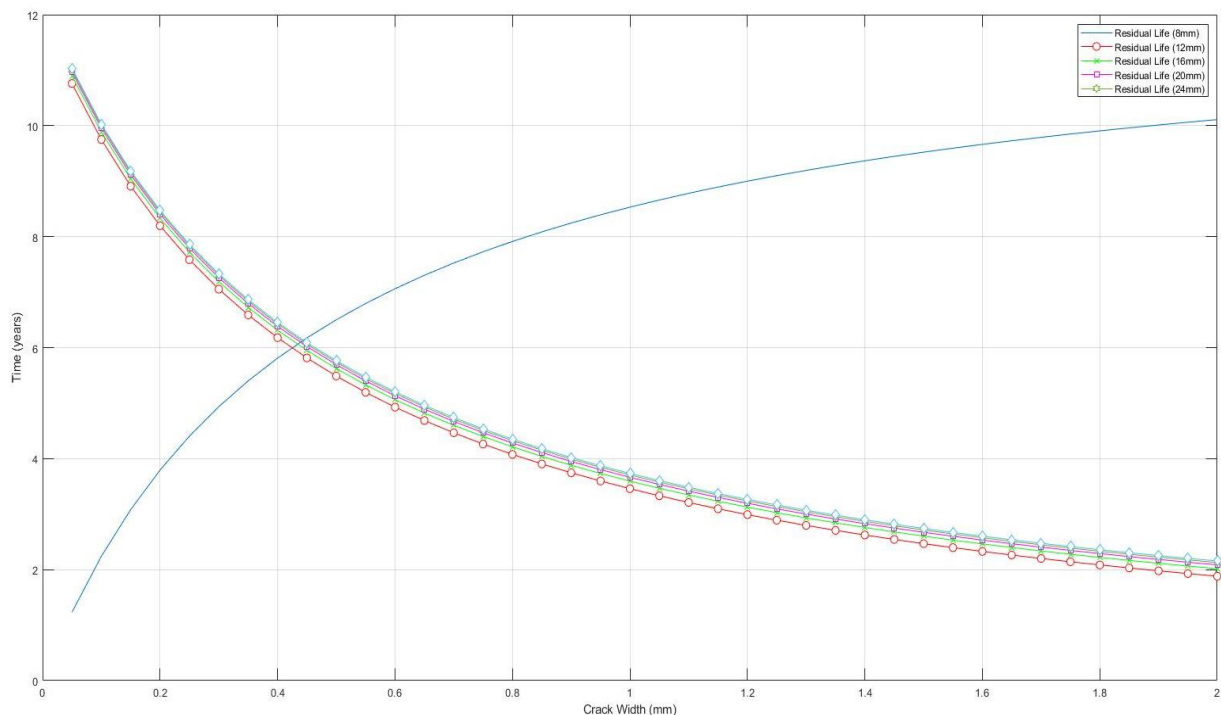
Άρα η εναπομένουσα διάρκεια ζωής της κατασκευής για δεδομένη ρωγμή  $W_{crack}$  και με την υπόθεση ότι έχει ξεπεραστεί ο χρόνος σταθερού ρυθμού διάβρωσης, δηλαδή έχουν ήδη εμφανιστεί πολλές ρωγμές, ισούται με:

$$Residual\ Life = t_{lim} - t(W_{crack}) = \frac{\varphi_0}{0,0112 + 0,0806 \cdot \varphi_0} - \frac{W_{crack}}{0.03659 + 0.08062 \cdot W_{crack}}, \quad (3.29)$$

με  $T_2 < t(W_{crack}) < t_{lim}$ .

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.3.4, φαίνεται η συσχέτιση του εύρους ρωγμής με το χρόνο  $t$  (μπλε καμπύλη), ενώ ταυτόχρονα φαίνεται και η εναπομένουσα διάρκεια ζωής για διάφορες τιμές της αρχικής διαμέτρου του οπλισμού (από 8mm έως 24mm).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία αυτή αφορά σε λωρίδα πλάκας ή δοκού με πλάτος 1 μέτρο, που θεωρείται ότι έχει μόνο μία ράβδο οπλισμού και η συνεισφορά των γύρω οπλισμών δεν λαμβάνεται υπόψη.



**Σχήμα 3.3.4.** Διάγραμμα συσχέτισης εναπομένουσας διάρκειας ζωής με διάμετρο ράβδου οπλισμού και Εύρος ρωγμής

## **4 Μέθοδοι αποτίμησης κατάστασης υφιστάμενης κατασκευής**

### **4.1 Διαθέσιμες μέθοδοι αποτίμησης κατάστασης υφιστάμενης κατασκευής**

Όσο η χρήση του οπλισμένου σκυροδέματος για την κατασκευή υποδομών και μικρότερης κλίμακας δομών έχει καθιερωθεί σε ένα μεγάλο ποσοστό των σύγχρονων δομημάτων, έχει αποδειχθεί αναγκαία η αναζήτηση νέων ή και η διεύρυνση των υπάρχοντων μέσων αποτίμησης της φέρουσας ικανότητας που διαθέτουν οι κατασκευές. Πιο συγκεκριμένα, η αξιολόγηση των φθορών των δομικών στοιχείων τους αλλά και η διατήρησή τους εντός του νομικού πλαισίου που αναφέρεται στην εκάστοτε χρήση είναι ζητήματα που αφορούν όλες τις κατασκευές. Γι' αυτό, έπειτα από πολύπλευρες έρευνες, έχουν επικρατήσει δύο κατηγορίες στρατηγικών αποτίμησης της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής (Ματίκας & Αγγελής, 2015)(McCann & Forde, 2001):

A. Οι Επεμβατικές Μέθοδοι

B. Οι Μη-καταστροφικές Μέθοδοι (non-destructive testing (NDT) methods)

#### **4.1.1 Επεμβατικές Μέθοδοι Αποτίμησης (Destructive Testing Methods)**

Οι επεμβατικές μέθοδοι αποτίμησης της φέρουσας ικανότητας μίας υφιστάμενης κατασκευής (ή αλλιώς ημι-καταστροφικοί έλεγχοι) αποτελούν τον πιο αξιόπιστο τρόπο εκτίμησης της κατάστασης της κατασκευής. Όμως, παρά τα υψηλά ποσοστά ακρίβειας όσον αφορά τις τιμές των αντοχών που προκύπτουν, περιορίζονται σε εφαρμογή μόνο στο στοιχείο που έχει αποσπαστεί μόνιμα από την κατασκευή το οποίο και υποβάλλεται σε εργαστηριακές δοκιμές. Αυτό σημαίνει ότι από την κατασκευή αποσπώνται μόνιμα δείγματα από τις διατομές που κρίνονται κρίσιμες, τα οποία μετά την υποβολή τους σε διάφορα εργαστηριακά τεστ, δεν δύνανται να επιστρέψουν στην αρχική τους θέση. Ως αποτέλεσμα, η αποκατάσταση των μερών που αποκόπηκαν για έλεγχο μπορεί να είναι είτε πολύ ακριβή είτε ανέφικτη. Ταυτόχρονα, η διαδικασία απόκτησης του δείγματος συνήθως απαιτεί τη διακοπή λειτουργίας της κατασκευής και σε περίπτωση ειδικών κατασκευών όπως γέφυρες με μεγάλα ανοίγματα, είναι αρκετά επικίνδυνη και αντιοικονομική αφού απαιτείται ειδικευμένο συνεργείο με τον κατάλληλο εξοπλισμό. Για τους παραπάνω λόγους έχει προκύψει η ανάγκη για εύρεση μεθόδων μη-επεμβατικών με σκοπό την εξαγωγή αποτελεσμάτων αποτίμησης χωρίς τη μερική καταστροφή μερών των υπό έλεγχο στοιχείων. Στον παρακάτω Πίνακα 4.1.1 παρατίθενται οι πιο κοινές ημικαταστροφικές μέθοδοι. (Ματίκας & Αγγελής, 2015)

**Πίνακας 4.1.1. Επεμβατικές Μέθοδοι Αποτίμησης**

<b>Μέθοδος</b>	<b>Εφαρμογή</b>
Λήψη Πυρήνων (Καρότα)	Εκτίμηση θλιπτικής αντοχής, Είδος αδρανών, Υπαρξη χλωριόντων ή ενανθράκωσης, Πληροφορίες για τον σπλισμό, Ρωγμές, Επικάλυψη κ.α.
Χρήση Εξολκεία	Επιτόπου Μέτρηση Θλιπτικής Αντοχής, Μέτρηση αντοχής συγκόλλησης επικαλύψεων,
Έλεγχος ράβδων σπλισμού σε εφελκυσμό	Υπολογισμός Ορίου Διαρροής και εφελκυστικής αντοχής των χαλύβδινων ράβδων
Μέθοδος Πετρογραφικής Ανάλυσης	Εντοπισμός Χημικά ενεργών αδρανών και βλαβερών προσμίξεων, Βάθος ενανθράκωσης, Εύρος ρωγμών

#### **4.1.2 Μη-Καταστροφικές Μέθοδοι (Non-destructive Testing Methods)**

Οι μη-επεμβατικές ή αλλιώς μη-καταστροφικές μέθοδοι, όπως ήδη αναφέρθηκε, αποτελούν τη λύση στο πρόβλημα των επεμβατικών μεθόδων. Πέρα από το ότι δεν απαιτούν τη διακοπή της χρήσης της κατασκευής, ούτε εξειδικευμένο προσωπικό και εξοπλισμό, και ούτε επίσης την αποκοπή δείγματος από το κρίσιμο στοιχείο, παρέχουν στοιχεία σχετικά με τις ιδιότητες του υλικού όσον αφορά τη μικροδομή και τη μακροδομή του, χωρίς την ανάγκη τεμαχισμού. Πλέον οι μη-καταστροφικοί έλεγχοι, λόγω της δυνατότητας προσδιορισμού των παραμέτρων του υλικού σε κάθε σημείο αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της σύγχρονης μηχανικής.

Γενικά, για την εφαρμογή τέτοιων ελέγχων, απαιτείται η επιλογή της κατάλληλης μεθόδου και κατά συνέπεια η εφαρμογή του αντίστοιχου οργάνου που θα επιτύχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και αξιοπιστία. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα όργανα επιπλέον χαρακτηρίζονται από το χαμηλό κόστος και την απλότητα εφαρμογής.

Σκοπό τους αποτελεί αφενός η αποτροπή της αστοχίας της κατασκευής και αφετέρου η ασφαλής και οικονομική διαχείρισή της. Σύμφωνα με την επιτροπή για τη μη-καταστροφική αξιολόγηση του National Materials Advisory Board (NMAB)(Wenk, S. A., R. C. McMaster, n.d.), οι μη-καταστροφικοί έλεγχοι κατηγοριοποιούνται σε έξι κατηγορίες ως φαίνεται στον Πίνακα 4.1.2. Επιπλέον, στον Πίνακα 4.1.3 φαίνονται οι υπάρχουσες μη-καταστροφικές μέθοδοι που εφαρμόζονται στην επιθεώρηση γεφυρών, σύμφωνα με τους D.M. McCann et al. (2001).(McCann & Forde, 2001).

**Πίνακας 4.1.2. Κατηγοριοποίηση ΜΚΕ σύμφωνα με NMAB**

Αρχή της μεθόδου	Ιδιότητα-χαρακτηριστικό	Εφαρμογές
Μηχανικές και Οπτικές	Χρώμα Ρωγμές Διαστάσεις Πάχος	Επιφανειακή τραχύτητα, Συντελεστής ανάκλασης κ.α.
Διεσδύουσες Ακτινοβολίες	Ρωγμές Διαφοροποίηση στην πυκνότητα Εγκλείσματα Πάχος	Μικροπορώδες Διαχωρισμός κ.α.
Ηλεκτρομαγνητισμός	Ανισοτροπία Κοιλότητες Τοπικές παραμορφώσεις Σκληρότητα	Θερμική επεξεργασία Κρυσταλλική δομή Συγκέντρωση ιόντων κ.α.
Υπέρηχοι	Έναρξη και διάδοση ρωγμής Αποκολλήσεις Πυκνότητα Μέτρο ελαστικότητας	Μηχανική υποβάθμιση Επιφανειακές τάσεις κ.α.
Υπέρυθρη Ακτινοβολία	Έναρξη και διάδοση ρωγμής Θερμική αγωγιμότητα Πάχος Ρωγμές Υγρασία	Διάβρωση Αποκολλήσεις Εγκλείσματα Πορώδες κ.α.
Χημική Ανάλυση	Σύσταση Στοιχειακή Ανάλυση Μέγεθος Κόκκου Εγκλείσματα	Επιφανειακές ατέλειες Πορώδες Αναγνώριση κραμάτων κ.α.

**Πίνακας 4.1.3. NDT μέθοδοι. D.M. McCann, M.C. Forde (McCann & Forde, 2001)**

NDT tests for bridges

Inspection method	Parameter measured	Advantage	Disadvantage	Cost
Visual	Surface condition	Quick; modest skills required	Superficial	Low
Proof load test	Load carrying capacity	Definitive	Very slow and possibly dangerous	Very high
Coring	Specific internal dimensions	Definitive dimensions	Measurement only at test point; scars the bridge	Moderately high
Vibration testing	Mode shapes and/or signature	Gives some indirect measure of current condition	Difficult to quantify data; heavily damped masonry bridges give yield little response	High
Impact testing	Mode shapes and/or signature	Gives some indirect measure of current condition	Difficult to quantify data; heavily damped masonry bridges give yield little response	Moderate
Ultrasonic NDT	Wave velocities through structure	Relatively quick	Only works on individual masonry blocks due to signal attenuation; no information on major elements	Moderate
Sonics	Wave velocity; tomographic cross-sections	Moderately slow; gives useful information on major elements	Requires skill to interpret data	Moderately high
Conductivity	Relative conductivity	Quick; gives relative conductivities over a large area to a maximum depth of 1.5 m	Limited depth penetration of 1.5 m; complements radar	Low
Radar	Electromagnetic wave velocity	Quick; can give good penetration; can give good image of internal structure	Poor penetration through clay infill and salt contaminated fill; requires skill to understand data	Moderately high

### 4.1.3 Η οπτική μέθοδος επιθεώρησης (Visual Inspection Method)

Μία από τις κλασικές μεθόδους επιθεώρησης με πολλές εφαρμογές και ιδανική και για υποδομές (π.χ. γέφυρες) που ανήκει στις μη επεμβατικές και συγκεκριμένα στις μηχανικές–οπτικές σύμφωνα με την παραπάνω κατηγοριοποίηση είναι η οπτική μέθοδος επιθεώρησης (Visual Inspection Method) η οποία επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της κατάστασης της επιφάνειας των στοιχείων (parameter measured: surface condition). Εντοπίζει κυρίως φθορές που έχει υποστεί η επιφάνεια ενός φέροντος στοιχείου (όπως ρωγμές) σε θέσεις όπου αναμένεται να εμφανιστούν. Έχει πολύ χαμηλό κόστος το οποίο όμως συναρτάται σημαντικά από την ευκολία εφαρμογής. Αποτελεί τη βασική μέθοδο αποτίμησης η οποία οδηγεί στην απόφαση για ανάγκη ή όχι περαιτέρω επιθεώρησης με μηχανικό εξοπλισμό για την αξιολόγηση της φθοράς (Duque, 2017).

Λεπτομερέστερα, ο οπτικός έλεγχος (ΟΕ) ορίζεται ως η εξέταση ενός υλικού, αντικειμένου ή προϊόντος για εύρεση δομικών ή άλλων σφαλμάτων χρησιμοποιώντας τα μάτια αποκλειστικά ή σε συνδυασμό με βοηθήματα. Πολλές φορές, ο ΟΕ περιλαμβάνει τη δόνηση, την ακοή και την αφή ή ακόμα και την όσφρηση του τεμαχίου που ελέγχεται. Ο ΟΕ αποτελείται από δύο βασικές διαδικασίες. Η πρώτη είναι η έρευνα (κυρίως έλεγχος) και η δεύτερη είναι ο συνδυασμός γνώσεων και εμπειρίας του ελεγκτή ως προς τις κατεργασίες και γενικές συνθήκες του υλικού ώστε να αναγνωριστούν οι πραγματικές ασυνέχειες που αποτελούν κίνδυνο για τη δομική ακεραιότητα από τις μη σχετικές ενδείξεις. Ο ΟΕ υποστηρίζει όλες τις άλλες μεθόδους ΜΚΕ και είναι ο πιο βασικός με την έννοια ότι προηγείται οποιουδήποτε άλλου ελέγχου. Ψηφιακοί ανιχνευτές και ηλεκτρονική τεχνολογία καθιστούν δυνατή και την αυτοματοποίηση του ελέγχου (μηχανική όραση). Τα χαρακτηριστικά που προσδιορίζονται είναι διάφορα. Αυτά περιλαμβάνουν την παρουσία ασυνεχιών (π.χ. φθοράς, ρωγμών), την καταλληλότητα διαστάσεων, συναρμολόγησης ή απλά συμμόρφωση με άλλους κανόνες (π.χ. χρώμα, ύπαρξη ετικέτας προϊόντος κλπ.)

Το βασικότερο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου, εάν γίνει σωστά, είναι η απόκτηση της πληροφορίας σχετικά με την κατάσταση της κατασκευής μόνο απλά αναλύοντας τα εξωτερικά χαρακτηριστικά της. Ωστόσο, συνήθως απαιτούνται μηχανικοί με μεγάλη εμπειρία καθώς καλούνται να κρίνουν την αντοχή μιας κατασκευής εκ πρώτης όψεως. Επιπλέον, όταν πρόκειται για μεγάλες κατασκευές/υποδομές, όπως οι γέφυρες, συχνά είναι πολύ δύσκολη και επικίνδυνη η άμεση ανθρώπινη επαφή με το σκελετό τους ώστε να προκύψουν αρκετά αξιόπιστα συμπεράσματα με την οπτική επιθεώρηση.



## 5 Θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη υπολογιστικής εφαρμογής

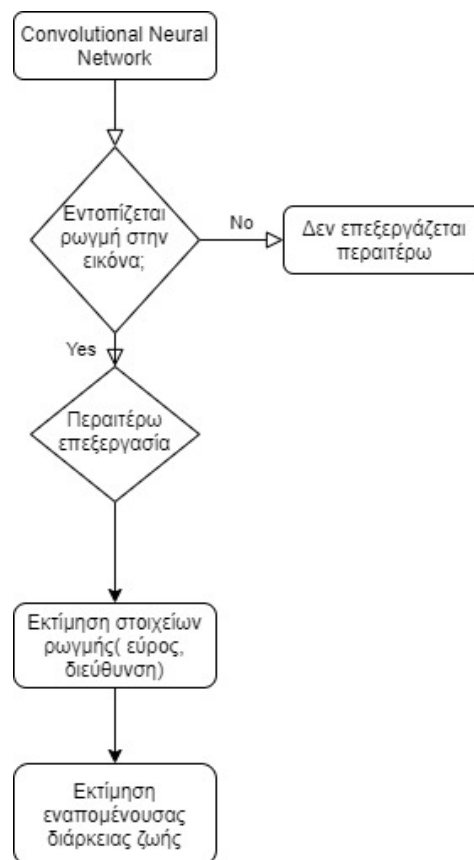
Με στόχο, τη διευκόλυνση της εφαρμογής της οπτικής επιθεώρησης, όπως αναφέρθηκε έχει αναπτυχθεί η λεγόμενη μηχανική όραση, δηλαδή η αξιοποίηση ηλεκτρονικών μέσων με σκοπό τον προσδιορισμό ρωγμών και φθορών της επιφάνειας που υποδεικνύουν την ύπαρξη διάβρωσης ή άλλων προβλημάτων που υπονομεύουν τη σωστή λειτουργία της κατασκευής.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας, είναι προφανές ότι έχει διευρύνει και το φάσμα των εφαρμογών της. Συγκεκριμένα η αξιοποίηση της τεχνητής νοημοσύνης φαίνεται να είναι πολύ προσοδοφόρα ως προς την εφαρμογή της στο συγκεκριμένο πεδίο. Ειδικότερα, η αντικατάσταση του ανθρώπινου ματιού με τη «μηχανική όραση», δηλαδή με τεχνητά μέσα, όπως για παράδειγμα τα ΣμηΕΑ (Drone)(Chan et al., 2015), μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη ενός αυτοματοποιημένου προγράμματος εντοπισμού των επιφανειακών αλλοιώσεων των κατασκευών του σκυροδέματος σε μία κατασκευή. Έτσι διευκολύνεται ακόμα περισσότερο η διαδικασία του οπτικού ελέγχου, αφού πλέον το «έμπειρο μάτι» του μηχανικού σε πολύ μεγάλο μέρος αντικαθίσταται με το αυτόματο πρόγραμμα.

Μία τέτοια προσέγγιση έχει γίνει στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ειδικότερα, έχει αναπτυχθεί ένα αυτοματοποιημένο πρόγραμμα σε περιβάλλον Matlab το οποίο δέχεται εικόνες που έχουν ληφθεί από το πεδίο μίας κατασκευής προς επιθεώρηση. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα, χρησιμοποιώντας νευρωνικά δίκτυα και βαθιά μάθηση (Convolutional Neural Networks and Deep Learning), εντοπίζει τις φωτογραφίες στις οποίες υπάρχουν επιφανειακές φθορές (ρωγμές ή spalling) και στη συνέχεια με χρήση Computer Vision, εντοπίζει την ακριβή θέση της φθοράς, υπολογίζει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της (για ρωγμές: εύρος, μήκος, διεύθυνση) και εξάγονται συμπεράσματα για την εναπομένουσα διάρκεια ζωής χρησιμοποιώντας το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3.3.1 (Mukherjee et al., 2015).

Το διάγραμμα ροής του προγράμματος φαίνεται στο σχήμα 4.1.1.

Σχήμα 4.1.1. Διάγραμμα Ροής Προγράμματος



## 5.1 Ανάλυση της προγραμματιστικής εφαρμογής

### 5.1.1 Το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (Artificial Neural Network)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι ένα χρήσιμο υπολογιστικό εργαλείο με πολλαπλές εφαρμογές. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (artificial neural networks) αρχικά προτάθηκαν ως ένα μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης της πολύπλοκης λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου. Η δομή του εγκεφάλου είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει την παράλληλη επεξεργασία δεδομένων και τη δυνατότητα συνεχούς μάθησης μέσω της αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον. Τα δύο αυτά βασικά χαρακτηριστικά συμβάλλουν στην ικανότητά του, αφενός να εκτελεί δύσκολα καθήκοντα, όπως ταχύτατη αναγνώριση μορφών, ταξινόμηση κ.ά., κι αφετέρου, να εξελίσσεται συνεχώς, μαθαίνοντας από το περιβάλλον του κατά την αλληλεπίδρασή του με αυτό.

Η δομή του τεχνητού νευρωνικού δικτύου μιμείται κατά το δυνατό εκείνη του βιολογικού νευρωνικού δικτύου, ώστε να εμφανίζει παρόμοιες ιδιότητες. Κατ' αναλογία επομένως με ένα δίκτυο νευρώνων εγκεφάλου, ένα τεχνητό δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο τεχνητών νευρώνων που αλληλοεπιδρούν, συνδεδεμένοι μεταξύ τους με τις λεγόμενες συνάψεις (synapses). Ο βαθμός αλληλεπίδρασης είναι διαφορετικός για κάθε ζεύγος νευρώνων και καθορίζεται από τα λεγόμενα συναπτικά βάρη (synaptic weights). Συγκεκριμένα, καθώς το νευρωνικό δίκτυο αλληλοεπιδρά με το περιβάλλον και μαθαίνει από αυτό, τα συναπτικά βάρη μεταβάλλονται συνεχώς, ενδυναμώνοντας ή αποδυναμώνοντας την ισχύ του κάθε δεσμού. Όλη η εμπειρική γνώση που αποκτά επομένως το νευρωνικό δίκτυο από το περιβάλλον κωδικοποιείται στα συναπτικά βάρη. Αυτά αποτελούν το χαρακτηριστικό εκείνο που δίνει στο δίκτυο την ικανότητα για εξέλιξη και προσαρμογή στο περιβάλλον.

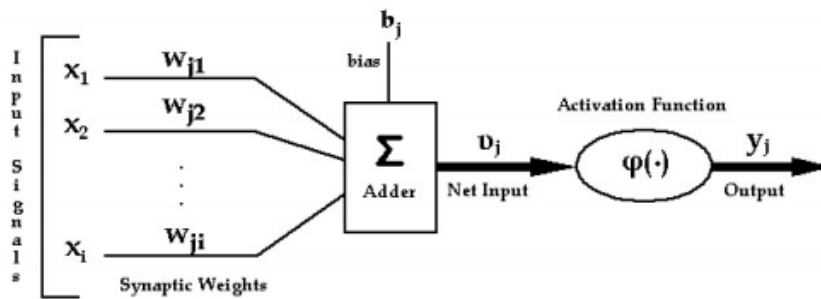
Υπάρχουν δύο τρόποι να εκπαιδύσουμε ένα δίκτυο. Κατά τον πρώτο τρόπο, η εκπαίδευση γίνεται με εποπτεία. Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο τροφοδοτείται με ένα σύνολο γνωστών παραδειγμάτων, δηλαδή ένα σύνολο καταστάσεων στις οποίες μπορεί να περιέλθει το δίκτυο, μαζί με τα αποτελέσματα που θέλουμε να δίνει το δίκτυο για τις καταστάσεις αυτές. Για να μάθει το δίκτυο τα παραδείγματα αυτά, χρησιμοποιούμε έναν αλγόριθμο εκπαίδευσης. Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και από τη δομή του δικτύου που επιλέγουμε για να το αντιμετωπίσουμε. Κατά το δεύτερο τρόπο, η εκπαίδευση γίνεται χωρίς εποπτεία. Στην περίπτωση αυτή το δίκτυο καλείται να αναγνωρίσει ομοιότητες και μοτίβα σε δεδομένα που του έχουμε τροφοδοτήσει. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στο δίκτυο και αυτό οφείλει να προσαρμοστεί έτσι ώστε να τα χωρίσει σε ομάδες. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται, ώσπου δεν παρατηρείται μεταβολή στην ταξινόμηση των δεδομένων.

Το βασικό πλεονέκτημα των νευρωνικών δικτύων είναι ότι μπορούν να αποθηκεύσουν γνώση και εμπειρία από το περιβάλλον, την οποία μπορούν στη συνέχεια να ανακαλέσουν. Επιπλέον, έχουν τη δυνατότητα να γενικεύουν, δηλαδή να εξάγουν τα βασικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος, ακόμα και όταν αυτά είναι κρυμμένα σε θορυβώδη δεδομένα.

Σε αναλογία με το βιολογικό νευρώνα του εγκεφάλου, ο τεχνητός νευρώνας (artificial neuron) είναι η δομική μονάδα του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Σε αυτόν συντελείται όλη η επεξεργασία της πληροφορίας. Κάθε νευρώνας δέχεται πληροφορία, την επεξεργάζεται και δίνει μία τιμή εξόδου. Οι εισοδοί του είναι είτε οι έξοδοι άλλων νευρώνων, είτε το πρωταρχικό σήμα εισόδου του δικτύου.

Ένα τυπικό παράδειγμα νευρώνα φαίνεται στο σχήμα 5.1.1. Βάσει αυτού, μπορούμε να διακρίνουμε τρεις βασικές φάσεις της λειτουργίας του: Κατά την *πρώτη φάση*, κάθε είσοδος πολλαπλασιάζεται με το συναπτικό βάρος που της αντιστοιχεί. Στη *δεύτερη φάση* οι σταθμισμένες πλέον εισοδοί και ένας εξωτερικά εφαρμοζόμενος παράγοντας, η μεροληψία ή πόλωση ή κατώφλι

(bias, threshold), αθροίζονται και δίνουν το τοπικό πεδίο (net input, induced local field, activation potential)



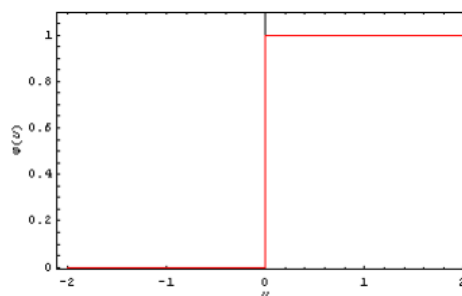
Σχήμα 5.1.1. Η δομική Μονάδα του Νευρωνικού Δικτύου: Ο νευρώνας

Ως εδώ, ο νευρώνας δεν κάνει τίποτα άλλο από το να δίνει ένα γραμμικό συνδυασμό των εισόδων, με συντελεστές τα προσαρμοζόμενα συναπτικά βάρη. Αν η λειτουργία του λοιπόν σταματούσε εδώ, τότε θα είχαμε ένα γραμμικό νευρώνα, που θα έδινε ένα γραμμικό προσαρμοζόμενο φίλτρο (linear adaptive filter). Όμως, η λειτουργία του συνεχίζει στην *τρίτη φάση* όπου εφαρμόζεται η συνάρτηση ενεργοποίησης ή συνάρτηση μεταφοράς (activation function ή squashing function) στο τοπικό πεδίο και το αποτέλεσμα δίνει την έξοδο του νευρώνα.

Στα πρώτα μοντέλα νευρώνα, η συνάρτηση ενεργοποίησης ήταν μία βηματική συνάρτηση (step function) (5.1) και συχνά αναφέρονται ως μοντέλα McCulloch-Pitts.

$$f(u) = \begin{cases} 0, & u \leq \theta \\ 1, & u > \theta \end{cases} \quad (5.1)$$

Μία τέτοια συνάρτηση φαίνεται παρακάτω στο Σχήμα 5.1.2. Αν το ενδιάμεσο αποτέλεσμα ήταν μικρότερο μιας τιμής κατωφλίου (threshold), η έξοδος του νευρώνα ήταν ίση προς 0 (αδρανής νευρώνας), αλλιώς ήταν ίση προς 1 (ενεργοποιημένος νευρώνας).



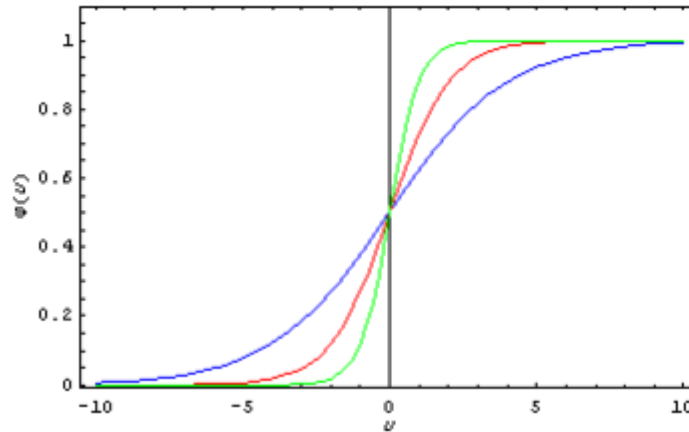
Σχήμα 5.1.2. Βηματική Συνάρτηση για τιμή threshold = 0

Αργότερα, η εξέλιξη στο θεωρητικό υπόβαθρο των τεχνητών νευρωνικών δικτύων φανέρωσε ότι η παράγωγος της συνάρτησης ενεργοποίησης μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για το νευρωνικό δίκτυο και να χρησιμοποιηθεί στην εκπαίδευσή του, γεγονός που υποδεικνύει ότι είναι προτιμότερο να χρησιμοποιηθεί μία παραγωγίσιμη συνάρτηση και όχι η βηματική συνάρτηση, που είναι προφανώς μη παραγωγίσιμη. Σήμερα, στα περισσότερα μοντέλα η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι μία σιγμοειδής συνάρτηση. Αυτή είναι γενικά μία πραγματική, συνεχής και φραγμένη συνάρτηση, της οποίας η παράγωγος είναι θετική. Το πεδίο ορισμού της μπορεί θεωρητικά να είναι όλο το σύνολο των πραγματικών αριθμών, αλλά στην πράξη μπορεί να περιοριστεί, θέτοντας όρια στις τιμές των συναπτικών βαρών. Το σύνολο τιμών είναι συνήθως το διάστημα  $[0,1]$  ή  $[-1,1]$ . Ένα

από τα πιο γνωστά παραδείγματα σιγμοειδούς συνάρτησης που χρησιμοποιείται ως συνάρτηση ενεργοποίησης είναι η λογιστική συνάρτηση (logistic function), που δίνεται από τον τύπο (5.2) :

$$f(u) = \frac{1}{1+e^{-au}}, \quad (5.2)$$

Το  $a$  αποτελεί την παράμετρο κλίσης. Μεταβάλλοντας την παράμετρο κλίσης, παίρνουμε συναρτήσεις με διαφορετικές κλίσεις. Όσο το  $a$  τείνει στο άπειρο, η λογιστική συνάρτηση τείνει προς τη βηματική συνάρτηση. Στο Σχήμα 5.1.3 φαίνεται η λογιστική συνάρτηση για διάφορες κλίσεις.



Σχήμα 5.1.3. Η λογιστική Συνάρτηση για διάφορες τιμές του  $a$  (κλίσεις)

Με την εισαγωγή της συνάρτησης ενεργοποίησης, ο νευρώνας γίνεται μη γραμμικός. Αντίστοιχα, ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που αποτελείται από τέτοιους νευρώνες θα είναι μη γραμμικό. Αυτή η εγγενής μη γραμμικότητα των νευρωνικών δικτύων είναι ένα πλεονέκτημα έναντι άλλων γνωστών μεθόδων αντιμετώπισης πολλών προβλημάτων. Για παράδειγμα, όταν σε ένα πρόβλημα πρόβλεψης το σύστημα που μελετάμε είναι μη γραμμικό και ιδιαίτερα όταν παρουσιάζει χασοτική συμπεριφορά, τα γνωστά γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης αδυνατούν να δώσουν σωστά αποτελέσματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα μη γραμμικά τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι προτιμότερα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η λειτουργία του νευρώνα περιγράφεται από τις σχέσεις (5.3)-(5.5):

$$u_j = \sum_{i=1}^m w_{ji} x_i, \quad (5.3)$$

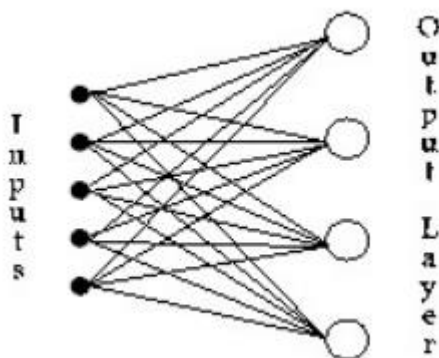
$$y_j = \varphi(u_j), \quad (5.4)$$

$$v_j = u_j + b_j, \quad (5.5)$$

όπου,

- $m$  : ο αριθμός των εισόδων που δέχεται ο νευρώνας
- $x_i$  : η  $i$ -οστή είσοδος του νευρώνα
- $w_{ji}$  : το βάρος της σύναψης που συνδέει το νευρώνα  $j$  με την είσοδο  $i$ ,
- $u_j$  : το σταθμισμένο άθροισμα των εισόδων
- $b_j$  : η μεροληψία του νευρώνα (bias)
- $v_j$  : το τοπικό πεδίο
- $y_j$  : η τελική έξοδος

Η πιο απλή μορφή νευρωνικού δικτύου είναι αυτή του απλού αισθητήρα (perceptron) τον οποίο εισηγήθηκε ο Rosenblatt το 1958 και φαίνεται στο σχήμα 5.1.4. Είναι ένα δίκτυο με δύο επίπεδα (layers). Το πρώτο αποτελείται από τις εισόδους και άρα δεν γίνεται κάποια επεξεργασία των δεδομένων σε αυτό. Το δεύτερο αποτελείται από νευρώνες τύπου McCulloch-Pitts και είναι το επίπεδο εξόδου.

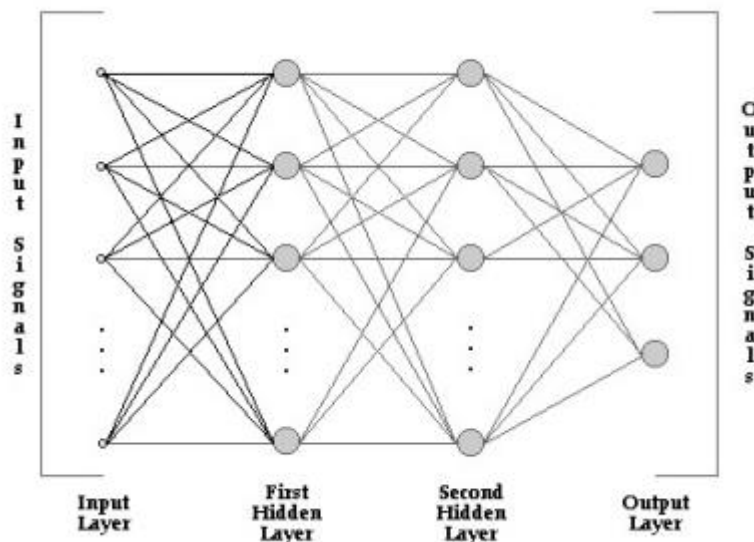


Σχήμα 5.1.4. Παράδειγμα αισθητήρα με 6 εισόδους και 4 νευρώνες εξόδου

Η τροποποίηση του μοντέλου του απλού αισθητήρα κρίθηκε απαραίτητη για την αντιμετώπιση μη γραμμικά διαχωρίσιμων προβλημάτων προσθέτοντας επίπεδα μεταξύ των επιπέδων εισόδου και εξόδου. Το τροποποιημένο αυτό μοντέλο του απλού αισθητήρα ονομάζεται πολυεπίπεδος αισθητήρας (multilayer perceptron ή multilayer feedforward networks) και απεικονίζεται στο σχήμα 5.1.5. Σε ένα τέτοιο νευρωνικό δίκτυο, μεταξύ των επιπέδων εισόδου και εξόδου, μεσολαβούν και ένα ή περισσότερα επίπεδα ακόμα, τα λεγόμενα κρυφά επίπεδα (hidden layers).

Η ροή της πληροφορίας σε ένα τέτοιο δίκτυο γίνεται πάντα από τα αριστερά προς τα δεξιά, δεν υπάρχει κανένας βρόχος ανάδρασης. Θεωρούμε επίσης, ότι οι νευρώνες σε κάθε επίπεδο αλληλοεπιδρούν μόνο με εκείνους τους νευρώνες που ανήκουν στα άμεσα γειτονικά τους επίπεδα. Δηλαδή το πρώτο κρυφό επίπεδο δέχεται τις τιμές του επιπέδου εισόδου, τα αποτελέσματα του πρώτου κρυφού επιπέδου περνάνε στο δεύτερο κρυφό, του οποίου τα αποτελέσματα στη συνέχεια περνάνε στο επίπεδο εξόδου. Ένα δίκτυο πολυεπίπεδου αισθητήρα στο οποίο υπάρχουν όλες οι επιτρεπτές συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων, ονομάζεται πλήρως συνδεδεμένο (fully connected), αλλιώς ονομάζεται μερικά συνδεδεμένο (partially connected). Ένας απλός αισθητήρας δεν μπορεί

να δώσει σωστά αποτελέσματα σε μη γραμμικά διαχωρίσιμα προβλήματα, καθώς δεν μπορεί να χωρίσει το επίπεδο σε περισσότερες από δύο περιοχές. Αν λοιπόν, μπορούσαμε με κάποιο τρόπο να συνδυάσουμε τα αποτελέσματα δύο διαφορετικών αισθητήρων, τότε θα ήταν δυνατό να χωρίσουμε το επίπεδο σε περισσότερες περιοχές και να είχαμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.



Σχήμα 5.1.5. Πολυεπίπεδος αισθητήρας με δύο κρυφά επίπεδα

### 5.1.2 Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου

Η εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων γίνεται είτε με εποπτεία είτε χωρίς. Ωστόσο, λόγω του είδους του προβλήματος που κλήθηκε να επιλυθεί στην παρούσα εργασία, η μόνη επιλογή είναι η εκπαίδευση με εποπτεία. Αυτό σημαίνει ότι το δίκτυο εκπαιδεύεται, δεχόμενο μεγάλο όγκο δεδομένων καθώς και των αντίστοιχων αποτελεσμάτων που είναι επιθυμητό να εξάγει. Το σύνολο των δεδομένων για εκπαίδευση καλείται dataset και συνήθως προτείνεται το 70 % να προοριστεί για εκπαίδευση ενώ το υπόλοιπο 30% για επικύρωση. Μετά την εκπαίδευση, το δίκτυο αναμένεται να λειτουργεί σε τυχαία δεδομένα που δεν έχει «ξαναδεί» εξάγοντας έγκυρα αποτελέσματα. Από αυτά, προκύπτει ότι όσο πιο πολλά δεδομένα δέχεται το δίκτυο κατά την εκπαίδευση, τόσο πιο καλά θα μάθει να επεξεργάζεται άγνωστα δεδομένα μετέπειτα.

Συγκεκριμένα, για το νευρωνικό δίκτυο εικόνων (convolutional neural network), τα δεδομένα εισόδου είναι εικόνες που έχουν χαρακτηριστεί με ετικέτες. Οι τέσσερις ετικέτες-κατηγορίες που εφαρμόστηκαν είναι: 1) ρωγμές, 2) spalling, 3) μη-κατάλληλη επιφάνεια, 4) καθαρό. Ο αριθμός του dataset για εκπαίδευση ήταν πολύ μικρός (400 εικόνες) γι' αυτό με την εκπαίδευση του ίδιου νευρωνικού σε μεγαλύτερο όγκο δεδομένων αναμένονται μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελέσματα.

### 5.1.3 Μεταφορά Μάθησης (Transfer Learning)

Η μεταφορά μάθησης είναι μία μέθοδος η οποία χρησιμοποιεί τη γνώση από προηγούμενα σχετικά tasks για τη διευκόλυνση της επίδοσης σε νέο task. Όπως αναφέρθηκε, η εκμάθηση ενός καινούργιου μοντέλου για κάθε διαφορετικό πρόβλημα απαιτεί πληθώρα δεδομένων με ετικέτες.

Για να επιτύχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, τα μοντέλα αυτά τυπικά χρειάζεται να εκπαιδευτούν σε εκατομμύρια δεδομένα, με ειδικές ετικέτες για κάθε υποπρόβλημα. Ωστόσο, σε πολλές πρακτικές εφαρμογές υπάρχει μικρή διαθεσιμότητα δεδομένων με ετικέτες. Σε αυτές τις περιπτώσεις η μεταφορά μάθησης προσφέρει εναλλακτική λύση, αξιοποιώντας τη γνώση που έχει αποκτήσει ένα μοντέλο επιλύοντας ένα πρόβλημα, για να αντιμετωπίσει ένα διαφορετικό, αλλά *παρεμφερές*, πρόβλημα.

Η μεταφορά μάθησης έχει επιφέρει σημαντική πρόοδο στη βαθιά μάθηση (deep learning), καθώς επιτρέπει την εκπαίδευση δικτύων σε συνθήκες όπου είναι διαθέσιμα περιορισμένα δεδομένα στο σύνολο εκπαίδευσης. Η μεταφορά μάθησης συνήθως οδηγεί σε γρηγορότερη σύγκλιση και υψηλότερη απόδοση από αυτήν που θα είχε το μοντέλο, αν είχε εκπαιδευτεί μόνο σε ένα μικρό σύνολο δεδομένων. Επιπλέον, βελτιώνει τη δυνατότητα γενίκευσης, καθώς προ-εκπαιδευμένα μοντέλα έχουν ηθελημένα εκπαιδευτεί σε προβλήματα που επιβάλλουν στο μοντέλο να εξάγει γενικά χαρακτηριστικά, τα οποία είναι χρήσιμα σε συναφή περιεχόμενα. Επομένως, όταν το μοντέλο μεταφέρεται σε ένα νέο πρόβλημα, είναι λιγότερο πιθανό το πρόβλημα του “overfitting” στο νέο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης.

Η μεταφορά μάθησης αντιμετωπίζει την ανάγκη για εκτενείς υπολογιστικούς πόρους και χρονοβόρα εκπαίδευση του μοντέλου. Μια σχετική κατεύθυνση είναι αυτή της μάθησης πολλαπλών εργασιών (multi-task learning). Μέσω της ταυτόχρονης μάθησης πολλών προβλημάτων, το μοντέλο αξιοποιεί τις ομοιότητες διαφορετικών προβλημάτων, ούτως ώστε να έχει ομοιόμορφα καλύτερη απόδοση.

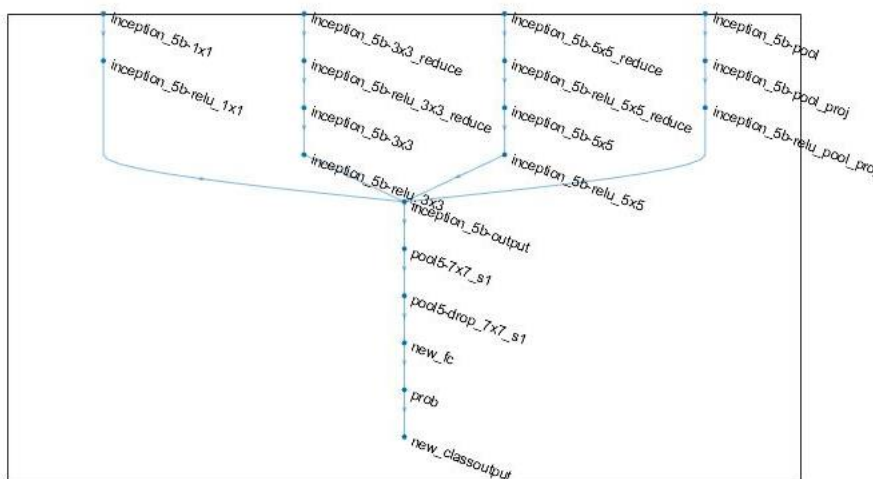
Στη βαθιά μάθηση, συνήθως στόχο αποτελεί η γνώση μιας αναπαράστασης χαρακτηριστικών η οποία περιέχει πολλή πληροφορία και αποτελεί βάση πληροφοριών και δεδομένων που θα αξιοποιηθούν για να γίνει μία πρόβλεψη. Χρησιμοποιώντας το multi-task learning, μπορούμε να βελτιώσουμε τα αποτελέσματα ενός μοντέλου κατά πολύ, επιβάλλοντας του να μάθει γενικές αναπαραστάσεις. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνουμε μία τεχνητή αύξηση των δεδομένων εκπαίδευσης (implicit data augmentation), καθώς η αναπαράσταση των χαρακτηριστικών είναι προϊόν ταυτόχρονης μάθησης πάνω σε πολλά διαφορετικά σύνολα δεδομένων.

## 6 Πειραματικό Μέρος

### 6.1 Ανάπτυξη Υπολογιστικής Εφαρμογής σε περιβάλλον Matlab

Για την ανάπτυξη του νευρωνικού δικτύου, έπειτα από πολλές δοκιμές, επιλέχθηκε η μέθοδος του Transfer Learning από το ήδη εκπαιδευμένο (pretrained) δίκτυο GoogLeNet. Το GoogLeNet είναι βάθους 22-Layers (στρωμάτων), πρωτοεμφανίστηκε το 2014 από τη Google και απεικονίζεται στο σχήμα 6.1.1. Προτείνεται για χρήση κατηγοριοποίησης (classification) ή για χρήση εντοπισμού αντικειμένων σε εικόνες. Σήμερα χρησιμοποιείται κυρίως για έργα αναγνώρισης προσώπων ή σε διαφημιστικούς αλγορίθμους. (Adhikari et al., 2014)(Moon & Kim, 2011)(Mathworks, 2018)

Με τη μέθοδο Transfer Learning, όπως αναπτύχθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, ουσιαστικά ένα προ-εκπαιδευμένο σε παρεμφερές θέμα και με πολύ καλή αρχιτεκτονική δίκτυο, προσαρμόζεται στις ανάγκες του εκάστοτε έργου με ελάχιστες τροποποιήσεις, αξιοποιώντας έτσι τις μεγάλες επιδόσεις των δικτύων που έχουν σχεδιαστεί από κορυφαίους προγραμματιστές.



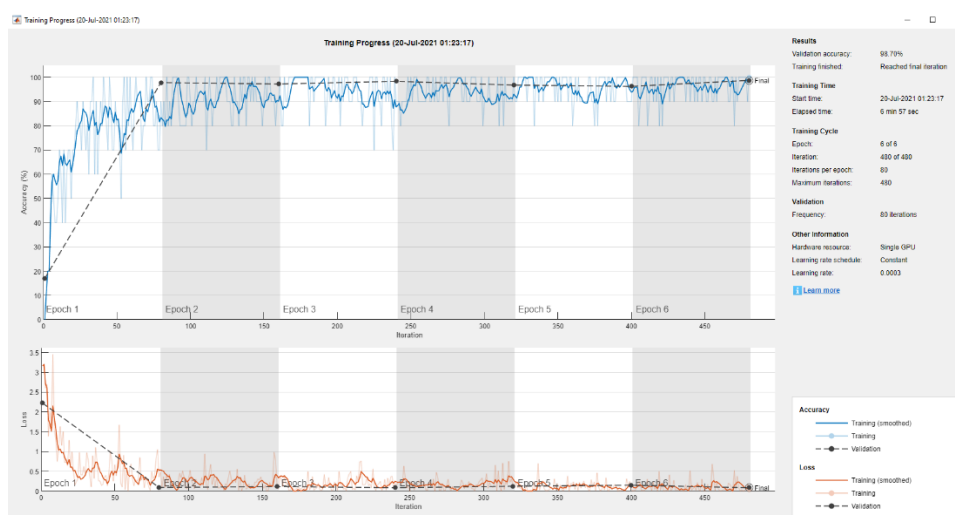
Σχήμα 6.1.1. Το GoogLeNet

Στην παρούσα εφαρμογή χρησιμοποιείται το GoogLeNet για κατηγοριοποίηση των φωτογραφιών στις κατηγορίες: α) Ρωγμή, β) Spalling, γ) Μη κατάλληλη επιφάνεια, δ) Καθαρό. Παρά το γεγονός ότι το δίκτυο αυτό είναι προ-εκπαιδευμένο, δεν έχει εκπαιδευτεί για την αναγνώριση ρωγμών ή άλλων επιφανειακών φθορών. Γι' αυτό το λόγο η εκπαίδευση του δικτύου έχει γίνει με δεδομένα (εικόνες) από μέρος των συλλεχθέντων φωτογραφιών από τις δύο γέφυρες που θα αναλυθούν στο κεφάλαιο 7. Όπως είναι γνωστό, για την επίτευξη μεγάλης ακρίβειας απαιτείται τεράστιος όγκος δεδομένων, της τάξης του ενός εκατομμυρίου φωτογραφιών με ετικέτες, κάτι το οποίο είναι αδύνατο να γίνει στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Γι' αυτό το λόγο, δεν επιτυγχάνεται πολύ μεγάλη ακρίβεια, ωστόσο, με την εφαρμογή της μεθόδου της μεταφοράς μάθησης, η ακρίβεια κρίνεται ικανοποιητική παρά το μικρό πλήθος δεδομένων. Είναι όμως σχεδόν βέβαιο, ότι με μεγαλύτερο όγκο δεδομένων προς εκπαίδευση, η απόδοση του δικτύου θα βελτιωθεί σημαντικά.



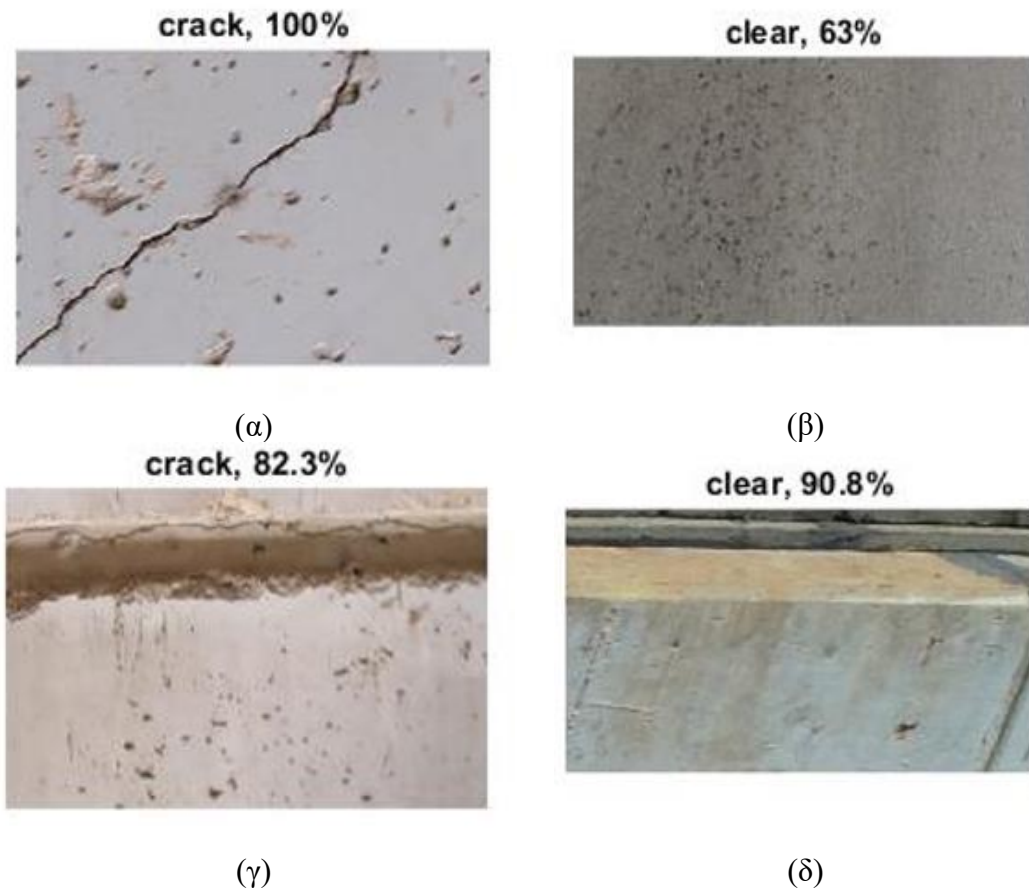
Για την εκπαίδευση του δικτύου, αρχικά η κάθε φωτογραφία από τις επισκέψεις στις δύο γέφυρες χωρίστηκε σε 100 υπό-φωτογραφίες. Στη συνέχεια, μέρος αυτών (περίπου 400) κατηγοριοποιήθηκε στις προαναφερθείσες κατηγορίες δημιουργώντας το λεγόμενο DataSet. Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου έγινε με το 70% του συνολικού πλήθους της κάθε ετικέτας του DataSet, δηλαδή με 70 φωτογραφίες οι οποίες αποτελούν το Test DataSet. Το υπόλοιπο 30% καλείται Validation DataSet και προορίζεται για έλεγχο της διαδικασίας εκπαίδευσης με εικόνες παρόμοιας μορφής με εκείνων της εκπαίδευσης, των οποίων οι ετικέτες είναι γνωστές και άρα, είναι δυνατός ο υπολογισμός της απόδοσης του νευρωνικού δικτύου. Η μέγιστη απόδοση που επιτεύχθηκε κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης με το Test DataSet είναι περίπου 98.70%.

Μετά την εκπαίδευση, το δίκτυο δοκιμάστηκε στο Validation DataSet, δίνοντας απόδοση 98.63%. Στιγμιότυπα από τη διαδικασία εκπαίδευσης και κατηγοριοποίησης φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 6.1.2. Φαίνεται στο άνω μέρος του σχήματος με μπλε γραμμή, η ακρίβεια επί τοις εκατό που επιτυγχάνεται σε κάθε μία από τις 6 επαναλήψεις (6 Epochs) κατά τις οποίες το ίδιο σετ δεδομένων «περνάει» μέσα από το δίκτυο 6 φορές με στόχο την «εκπαίδευσή» του, δηλαδή τον προσδιορισμό των βαρών όπως αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 5. Με διακεκομμένη γραμμή απεικονίζεται ο μέσος όρος της ακρίβειας κάθε εποχής που στο τέλος, όπως φαίνεται, φτάνει στο 98.70%. Αντίθετα, στο κάτω μέρος του σχήματος 6.1.2, φαίνεται το συμπληρωματικό ως προς τις ακρίβειες διάγραμμα που απεικονίζει το σφάλμα και, όπως είναι αναμενόμενο, καταλήγει στο 0.13 που είναι 1.3% και είναι πολύ κοντά στο 0.



**Σχήμα 6.1.2. Στιγμιότυπο Εκπαίδευσης του GoogLeNet**

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 6.1.3 φαίνονται τα αποτελέσματα του δικτύου για εικόνες από το validation set. Το ποσοστό πάνω από κάθε εικόνα είναι η πιθανότητα που υπολογίζει το πρόγραμμα να είναι σωστή η πρόβλεψη που αναγράφεται αριστερά. Δηλαδή, στο Σχήμα 6.1.3 (α), η πρόβλεψη του προγράμματος είναι ότι εντοπίζει μια ρωγμή και η πιθανότητα να είναι σωστή η πρόβλεψη υπολογίζεται στο 100%, δηλαδή δεν υπάρχει περιθώριο αμφιβολίας από το πρόγραμμα. Αντίστοιχα στο Σχήμα 6.1.3 (β), η πρόβλεψη είναι ότι η επιφάνεια δεν εμφανίζει ρωγμή, είναι δηλαδή «καθαρή», όμως η πιθανότητα αυτή η πρόβλεψη να είναι σωστή είναι μόλις 63%. Ομοίως, στο Σχήμα 6.1.3 (γ), εντοπίζει ρωγμή με πιθανότητα ορθότητας 82.3% και στο (δ) δεν εντοπίζει ρωγμή με πιθανότητα ορθότητας 90.8%.



Σχήμα 6.1.3. Κατηγοριοποίηση τυχαίων εικόνων από το δείγμα

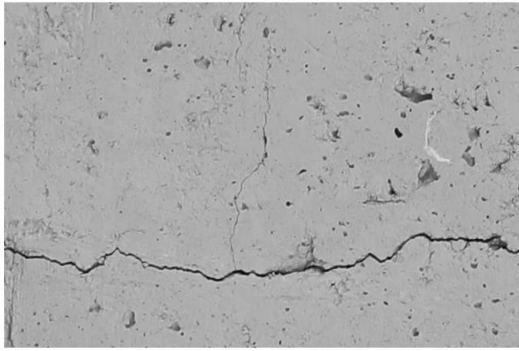
## 6.2 Επεξεργασία εικόνων (Image Analysis and Processing)

Στη συνέχεια, οι εικόνες που εντοπίστηκαν με ρωγμή, επεξεργάστηκαν περαιτέρω ώστε να αντληθούν πληροφορίες για το εύρος ρωγμής  $w_{crack}$  και έπειτα, να εκτιμηθεί η εναπομένουσα διάρκεια ζωής της κατασκευής χρησιμοποιώντας το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 3.3.

Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με την ετικέτα στην οποία κρίθηκαν ότι ανήκουν βάσει του νευρωνικού δικτύου, οδηγήθηκαν σε αντίστοιχους με την υπό περίπτωση ετικέτα υποφακέλους, και υποβλήθηκαν στην εν λόγω επεξεργασία.

Η επεξεργασία αυτή, ακολουθεί μια διαδικασία εφαρμογής φίλτρων (συγκεκριμένα median filter και gaussian filter) με σκοπό την απομόνωση της ρωγμής από τον οποιοδήποτε θόρυβο μπορεί να υπάρχει στη φωτογραφία. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε βασίζεται στην προτεινόμενη μέθοδο των Chun, Izumi, & Yamane (2020) (Chun et al., 2021).

Αρχικά γίνεται μετατροπή της εικόνας από RGB (έγχρωμη) σε Grayscale (κλίμακα του γκρι), με τη διαφορά όμως, ότι για τη μετατροπή αυτή δεν χρησιμοποιείται ο μέσος όρος των 3 καναλιών χρωμάτων (red, green, blue) αλλά η μέγιστη τιμή αυτών. Με αυτήν τη λεπτομέρεια, επιτυγχάνεται ο καλύτερος διαχωρισμός της επιφανειακής ρωγμής από θόρυβο του φόντου, όπως ας πούμε γραμμές από γκράφιτι, σκιές, κ.α. όπως φαίνεται λεπτομερώς στο Σχήμα 6.2.1 (α) (Αρχική εικόνα) και (β) (Grayscale).



(α) Αρχική εικόνα

(β) Grayscale (ασπρόμαυρη)

**Σχήμα 6.2.1. Μετατροπή αρχικής εικόνας (α) σε Grayscale (β)**

Στη συνέχεια, εφαρμόζονται τα φίλτρα ως εξής:

$$I_a(i,j) = \frac{I_b(i,j) \times 0.5b_m}{I_m(i,j)}, \quad (6.1)$$

όπου,

- $i,j$  : οι συντεταγμένες του στοχευόμενου εικονοστοιχείου (pixel) πίξελ,
- $I_a$  : η εικόνα μετά τη διόρθωση
- $I_m$  : η εικόνα με το φίλτρο median
- $I_b$  : η εικόνα πριν το φίλτρο
- $b_m$  : η μέγιστη τιμή των πίξελ = 255

και

$$I_c(i,j) = \frac{I_a(i,j) \times 0.5b_m}{I_g(i,j)}, \quad (6.2)$$

όπου,

- $i,j$  : οι συντεταγμένες του στοχευόμενου εικονοστοιχείου,
- $I_a$  : η εικόνα μετά τη διόρθωση με το median filter
- $I_g$  : η εικόνα με το φίλτρο gaussian
- $I_c$  : η εικόνα μετά τη διόρθωση με το φίλτρο gaussian
- $b_m$  : η μέγιστη τιμή των πίξελ = 255

Η κύρια ιδέα των median filter και gaussian filter είναι να αντικαταστήσουν τις τιμές των πίξελ με σκοπό τη μείωση του θορύβου. Το median filter αντικαθιστά την τιμή του κάθε εικονοστοιχείου με τη μέση τιμή των γειτονικών του. Στην περίπτωση του gaussian filter, η διαδικασία είναι ελαφρώς πιο σύνθετη. Η εφαρμογή του φίλτρου του Gauss σε μία εικόνα είναι το ίδιο με τη συνέλιξη της εικόνας με τη συνάρτηση του Gauss. Η διαδικασία αυτή είναι επίσης γνωστή ως μετατροπή Weierstrass. Το φίλτρο του Gauss είναι τύπος θόλωσης της εικόνας που χρησιμοποιεί

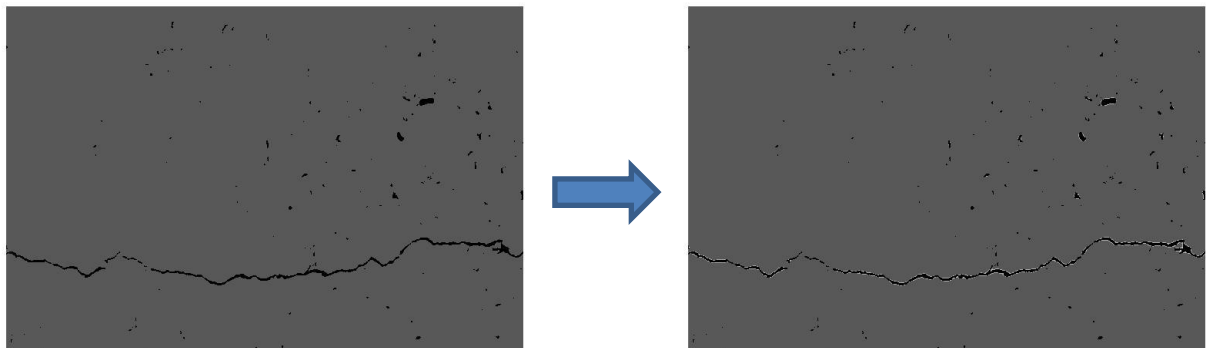
τη συνάρτηση του Gauss η οποία ταυτόχρονα εκφράζει την κανονική κατανομή στη στατιστική για να υπολογίσει τη μετατροπή που θα εφαρμοστεί σε κάθε πίξελ της εικόνας. Η φόρμουλα που εφαρμόζεται είναι η εξής:

$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (6.3)$$

όπου,

- $x$  : η απόσταση από τον οριζόντιο άξονα,
- $y$  : η απόσταση από τον κατακόρυφο άξονα
- $\sigma$  : η τυπική απόκλιση της κανονικής κατανομής.

Εφαρμόζοντάς την σε δύο διαστάσεις, δηλαδή σε εικόνα, αυτή η φόρμουλα παράγει μία επιφάνεια της οποίας το περίγραμμα είναι ομόκεντροι κύκλοι με κανονική κατανομή από το κέντρο. Οι τιμές από αυτήν την κατανομή χρησιμοποιούνται για να φτιάξουν έναν πίνακα συνέλιξης, ο οποίος εφαρμόζεται στην αρχική εικόνα θλώνοντάς την αλλά ταυτόχρονα διατηρώντας καλύτερα από οποιαδήποτε άλλη διαδικασία θλώσης τις ακμές και τα όρια της αρχικής εικόνας. Στο σχήμα 6.2.2 φαίνεται η εφαρμογή των φίλτρων αυτών στην ασπρόμαυρη εικόνα και το αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται που είναι η επισήμανση της ρωγμής και ο διαχωρισμός της από οποιουδήποτε τύπου θόρυβο.



(α) Διορθωμένη εικόνα με Median Filter

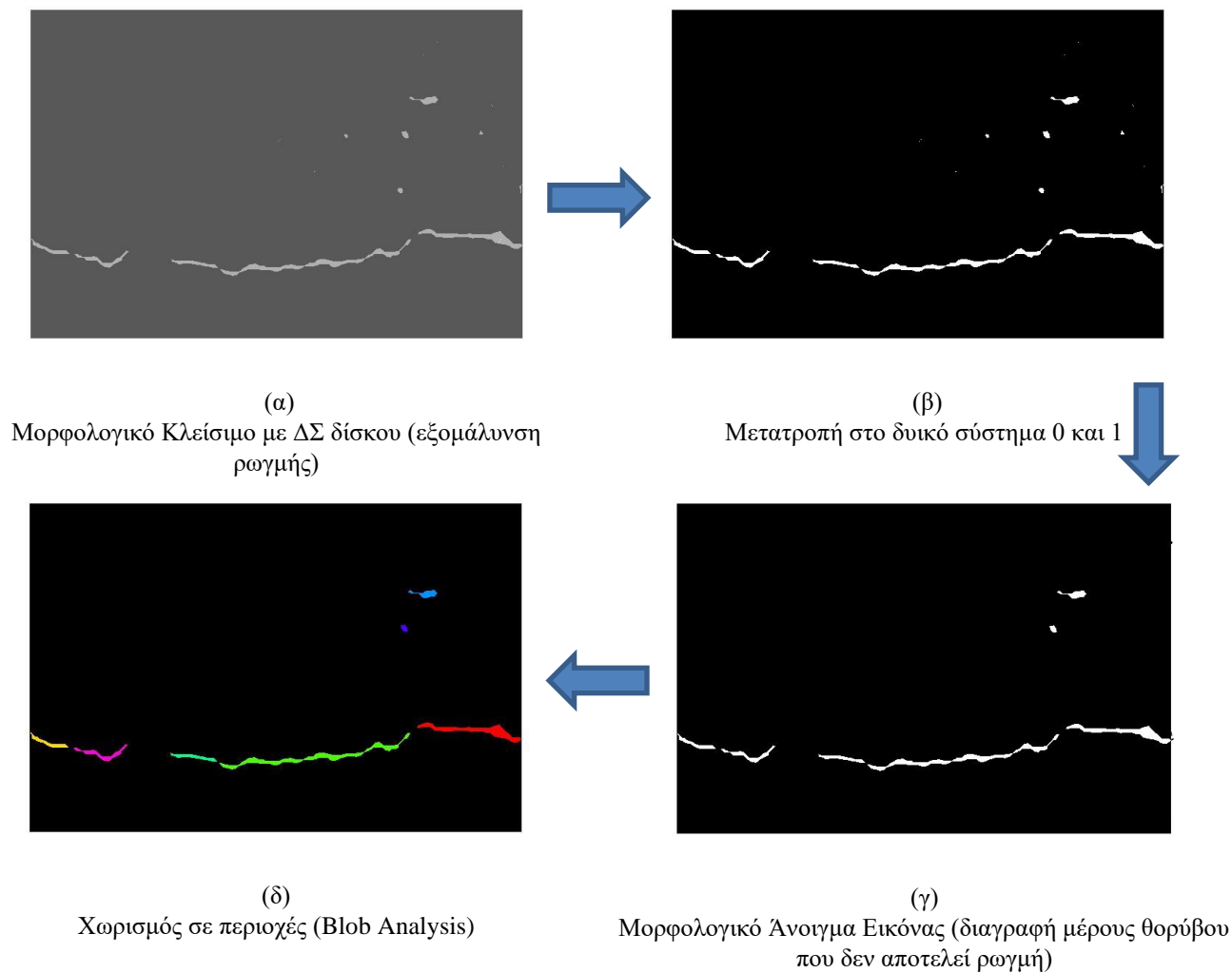
(β) Διορθωμένη εικόνα με Gaussian Filter

**Σχήμα 6.2.2. Διόρθωση εικόνας με Median Filter (α) και Gaussian Filter (β)**

Έπειτα εφαρμόζεται μορφολογική επεξεργασία της εικόνας. Η μαθηματική μορφολογία χρησιμοποιεί τον όρο *Μορφολογία* από την επιστήμη της βιολογίας που πραγματεύεται τη μορφή και τη δομή των ζώων και των φυτών, και αναφέρεται σε ένα πακέτο εργαλείων για την αναπαράσταση και περιγραφή περιοχών μιας εικόνας, δηλαδή πραγματεύεται τη δομή και μορφή των μητρωικά αναπαριστώμενων εικόνων (όρια, περίγραμμα, ακμή, σκελετός κ.λπ.)

Στο πλαίσιο αυτής της επεξεργασίας, φτιάχνεται ένα δομικό στοιχείο, ΔΣ (Structuring Element, SE) σε μορφή δίσκου με ακτίνα 15 πίξελ και αρχή το κέντρο του. Η αρχή του ΔΣ επισκέπτεται κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας επιτελώντας μια μη γραμμική διαδικασία μεταξύ τους και, βάσει αυτής,

αποφασίζεται αν το εκάστοτε εικονοστοιχείο θα ανήκει στο τελικό σύνολο-εικόνα. Στη συνέχεια γίνεται κλείσιμο και άνοιγμα. Το κλείσιμο εξομαλύνει το περίγραμμα ενός αντικειμένου συμπληρώνοντας οπές και συγχωνεύοντας στενά θραύσματα ενώ το άνοιγμα σπάει μικρούς ισθμούς και εξαλείφει προεξοχές. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η εξομάλυνση της μορφής της ρωγμής και ο διαχωρισμός της από το φόντο (Pratt, 1994). Στα σχήματα 6.2.3 (α)-(β) φαίνεται ακριβώς αυτή η διαδικασία και τα αποτελέσματα του κάθε της βήματος.



**Σχήμα 6.2.3. Μορφολογική επεξεργασία και Blob Analysis**

Στη συνέχεια, η εικόνα μετατρέπεται στο δυικό σύστημα, δηλαδή οι τιμές των πίξελ που την αποτελούν γίνονται 0 (μαύρο) ή 1 (άσπρο) ανάλογα με το όριο (threshold) το οποίο καθορίζεται με τη μέθοδο του Otsu (Otsu., n.d.). Έτσι, προκύπτει μία εικόνα μαύρη-άσπρη και τώρα μπορεί να γίνει ανάλυση περιοχών (Blob Analysis). Κατά τη διαδικασία αυτή, η εικόνα χωρίζεται σε περιοχές από πίξελ με κοινά χαρακτηριστικά (στην προκειμένη οι τιμές τους 0 ή 1). Για να οριστεί μία περιοχή (Blob) πρέπει τα πίξελ με κοινά χαρακτηριστικά να συνορεύουν. Έτσι λοιπόν, επιλέγονται οι περιοχές με το μεγαλύτερο εμβαδόν (σε πίξελ), με σκοπό την αποφυγή περιοχών που δεν αποτελούν ρωγμή αλλά θόρυβο που δεν κατάφεραν να φιλτραριστούν από την προηγούμενη

διαδικασία. Μετριέται ο μέγιστος άξονάς τους και με τη θεώρηση ότι η ρωγμή είναι περιοχή με ορθογωνική επιφάνεια υπολογίζεται το εύρος της από την εξίσωση:

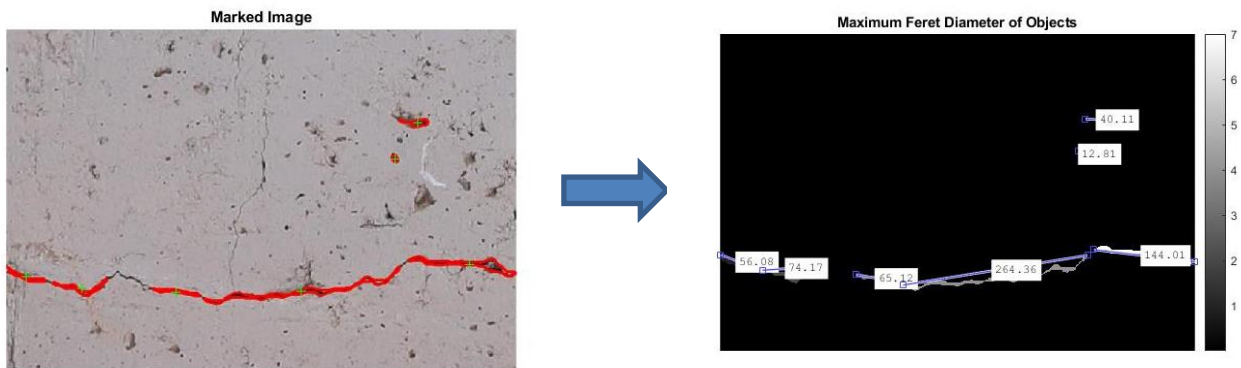
$$w_{crack} = A/L_{max}, \quad (6.4)$$

όπου,

- $A$  : το μεγαλύτερο εμβαδόν,
- $L_{max}$  : ο μέγιστος άξονας των περιοχών με το μεγαλύτερο εμβαδόν

Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή που λαμβάνεται είναι εκείνη με το μεγαλύτερο εμβαδόν. Με αυτήν την παραδοχή, αποκλείεται να ληφθούν υπόψη μικρές περιοχές που από λάθος έχουν επιλεγθεί. Έτσι, ακόμα και να μην έχει ληφθεί ως ενιαία περιοχή ολόκληρη η ρωγμή, επιλέγεται ένα μικρό μέρος της το οποίο αρκεί για να προκύψει συμπέρασμα ως προς το εύρος της.

Στο σχήμα 6.2.4 (α), φαίνεται το αποτέλεσμα του αυτόματου μαρκαρίσματος της περιοχής ενδιαφέροντος (δηλ. ρωγμή) που γίνεται από το πρόγραμμα. Παρά το γεγονός ότι η ρωγμή δεν έχει μαρκαριστεί σε όλο το μήκος της, ενώ επιπλέον έχουν μαρκαριστεί και μερικά στοιχεία που δεν αποτελούν ρωγμή, η παραπάνω παραδοχή επιτρέπει μία ασφαλή προσέγγιση του εύρους της υπό μέτρηση ρωγμής.



(α)

Σημείωση των περιοχών ενδιαφέροντος στην αρχική εικόνα

(β)

Υπολογισμός μέγιστου άξονα περιοχής

#### Σχήμα 6.2.4. Εξαγωγή συμπερασμάτων από τη μέτρηση των ρωγμών

Τέλος, για τη μετατροπή του εύρους αυτού από πίξελ σε mm γίνεται η παραδοχή ότι η φωτογραφία έχει ληφθεί από απόσταση 1m. Το υπολογισμένο εύρος ρωγμής πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή A, όπου:

$$A = \text{Distance} \times [(\text{Sensor Size} \div \text{Focal Length}) \div (\text{συνολικό αριθμό των πίξελ της εικόνας})], \quad (6.5)$$

Με δεδομένα τα χαρακτηριστικά της φωτογραφικής μηχανής:

- Focal Length = 35 mm
- Sensor Size = 36×24 mm
- Distance = 1000 mm

Για την εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής ακολουθείται η μεθοδολογία που προτείνεται στο κεφάλαιο 3.3. Όπως αναλύθηκε, ο εναπομείναντας χρόνος μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής εξαρτάται από το εύρος της ρωγμής και από την αρχική διάμετρο της ράβδου του οπλισμού. Ως δεδομένο στο πρόγραμμα, λαμβάνεται το εύρος της ρωγμής που υπολογίστηκε από την προαναφερθείσα ανάλυση. Όσον αφορά την αρχική διάμετρο της ράβδου οπλισμού, γίνεται παραμετρικός υπολογισμός του χρόνου που απομένει, για τις διάφορες τιμές των διαμέτρων του οπλισμού και συγκεκριμένα για Ø8, Ø12, Ø16, Ø20, Ø24 (mm). Βέβαια, από το διάγραμμα του σχήματος 3.3.4 φαίνεται ότι δεν υπάρχει πολύ μεγάλη απόκλιση στο αποτέλεσμα. Στο πλαίσιο της εφαρμογής του αυτοματοποιημένου υπολογιστικού μοντέλου εκτίμησης διάρκειας ζωής για την εξαγωγή ενός αριθμητικού αποτελέσματος από το πρόγραμμα λαμβάνεται, υπέρ της ασφαλείας, ως διάμετρος οπλισμού η δυσμενέστερη περίπτωση, δηλαδή όπλιση με χάλυβα οπλισμού Ø8. Υπενθυμίζεται ότι η θεώρηση που έχει γίνει, λαμβάνει υπόψη τη συμπεριφορά μόνο μίας χαλύβδινης ράβδου οπλισμού, αγνοώντας τη συνεισφορά των υπολοίπων.

Είναι πολύ σημαντικό να σημειωθεί ότι για την αξιόπιστη χρήση της εφαρμογής αυτής, η συλλογή των φωτογραφιών πρέπει να γίνει από συγκεκριμένη απόσταση η οποία θα είναι γνωστή και ίδια για όλες τις φωτογραφίες. Σε περίπτωση που η απόσταση της λήψης των φωτογραφιών από το ενδιαφερόμενο στοιχείο δεν είναι ίδια σε όλες τις φωτογραφίες, το πρόγραμμα χρειάζεται τροποποίηση.

Τελικά, με τις παραπάνω παραδοχές και με τα βήματα που αναλύθηκαν, το αποτέλεσμα του προγράμματος φαίνεται στο σχήμα 6.2.5.



Wcrack,max = 0.501 mm, ResidualLife = 5.4827 χρόνια (για d = 8mm)

**Σχήμα 6.2.5. Εκτίμηση Εναπομένουσας Διάρκειας Ζωής**



## 7 Αποτελέσματα και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

Η εφαρμογή γενικά, έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα. Υπό τις εύλογες παραδοχές που λήφθηκαν, η ακρίβεια είναι πολύ υψηλή αλλά και η αξιοποίησή της είναι σχετικά εύκολη. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται τα αποτελέσματα στις επόμενες παραγράφους.

### 7.1 Απόδοση της υπολογιστικής εφαρμογής και Διάγραμμα Ροής

Η απόδοση του νευρωνικού δικτύου υπολογίστηκε κατά την εκπαίδευση ίση με 93.46% ενώ στο Validation Data Set ίση με 95.56%. Η απόδοση αυτή κρίνεται ικανοποιητική αν αναλογιστεί κανείς ότι το Dataset είναι εικόνες από τη διαδικασία πραγματικής αποτίμησης γεφυρών και όχι εστιασμένες στις ρωγμές. Η διαδικασία υπολογισμού του εύρους ρωγμής κρίνεται επίσης ικανοποιητική, καθώς στη μία από τις δύο γέφυρες, είχαν μετρηθεί οι ρωγμές και το εύρος τους είχε σημειωθεί με αποτέλεσμα τη δυνατότητα σύγκρισης των αποτελεσμάτων.

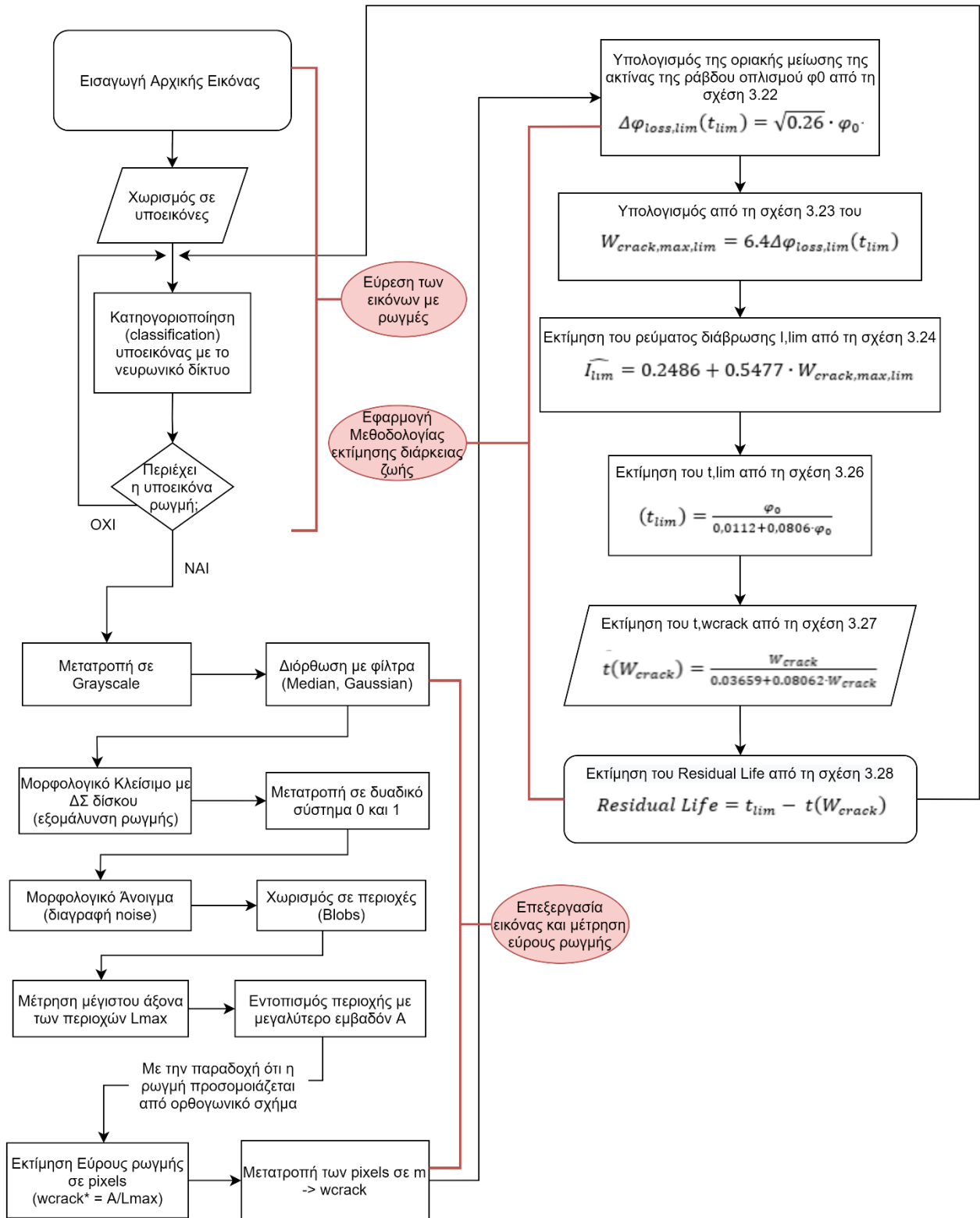
Το διάγραμμα ροής της υπολογιστικής εφαρμογής φαίνεται αναλυτικά στο σχήμα 7.1.1. Αξίζει να σημειωθεί ότι το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε με πλήθος 400 εικόνων. Ο αριθμός αυτός θεωρείται μικρός, και η απόδοση του προγράμματος σίγουρα θα βελτιστοποιηθεί με την αύξηση του πλήθους των εικόνων εκπαίδευσης.

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, εκτελέστηκαν από το πρόγραμμα τα βήματα που φαίνονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 7.1.1. Το πρόγραμμα αυτό έχει προκύψει από τη διαδικασία που αναλύεται στο κεφάλαιο 6 και χωρίζεται σε τρία μέρη:

1. Την αυτόματη κατηγοριοποίηση των εικόνων ανάλογα με το αν απεικονίζουν ρωγμή, από το νευρωνικό δίκτυο,
2. Την περαιτέρω επεξεργασία των εικόνων εκείνων που βρέθηκαν να απεικονίζουν ρωγμή με στόχο τη μέτρησή της,
3. Την εφαρμογή της μεθοδολογίας του κεφαλαίου 3.3 για την εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής.

Βάσει των βημάτων αυτών, προκύπτουν τα αποτελέσματα που αναλύονται στο κεφάλαιο 7.2. Συγκεκριμένα, από το μεγάλο πλήθος εικόνων που προέκυψε από την επιθεώρηση με το ΣμηΕΑ και την επαγγελματική κάμερα στο πεδίο, επιλέχθηκαν 5 εικόνες που αποτελούν χαρακτηριστικές περιπτώσεις.





Σχήμα 7.1.1 Διάγραμμα Ροής Προγράμματος

## 7.2 Αποτελέσματα της Επεξεργασίας

Παρακάτω ενδεικτικά παρατίθενται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα του προγράμματος για κάποιες χαρακτηριστικές περιπτώσεις εικόνων που λήφθηκαν στο πεδίο. Συγκεκριμένα, πρόκειται για 5 χαρακτηριστικές περιπτώσεις εικόνων που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύουν το σύνολο των περιπτώσεων που θα προκύψουν κατά την επιθεώρηση και ανάλυση μίας υποδομής με το συγκεκριμένο πρόγραμμα.

### 7.2.1 1<sup>η</sup> Σειρά Μέτρησης:

Από το σχήμα 7.2.1 προκύπτει «θετική» σε ρωγή η υποφωτογραφία ως φαίνεται λεπτομερώς.

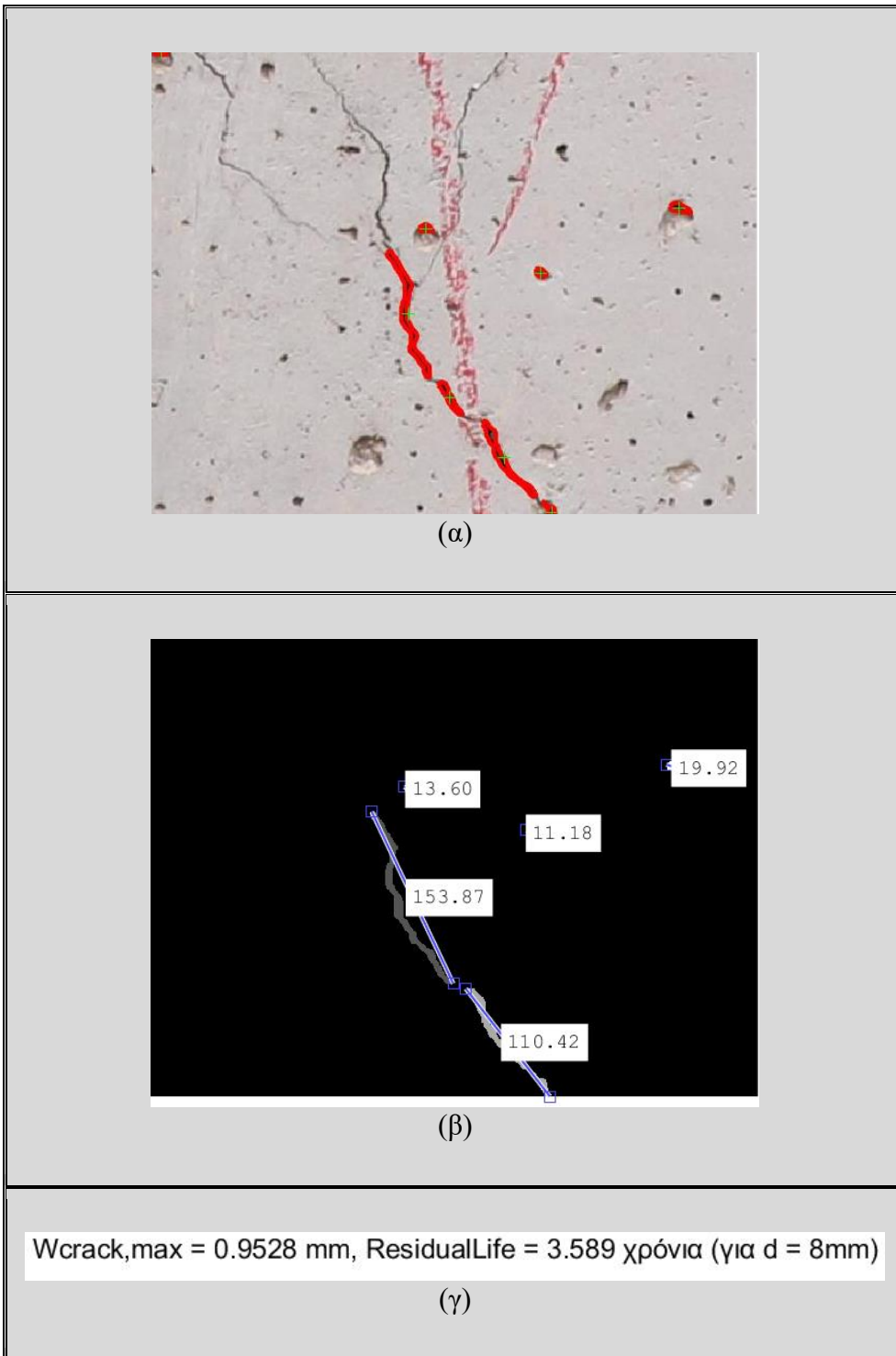


Σχήμα 7.2.1. Αρχική εικόνα και υπο-εικόνα εστιασμένη στη ρωγή-1<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Στη συνέχεια, από το πρόγραμμα προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα της 1<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων που συνοψίζονται στον πίνακα αποτελεσμάτων 7.2.1.

Στη εικόνα (α) του Πίνακα 7.2.1 φαίνεται η εντοπισμένη περιοχή ενδιαφέροντος από το πρόγραμμα, που αποτελεί μέρος της ρωγμής που θα μετρηθεί. Αν και υπάρχουν κι άλλες ρωγμές, αυτή που έχει εντοπιστεί από το πρόγραμμα είναι η πιο μεγάλη και ως εκ τούτου και η πιο κρίσιμη. Στην εικόνα (β) του Πίνακα 7.2.1 φαίνονται οι υποπεριοχές (blobs) που έχουν εξαχθεί από την εικόνα (α) και μετρούνται οι μέγιστοι άξονές τους. Στη συνέχεια, για την εξαγωγή του εύρους ρωγμής επιλέγεται η περιοχή εκείνη με το μέγιστο εμβαδόν και από την εξίσωση 6.4 προκύπτει το εύρος. Στην εικόνα (γ) Πίνακα 7.2.1 φαίνεται ο υπολογισμός του εύρους σε mm με τις κατάλληλες μετατροπές καθώς και η εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής σύμφωνα με το μοντέλο της παραγράφου 3.3. Η μέτρηση στο πεδίο είχε δείξει εύρος ρωγμής ίσο με 0.8 mm. Η μέτρηση από το πρόγραμμα έδειξε ρωγή εύρους 0.95 mm (απόκλιση 19%).

Πίνακας 7.2.1 Πίνακας αποτελεσμάτων 1<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων



Στο σχήμα 7.2.2, φαίνονται δύο από τις υποφωτογραφίες που προκύπτουν «θετικές» σε ρωγμή



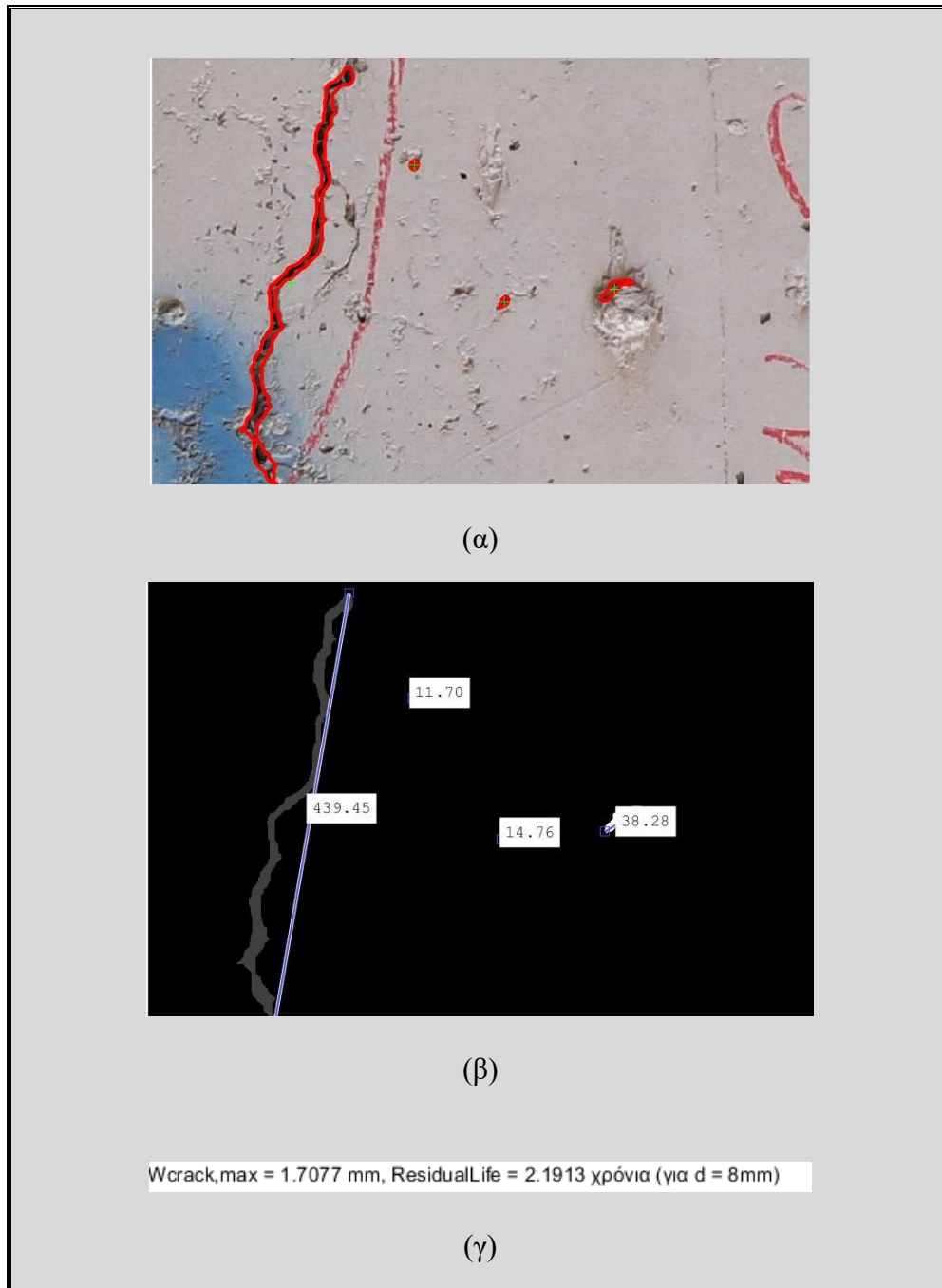
Σχήμα 7.2.2. Αρχική εικόνα και υπο-εικόνες με ρωγμές- 2<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων

Στη συνέχεια, από το πρόγραμμα προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα της 2<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων που συνοψίζονται στον πίνακα αποτελεσμάτων 7.2.2.

Στη εικόνα (α) του Πίνακα 7.2.2 φαίνεται η εντοπισμένη περιοχή ενδιαφέροντος που εμπεριέχει τη ρωγμή που θα μετρηθεί. Αν και έχουν σημειωθεί από το πρόγραμμα και περιοχές που δεν αντιστοιχούν σε ρωγμή, αυτό δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα, καθώς είναι βέβαιο ότι από τις περιοχές ενδιαφέροντος που έχουν εντοπιστεί, η μεγαλύτερη, που είναι αυτή από την οποία θα προκύψει το αποτέλεσμα, είναι η πραγματική ρωγμή. Έτσι, με την παραδοχή ότι για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμής λαμβάνεται το μεγαλύτερο εμβαδόν εξασφαλίζεται η επιλογή της σωστής περιοχής. Στην εικόνα (β) του Πίνακα 7.2.2 φαίνονται οι υποπεριοχές (blobs) που έχουν εξαχθεί από την εικόνα (α) και μετρούνται οι μέγιστοι άξονές τους. Στη συνέχεια, για την εξαγωγή του εύρους ρωγμής επιλέγεται η περιοχή εκείνη με το μέγιστο εμβαδόν και από την εξίσωση 6.4 προκύπτει το εύρος ρωγμής. Στην εικόνα (γ) του Πίνακα 7.2.2 φαίνεται ο υπολογισμός του εύρους σε mm με τις κατάλληλες μετατροπές καθώς και η εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής σύμφωνα με το μοντέλο της παραγράφου 3.3. Όπως φαίνεται, η ρωγμή στο πεδίο είχε υπολογιστεί 1.50 mm, ενώ η μέτρηση στο πρόγραμμα έδειξε εύρος ρωγμής 1.71 mm.



### Πίνακας 7.2.2. Πίνακας αποτελεσμάτων 2<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων

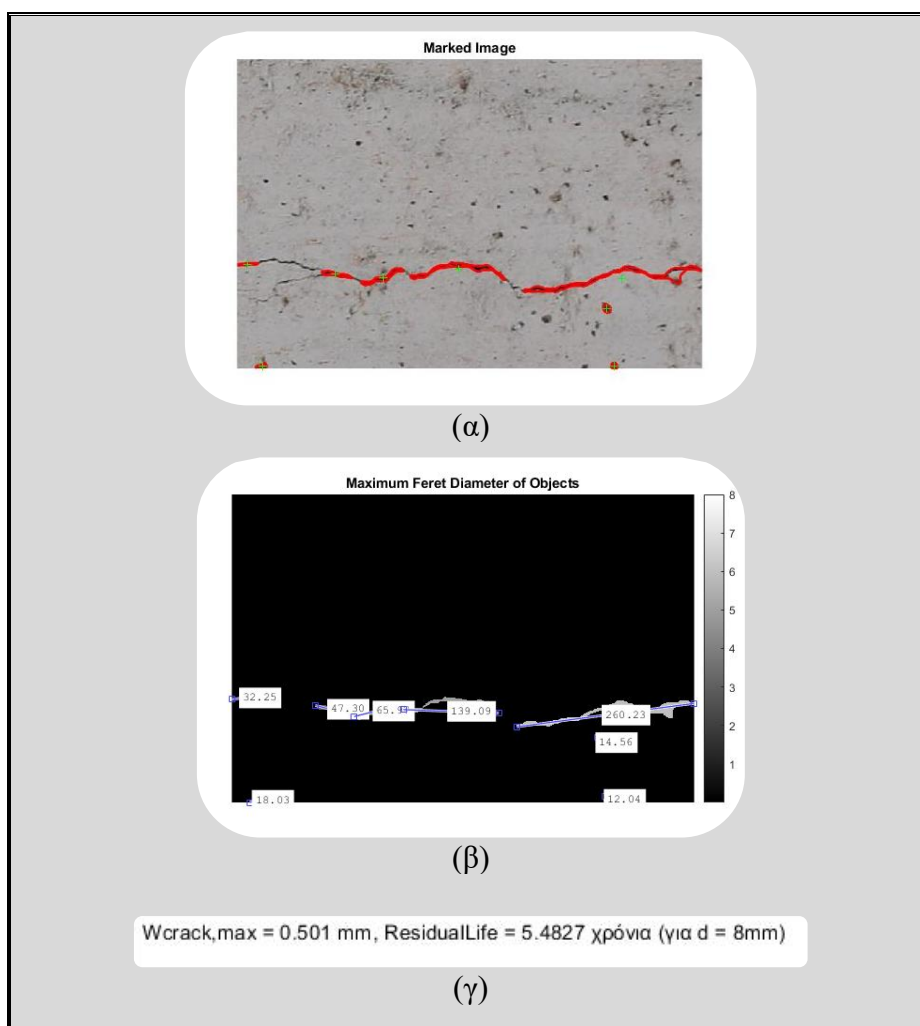


Το συμπέρασμα που προκύπτει από την ανάλυση των εικόνων και την εξαγωγή των υπολογισμών με την εφαρμογή του αυτοματοποιημένου υπολογιστικού μοντέλου, είναι ότι τα εύρη ρωγμών που εν τέλει υπολογίστηκαν, είναι πολύ κοντά στα πραγματικά εύρη. Άξιο αναφοράς είναι το γεγονός ότι η απόσταση του φωτογραφικού φακού στο πεδίο δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί με απόλυτη ακρίβεια και έτσι έχει γίνει μία προσέγγιση με σκοπό την εξαγωγή των υπολογισμών. Σε αυτό οφείλονται οι όποιες αποκλίσεις.

Παρακάτω (Πίνακας 7.2.3-Πίνακας 7.2.5) παρατίθενται τα εξαγόμενα του προγράμματος για διάφορες χαρακτηριστικές περιπτώσεις εικόνων (3<sup>η</sup> 4<sup>η</sup> και 5<sup>η</sup> σειρά μετρήσεων), των οποίων ο σχολιασμός γίνεται παράλληλα.

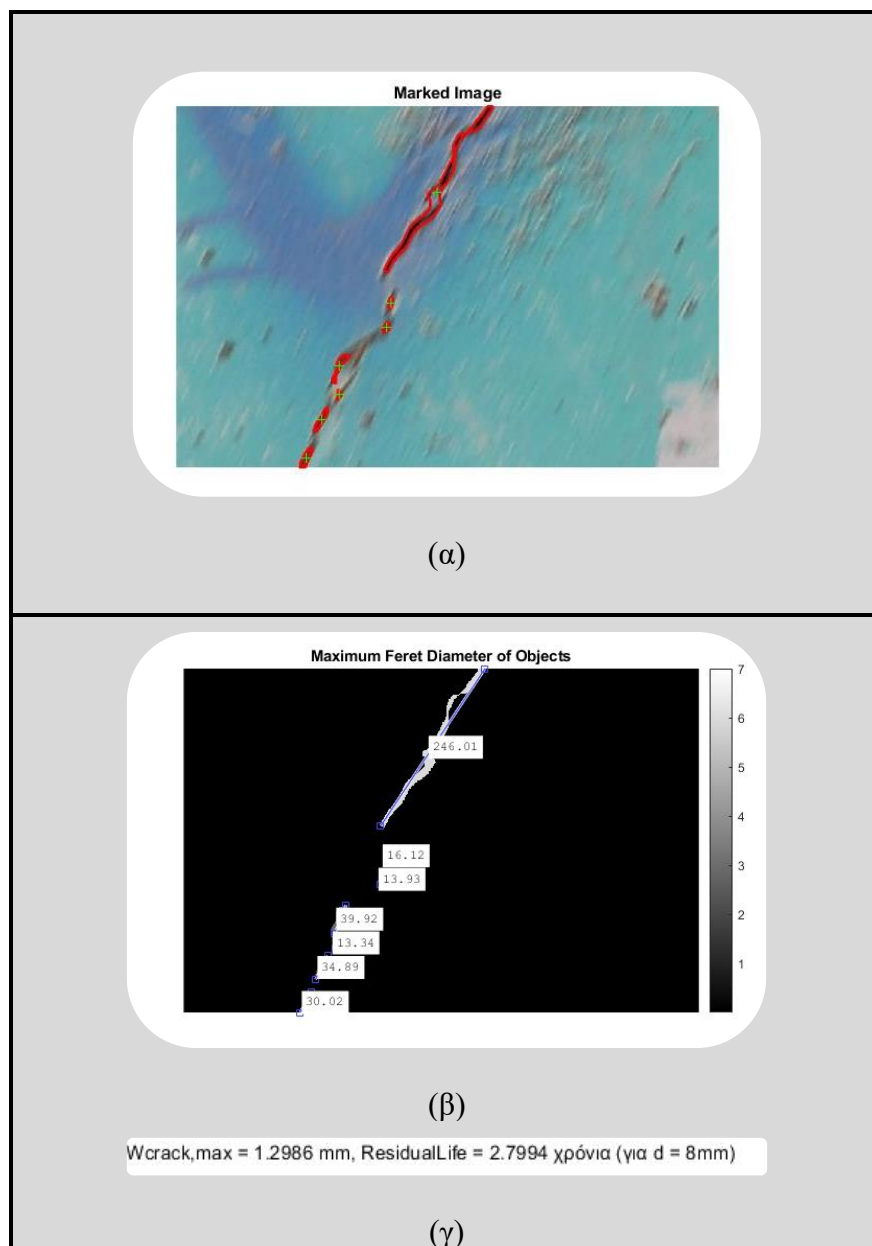
Η εικόνα του Πίνακας 7.2.3 αποτελεί μία τυπική περίπτωση όπου η ρωγμή έχει απομονωθεί από το θόρυβο (εδώ σκιές και κενά του σκυροδέματος) ενώ παρατηρείται ότι δεν έχει ληφθεί ως μία ενιαία περιοχή αλλά ως επτά ξεχωριστές. Ωστόσο αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα μιας και για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμής λαμβάνεται η περιοχή με το μεγαλύτερο εμβαδόν (εδώ η δεξιότερη). Από εκεί εξάγεται το εύρος σε mm (εδώ ίσο με 0.5 mm). Έχει θεωρηθεί απόσταση φωτογραφικού φακού ίση με 1m. Η εναπομένουσα διάρκεια ζωής σύμφωνα με το μοντέλο της παραγράφου 3.3 υπολογίζεται στα 5.5 χρόνια για τη δυσμενέστερη περίπτωση που υπάρχει μόνο μία ράβδος σπλισμού, διαμέτρου 8 mm. Αυτό σημαίνει ότι η κατασκευή βάσει των επιφανειακών ρωγμών της σε 5.5 χρόνια δεν θα μπορεί να φέρει τα φορτία της Ο.Κ.Α. όπως ορίζεται από τον Ευρωκώδικα.

**Πίνακας 7.2.3. Παράθεση Αποτελεσμάτων 3<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων**



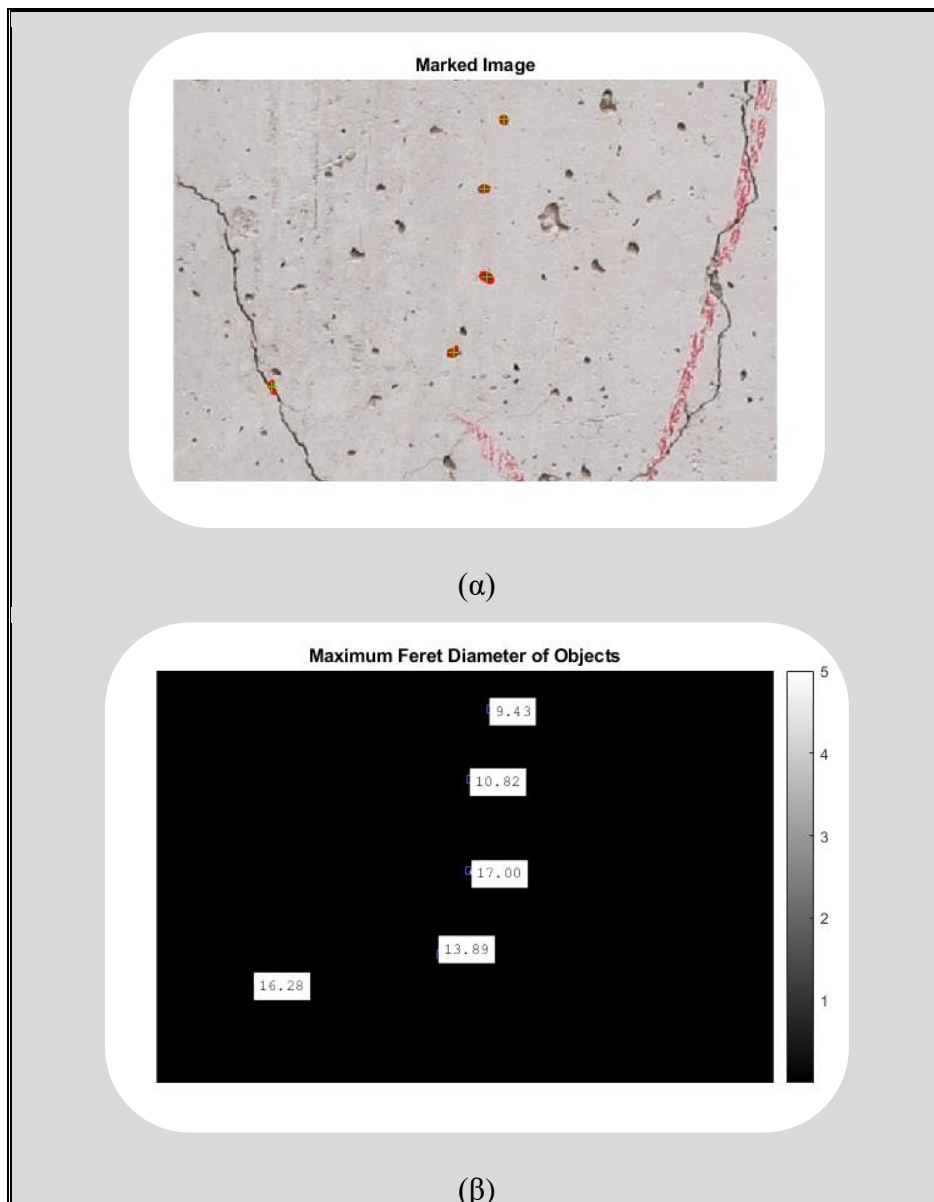
Η εικόνα του Πίνακα 7.2.4 αποτελεί περίπτωση όπου η εικόνα είναι θολή. Παρ'ολ'αυτά, η ρωγμή έχει απομονωθεί ενώ παρατηρείται επίσης ότι δεν έχει ληφθεί ως μία ενιαία περιοχή αλλά ως πολλές ξεχωριστές. Για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμής λαμβάνεται η περιοχή με το μεγαλύτερο εμβαδόν (εδώ η πάνω) και από εκεί εξάγεται το εύρος σε mm (εδώ ίσο με 1.3 mm). Έχει θεωρηθεί απόσταση φωτογραφικού φακού ίση με 2m. Η εναπομένουσα διάρκεια ζωής σύμφωνα με το μοντέλο της παραγράφου 3.3 υπολογίζεται στα 1.3 χρόνια για τη δυσμενέστερη περίπτωση που υπάρχει μόνο ράβδος οπλισμού, διαμέτρου 8 mm. Αυτό σημαίνει ότι η κατασκευή βάσει των επιφανειακών ρωγμών της σε 1.3 χρόνια δεν θα μπορεί να φέρει τα φορτία της Ο.Κ.Α. όπως ορίζεται από τον Ευρωκώδικα.

**Πίνακας 7.2.4. Παράθεση Αποτελεσμάτων 4<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων**



Η εικόνα του Πίνακα 7.2.5 αποτελεί μία περίπτωση όπου ενώ η εικόνα είναι καθαρή και η ρωγμή φαίνεται λεπτομερώς, αυτή δεν έγινε αντιληπτή από το πρόγραμμα. Αυτό συνέβη σε μερικές εικόνες και η αιτία δεν είναι σαφής. Το πιθανότερο είναι να χρειάζεται μικρότερη ευαισθησία στη διαδικασία διαχωρισμού του θορύβου από τη ρωγμή είτε οφείλεται στο φωτισμό. Ωστόσο, λόγω του ότι η υποφωτογραφία αυτή αποτελεί μέρος μιας ευρύτερης φωτογραφίας, μειώνεται η πιθανότητα αυτό να συμβεί σε όσες υποφωτογραφίες περιέχουν τη συγκεκριμένη ρωγμή. Άρα εν τέλει, η συγκεκριμένη ρωγμή θα μετρηθεί.

**Πίνακας 7.2.5. Παράθεση Αποτελεσμάτων 5<sup>ης</sup> σειράς μετρήσεων**





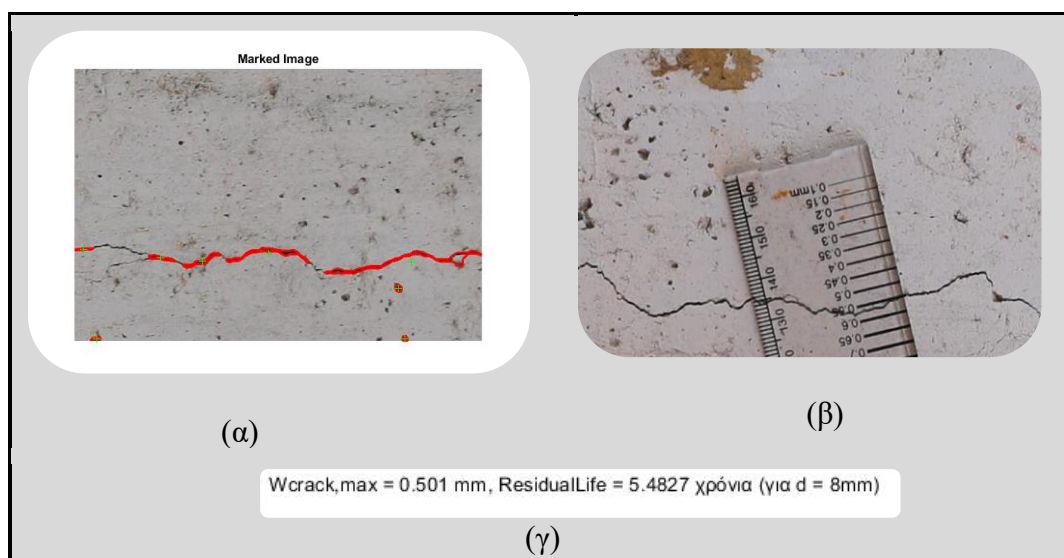
## 7.2.2 Σχολιασμός των Αποτελεσμάτων

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω αποτελέσματα υπάρχει μία απρόβλεπτη πιθανότητα να μην γίνει δυνατός αυτόματα ο εντοπισμός της ρωγμής. Αυτή την πιθανότητα μπορεί να μειώσει η χρήση νευρωνικού δικτύου για εντοπισμό αντικειμένων (Object Detection Neural Network) που στην προκειμένη είναι οι ρωγμές. Κάτι τέτοιο δεν έγινε δυνατό να εφαρμοστεί στο σχετικά στενό χρονικό πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας, καθώς δεν επιτεύχθηκε αφενός λήψη μεγάλου όγκου δείγματος, αφετέρου δεν κατέστη εφικτή η χειροκίνητη επισήμανση της θέσης της ρωγμής στο δείγμα εκπαίδευσης.

Παρ' όλ' αυτά, η ανταπόκριση του προγράμματος είναι αρκετά ικανοποιητική. Το εύρος ρωγμής υπολογίζεται με σχετικά μεγάλη ακρίβεια και ο απαραίτητος διαχωρισμός της ρωγμής από το θόρυβο γίνεται με επιτυχία. Για τη μεγαλύτερη ακρίβεια του προγράμματος, απαιτείται οι φωτογραφίες να είναι μικρών διαστάσεων καθώς επίσης να περιλαμβάνουν λίγες πληροφορίες. Για το σκοπό αυτό, χωρίστηκαν εξ αρχής οι φωτογραφίες που συλλέχθηκαν στο πεδίο, σε 100 υπό-φωτογραφίες. Στην περίπτωση που ολόκληρη η φωτογραφία υποστεί την παραπάνω διαδικασία, τα αποτελέσματα είναι αμφίβολα καθώς δεν είναι εύκολο με τα μέσα που χρησιμοποιούνται να επιλεχθούν σωστά οι περιοχές ενδιαφέροντος. Μάλιστα, τις περισσότερες φορές παρά το γεγονός ότι η ρωγμή επιτυγχάνεται να εντοπιστεί, δεν γίνεται να διαχωριστεί από το φόντο που περιλαμβάνεται στο φυσικό περιβάλλον (σκιές, άνθρωποι, πράσινο κ.α.).

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υπολογισμός του εύρους της ρωγμής δεν απαιτεί τον εντοπισμό ολόκληρου του μήκους της ρωγμής αλλά τμήματός της. Αυτό συμβαίνει διότι το εύρος ρωγμής υπολογίζεται προσεγγιστικά από το εμβαδόν και το μήκος του μεγαλύτερου άξονα. Έτσι, αν το πρόγραμμα δεν έχει καταφέρει να εντοπίσει ολόκληρη τη ρωγμή, απλά το εμβαδόν και το μήκος το οποίο λαμβάνει υπόψη είναι αναλογικώς μικρότερο.

Ενδεικτικά, η ακρίβεια του προγράμματος αξιολογείται από το παράδειγμα της εικόνας 7.2.3. Για εύρος ρωγμής που μετρήθηκε με ρωγμόμετρο ίσο με  $w_{\text{crack}} = 0.55 \text{ mm}$ , το πρόγραμμα υπολόγισε  $w_{\text{crack}}^* = 0.50 \text{ mm}$ , δηλαδή απόκλιση 10%.



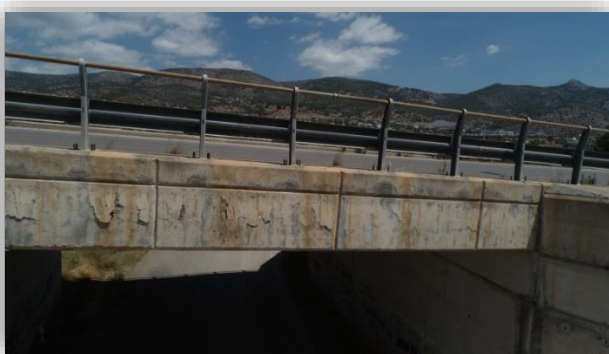
Σχήμα 7.2.3. Αποτέλεσμα Προγράμματος για Γέφυρα Μεγάρων

### 7.3 Εφαρμογή σε Γέφυρες

Ως μία άμεση εφαρμογή του υπολογιστικού προγράμματος που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 5 έγινε επίσκεψη σε δύο γέφυρες της Ολυμπίας Οδού το Μάιο του 2021 με σκοπό την αποτίμηση της κατάστασης τους λόγω διάβρωσης, με ηλεκτρονικά μέσα.

Συγκεκριμένα, η πρώτη γέφυρα βρίσκεται στο σημείο με γεωγραφικές συντεταγμένες: 38.018727, 23.435212 στην περιοχή της Νέας Περάμου, ενώ πρόκειται για οδική γέφυρα κάτω διάβασης. Η δεύτερη γέφυρα βρίσκεται στο σημείο με γεωγραφικές συντεταγμένες: 38.010682, 23.408672 στην περιοχή των Μεγάρων και πρόκειται για σιδηροδρομική γέφυρα κάτω διάβασης.

Για τη λήψη φωτογραφιών χρησιμοποιήθηκαν το Drone FC6310 και η επαγγελματική κάμερα DSLR Canon EOS 5D Mark IV με φακό 35 mm. Οι φωτογραφίες που λήφθηκαν είναι της μορφής των σχημάτων 7.3.1-7.3.2:



Σχήμα 7.3.1. Εικόνα από Drone (Γέφυρα Νέας Περάμου)



Σχήμα 7.3.2. Εικόνα από DSLR (Γέφυρα Μεγάρων)

### 7.3.1 Γέφυρα Νέας Περάμου

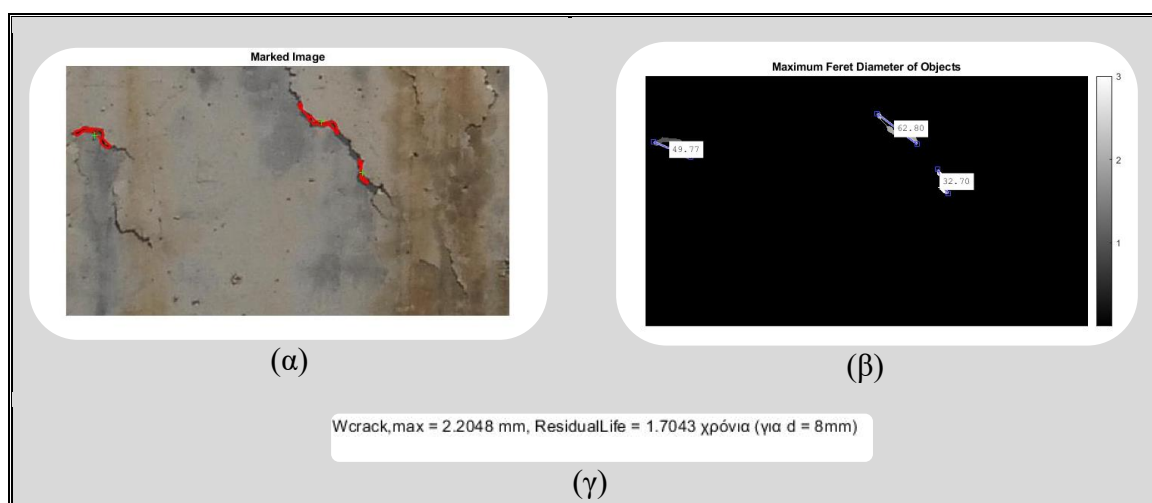
Πρόκειται για οδική γέφυρα κάτω διάβασης. Εμφανής ήταν η διάβρωση του καταστρώματος, όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα (Σχήμα 7.3.3).



Σχήμα 7.3.3. Εικόνα από Drone, Γέφυρα Νέας Περάμου

Η εφαρμογή του προγράμματος στη γέφυρα αυτή προσδιόρισε εναπομένουσα διάρκεια ζωής στα 1.70 χρόνια. Αυτό συμβαίνει γιατί εντοπίστηκε ρωγμή με εύρος ίσο με 2.2 mm με υπόθεση απόστασης λήψης εικόνας τα 3 m (από ΣμηΕΑ κατά προσέγγιση διότι δεν υπήρχε ο κατάλληλος εξοπλισμός). Λεπτομέρεια φαίνεται ενδεικτικά στο σχήμα 7.3.4.

Φυσικά, η ύπαρξη αποκόλλησης είναι αιτία επιτάχυνσης της διάβρωσης και κατ' επέκταση μείωσης της διάρκειας ζωής. Όμως στη βιβλιογραφία δεν υπάρχει κάποια σαφής συσχέτιση με αριθμητικά δεδομένα καθώς η αποκόλληση αποτελεί μία επικίνδυνη συνέπεια της προχωρημένης διάβρωσης και όταν υφίσταται, η κατασκευή χρήζει άμεσης αποκατάστασης.



Σχήμα 7.3.4. Αποτέλεσμα Προγράμματος για Γέφυρα Ν. Περάμου



### 7.3.2 Γέφυρα Μεγάρων

Πρόκειται για σιδηροδρομική γέφυρα άνω διάβασης. Το κυριότερο πρόβλημα της γέφυρας αυτής ήταν η αποκάλυψη του οπλισμού οροφής λόγω της διέλευσης υψηλών οχημάτων. Ωστόσο φάνηκε να έχει ενδείξεις διάβρωσης κυρίως στα τοιχία έδρασης.

Στις εικόνες 7.3.5 (β) και (γ), που έχουν ληφθεί με επαγγελματική κάμερα DSLR, το εύρος ρωγμής έχει μετρηθεί στο πεδίο ίσο με 1.5 mm και 0.8 mm αντίστοιχα.



(α)



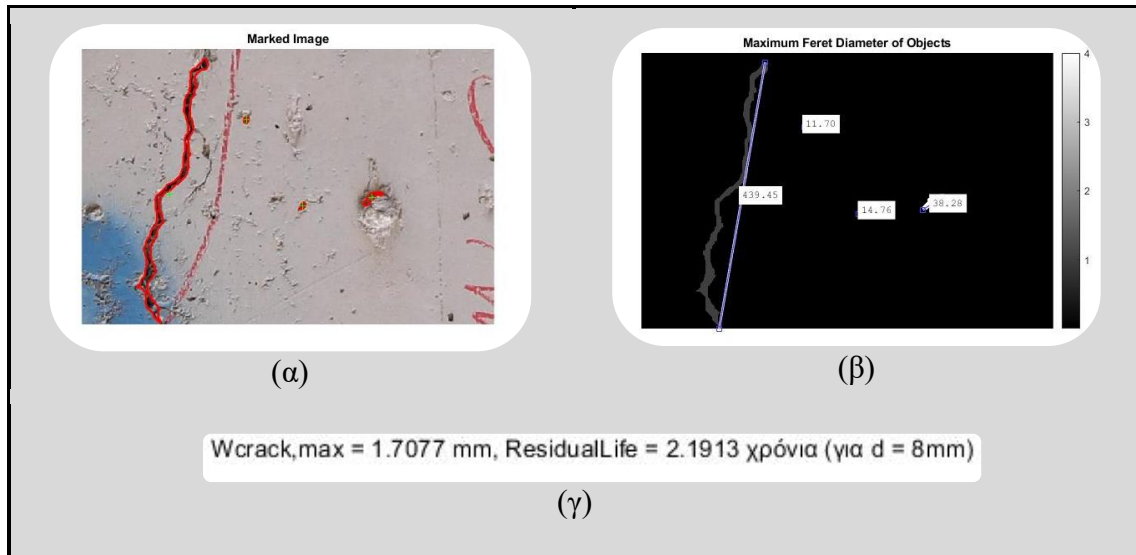
(β)



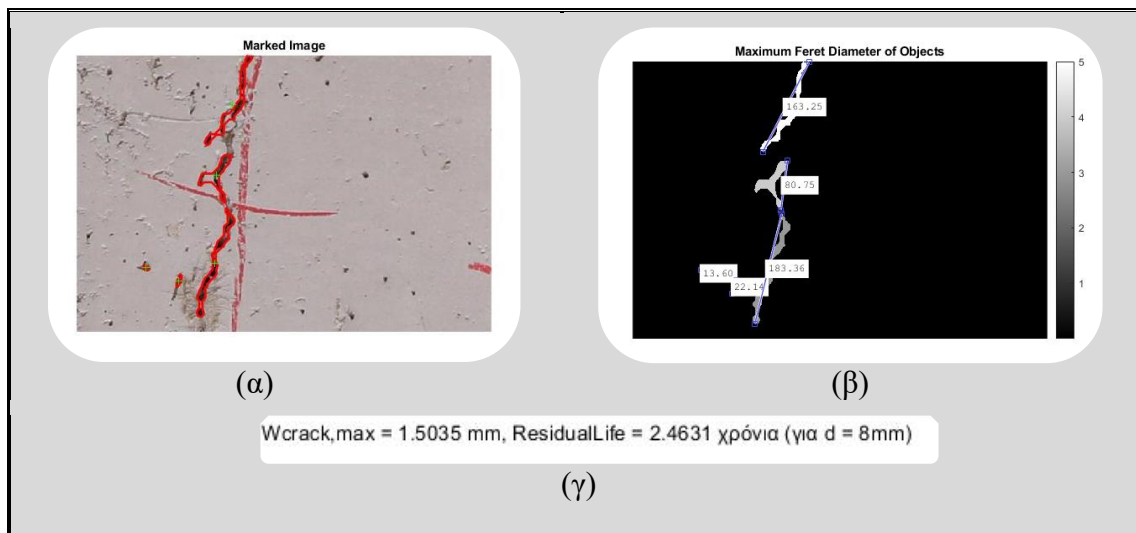
(γ)

Σχήμα 7.3.5. Η γέφυρα των Μεγάρων

Από το πρόγραμμα η εναπομένουσα διάρκεια ζωής της ως έχει οριστεί υπολογίστηκε στα 2.2 χρόνια με μέγιστο εύρος ρωγμής  $w_{crack}=1.7$  mm, ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία. Ενδεικτικά, στα σχήματα 7.3.6 και σχήμα 7.3.7 παρατίθενται λεπτομέρειες από τα βήματα επεξεργασίας δύο εικόνων από τη γέφυρα αυτή.



Σχήμα 7.3.6. Λεπτομέρειες επεξεργασίας υπο-φωτογραφιών από τη γέφυρα των Μεγάρων



Σχήμα 7.3.7. Λεπτομέρειες επεξεργασίας υπο-φωτογραφιών από τη γέφυρα των Μεγάρων

## 8 Συμπεράσματα και Προτάσεις για Περαιτέρω Έρευνα

### 8.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια ανάπτυξης και εφαρμογής αναλυτικού μοντέλου εκτίμησης της εναπομένουσας διάρκειας ζωής υποδομών από ΟΣ, αναφορικά με τη διάβρωση, με μοναδικό δεδομένο τις επιφανειακές φθορές (ρωγμές) της. Για το σκοπό αυτό, προτάθηκε μία μεθοδολογία η οποία, συνδυάζοντας τα υπάρχοντα μοντέλα, συσχετίζει το εύρος ρωγμής με την απομείωση της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα, λόγω διάβρωσης. Τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας συνοψίζονται ως παρακάτω:

- Με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία, κατέστη εφικτή η συσχέτιση του ρεύματος διάβρωσης  $I$  με το εύρος ρωγμής  $w_{crack}$  με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.
- Το νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιήθηκε, ήταν προ-εκπαιδευμένο και εφαρμόστηκε η μέθοδος της μεταφοράς μάθησης για την εκπαίδευσή του στο συγκεκριμένο ζήτημα. Είναι γεγονός ότι το πλήθος του δείγματος με το οποίο εκπαιδεύτηκε το νευρωνικό δίκτυο ήταν αρκετά μικρό με αποτέλεσμα τη μειωμένη, σε σχέση με τη βέλτιστη δυνατή, απόδοσή του.
- Η περαιτέρω επεξεργασία των εικόνων στις οποίες υπάρχει ρωγμή έδωσε τη δυνατότητα διαχωρισμού του θορύβου από τη ρωγμή και στη συνέχεια τη δυνατότητα μέτρησης του εύρους της με σχετικά μεγάλη ακρίβεια με αυτόματο τρόπο. Ωστόσο υπήρξαν και περιπτώσεις που η επεξεργασία αυτή δεν απέφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη συνολική επιθεώρηση.
- Το νευρωνικό δίκτυο, το οποίο αξιοποιήθηκε για την αυτοματοποιημένη κατηγοριοποίηση των εικόνων με βάση την ύπαρξη ρωγμής, ανταποκρίθηκε με μεγάλη απόδοση παρά το μικρό δείγμα με το οποίο εκπαιδεύτηκε. Με αυτόν τον τρόπο, κατέστη δυνατό να γίνει προσπάθεια για μέτρηση της ρωγμής μόνο σε εικόνες στις οποίες υπάρχει όντως ρωγμή χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση.
- Το συνολικό πρόγραμμα εφαρμόστηκε σε μελέτες δύο περιπτώσεων γέφυρας, στις οποίες συνολικά ανταποκρίθηκε αρκετά καλά. Μάλιστα, υπήρξε η δυνατότητα επαλήθευσης των αποτελεσμάτων με μετρήσεις που είχαν λάβει χώρα στο πεδίο με παραδοσιακούς τρόπους.
- Σε αντίθεση με τα υπάρχοντα μοντέλα, η προτεινόμενη μεθοδολογία εκτίμησης του υπολειπόμενου χρόνου ζωής γίνεται με την υπόθεση ότι η κατασκευή βρίσκεται στο στάδιο διάδοσης της διάβρωσης χωρίς να έχει χάσει σημαντικό μέρος της εφελκυστικής αντοχής του χάλυβα οπλισμού και *ως εναπομένουσα διάρκεια ζωής υπολογίστηκε το χρονικό διάστημα που απαιτείται έως ότου να μειωθεί αυτή η αντοχή μέχρι ενός συγκεκριμένου ορίου*

## 8.2 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Κατά την προσέγγιση του ζητήματος στο χρονικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας, δεν ήταν δυνατό να διερευνηθούν τα παρακάτω:

- Η συσχέτιση του ρεύματος διάβρωσης με το εύρος ρωγμής είναι ένας τρόπος να γίνει η κατηγοριοποίηση της σοβαρότητας της διάβρωσης για να ληφθούν τα αντίστοιχα μέτρα. Επιπλέον, η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιοποιεί αυτή τη συσχέτιση για την εκτίμηση της εναπομένουσας διάρκειας ζωής. Ωστόσο, τα πειραματικά δεδομένα μέσω των οποίων έγινε αυτή η συσχέτιση ήταν περιορισμένα. Γι' αυτό, χρήσιμη θα ήταν η πειραματική μέτρηση μεγάλου πλήθους δειγμάτων στο εργαστήριο ή και στο πεδίο με στόχο τη καλύτερη συσχέτιση του μετρούμενου εύρους ρωγμής με το ρεύμα διάβρωσης. Με αυτή τη μελέτη, θα είναι δυνατή η επαλήθευση των παραδοχών μέσω των οποίων γίνεται η συσχέτιση των δύο μεγεθών και έτσι η προτεινόμενη μεθοδολογία της παρούσας εργασίας για την εκτίμηση της εναπομένουσας ζωής θα καταστεί ακριβέστερη.
- Η επαλήθευση της προτεινόμενης μεθοδολογίας με ένα μεγάλο πλήθος κατασκευών είναι απαραίτητη. Συγκεκριμένα, θα μπορούσε να γίνει εφαρμογή της σε διάφορες υποδομές. ενώ στη συνέχεια, αυτές θα πρέπει να εκτιμηθούν και με άλλα τεχνολογικά μέσα και μεθόδους, όπως η μέτρηση του ηλεκτρικού δυναμικού, υπέρηχοι κ.α., για την εξαγωγή βάσιμων συγκρίσεων.
- Η προτεινόμενη μεθοδολογία εξετάζει την κατασκευή ως μία λωρίδα πλάκας με μία ράβδο οπλισμού διαμέτρου  $\varnothing 8$  και το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι αρκετά συντηρητικό. Η συνεισφορά των γειτονικών οπλισμών δεν λαμβάνεται υπόψιν, ωστόσο αναμένεται να είναι μεγάλη και να τροποποιεί τα αποτελέσματα, γεγονός το οποίο επιβάλλει την περαιτέρω διερεύνηση.
- Όσον αφορά στο νευρωνικό δίκτυο, είναι γεγονός ότι το δείγμα με το οποίο έγινε η εκπαίδευση ήταν περιορισμένο. Η δημιουργία ενός dataset μεγάλου πλήθους εικόνων (>40.000) θα αύξανε την απόδοση του δικτύου στο κομμάτι της κατηγοριοποίησης.
- Τέλος, η τεχνολογία προσφέρει τη δυνατότητα αυτοματοποίησης διαφόρων διαδικασιών, όπως της περαιτέρω επεξεργασίας για τον εντοπισμό και τη μέτρηση της ρωγμής στην κάθε εικόνα. Μία τέτοια αξιόλογη εφαρμογή με χρήση νευρωνικών δικτύων όσον αφορά τον εντοπισμό επιφανειακών φθορών και την εκτίμηση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους, είναι η ανάπτυξη ενός νευρωνικού δικτύου εντοπισμού αντικειμένων (Object Detection Neural Network). Για να γίνει αυτό απαιτείται ένα πολύ μεγάλο πλήθος εικόνων συνοδευόμενες από την ετικέτα και την αντίστοιχη θέση στην οποία εντοπίζεται η επιφανειακή φθορά. Κάτι τέτοιο είναι πολύ χρονοβόρο για να γίνει χειροκίνητα, ωστόσο ίσως γίνεται να αναπτυχθεί κάποιος αλγόριθμος ώστε να γίνει αυτόματα η διαδικασία labeling. Έτσι, θα αποφευχθεί η κοινή αντιμετώπιση όλων των εικόνων και ουσιαστικά το πρόγραμμα θα αποφασίζει αυτόματα τον τρόπο επεξεργασίας ώστε η ρωγμή να εντοπιστεί και να διαχωριστεί από το φόντο και το θόρυβο και τελικά να μετρηθεί το εύρος της με μεγαλύτερη ακρίβεια.

## Βιβλιογραφία

- Adhikari, R. S., Moselhi, O., & Bagchi, A. (2014). Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection. *Automation in Construction*, 39, 180–194. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.06.011>
- Ahmad, S. (2003). Reinforcement corrosion in concrete structures, its monitoring and service life prediction - A review. *Cement and Concrete Composites*, 25(4-5 SPEC), 459–471. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00086-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00086-0)
- Almusallam, A. A. (2001). Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars. *Construction and Building Materials*, 15(8), 361–368. [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(01\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(01)00009-5)
- Alonso, C., Andrade, C., Rodriguez, J., & Diez, J. M. (1998). Factors controlling cracking of concrete affected by reinforcement corrosion. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 31(211), 435–441. <https://doi.org/10.1007/bf02480466>
- Ashby, Michael; Cebon, David; Shercliff, H. (2012). *Υλικά: Μηχανική, Επιστήμη, Επεξεργασία και Σχεδιασμός*. Κλειδάριθμος.
- Bazant, Z. P., & Oh, B. H. (1983). Crack band theory for fracture of concrete. *Matériaux et Constructions*, 16(3), 155–177. <https://doi.org/10.1007/BF02486267>
- Broomfield, J. P. (2007). *Corrosion of Steel in Concrete 2nd Edition*.
- Chan, B., Guan, H., Jo, J., & Blumenstein, M. (2015). Towards UAV-based bridge inspection systems: A review and an application perspective. *Structural Monitoring and Maintenance*, 2(3), 283–300. <https://doi.org/10.12989/smm.2015.2.3.283>
- Chun, P. jo, Izumi, S., & Yamane, T. (2021). Automatic detection method of cracks from concrete surface imagery using two-step light gradient boosting machine. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 36(1), 61–72. <https://doi.org/10.1111/mice.12564>
- Clear Kenneth, C. (1976). Time to corrosion of reinforcing steel in concrete slabs Performance after 830 daily salt applications. *Federal Highway Administration, Washington DC, Report No.*, pp.59.
- Duque, L. (2017). UAV-Based Bridge Inspection and Computational Simulations. In *Master's Theses and Dissertations: South Dakota State University*.
- Liang, M. T., Wang, K. L., & Liang, C. H. (1999). Service life prediction of reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 29(9), 1411–1418. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00109-X](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00109-X)
- Mathworks. (2018). *Practical Deep Learning Examples with MATLAB*. 33.



- McCann, D. M., & Forde, M. C. (2001). Review of NDT methods in the assessment of concrete and masonry structures. *NDT and E International*, 34(2), 71–84. [https://doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00032-3)
- Moon, H. G., & Kim, J. H. (2011). Intelligent crack detecting algorithm on the concrete crack image using neural network. *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2011*, 1461–1467. <https://doi.org/10.22260/isarc2011/0279>
- Morinaga, S., Irino, K., Ohta, T., & Arai, H. (1994). Life prediction of existing reinforced concrete structures determined by corrosion. *Corrosion & Corrosion Protection of Steel in Concrete. Proceedings of International Conference Held at the University of Sheffield, 24-28 July 1994. Vol. 1*, 603–618.
- Mosley, Bill; Bungey, John; Hulse, R. (2016). *Μελέτη Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα*. Κλειδάριθμος. <https://doi.org/46034>
- Mukherjee, S., Condron, B., & Acton, S. T. (2015). Tubularity flow field - A technique for automatic neuron segmentation. *IEEE Transactions on Image Processing*, 24(1), 374–389. <https://doi.org/10.1109/TIP.2014.2378052>
- Otieno, M. B., Alexander, M. G., & Beushausen, H. D. (2010). Corrosion in cracked and uncracked concrete - influence of crack width, concrete quality and crack reopening. *Magazine of Concrete Research*, 62(6), 393–404. <https://doi.org/10.1680/macrc.2010.62.6.393>
- Otsu., N. (n.d.). A threshold selection method from gray level histograms. *IEEE Trans. Systems. Man. and Cybernetics*, 9., 62–66.
- Papadakis, Vagelis G.; Vayenas, Costas G.; Fardis, M. N. (1991). Physical and chemical characteristics affecting the durability of concrete. *ACI Materials Journal*, 88, 186–196.
- Pratt, W. K. (1994). Digital Image Processing. *European Journal of Engineering Education*, 19(3), 377. <https://doi.org/10.1080/03043799408928319>
- Quraishi, M., Nayak, D., Kumar, R., & Kumar, V. (2017). Corrosion of Reinforced Steel in Concrete and Its Control: An overview. *Journal of Steel Structures & Construction*, 03(01), 1–6. <https://doi.org/10.4172/2472-0437.1000124>
- Ranjith, A., Balaji Rao, K., & Manjunath, K. (2016). Evaluating the effect of corrosion on service life prediction of RC structures – A parametric study. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(2), 587–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.07.001>
- Reale, T., & O'Connor, A. (2012). A review and comparative analysis of corrosion-induced time to first crack models. *Construction and Building Materials*, 36, 475–483. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.033>

- Selvaraj, R. (2016). Estimation of residual service life of corroding concrete structures: A review. *American International Journal of Research in Science*, 16–124. <http://www.iasir.net>
- Shaikh, F. U. A. (2018). Effect of Cracking on Corrosion of Steel in Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-018-0234-y>
- Stanish, K. (1997). Effects on Bond. *Response*.
- The Concrete Centre. (n.d.). *Sustainable Concrete*. <https://www.sustainableconcrete.org.uk/>
- Torres-Acosta, A. A., Navarro-Gutierrez, S., & Terán-Guillén, J. (2007). Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 29(6), 1145–1152. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.07.018>
- Tuutti, K. (1982). *research*.
- Wenk, S. A., R. C. McMaster, P. M. (n.d.). Choosing NDT: Applications, Costs, and Benefits of Nondestructive Testing in Your Quality Assurance Program, Columbus. *Choosing NDT: Applications, Costs, and Benefits of Nondestructive Testing in Your Quality Assurance Program, Columbus, OH: American Society for Nondestructive Testing, 1987*.
- Weyers Richard E. (1998). Service life model for concrete structures in chloride laden environments. *ACI Materials Journal*, 95(No. 4), 445–453.
- Zdenek, P., & Bazant, M. (1979). Journal of the Structural Division Physical Model for Steel Corrosion' " I. *Journal of the Structural Division*, 105(June).
- Zhu, W., & François, R. (2015). Structural performance of RC beams in relation with the corroded period in chloride environment. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(6), 1757–1769. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0270-2>
- Γκίβαλου, Λ., & Μιτζήθρα, Μ. Ε. *Διάβρωση & Προστασία Οπλισμένου Σκυροδέματος*. 1–22.
- Κουρνέτας, Δ. (2010). *Διάβρωση Οπλισμένου Σκυροδέματος - Μέτρα Επέμβασης*. 160 Φοιτητικό Συνέδριο Επισκευές Κατασκευών, 11.
- Ματίκας, Θ., & Αγγελής, Δ. (2015). *Μη Καταστροφικοί Έλεγχοι* (pp. 11–18). ΣΕΑΒ, 2015. [www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr)
- Παπαδάτος, Ν., Δαμιανού, Χ., & Χαραλαμπίδης, Χ. (2010). *Εισαγωγή στις πιθανότητες και τη στατιστική*. ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ.
- Τριανταφύλλου, Α. (2018). Σκυρόδεμα. In *Δομικά Υλικά* (pp. 59–262). Gotsis.
- Τσίκας, Π., & Παπασπυριδάκος, Χ. (2006). *Ανθεκτικότητα Οπλισμένου Σκυροδέματος Σε Διάρκεια*. 13.



## 9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Στο παρόν παράρτημα, παρατίθεται ο υπολογιστικός κώδικας που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον Matlab. Αρχικά, δημιουργείται η συνάρτηση: `Split_Data_images.m` με όρισμα το path του φακέλου στον οποίο βρίσκονται οι υπό εξέταση εικόνες. Αυτή η συνάρτηση, δημιουργεί τον υποφάκελο «SubImages» και τοποθετεί σε αυτόν τις υποεικόνες που έχουν προκύψει από το χωρισμό των αρχικών εικόνων σε 10×10.

### *Function Split Images*

```
function y = Split_Data_images(FolderPath)
fprintf('Beginning to run %s.m ...\n', mfilename);
% Read in image
cd(FolderPath) % Go to Folder Path of the images.
mkdir(FolderPath,'SubImages') % Create the folder 'SubImages'.
imgNames = dir('*.jpg'); % Get the Images' Names.
N = length(imgNames) ;
for i = 1:N % For every image in the Folder execute the split function.
    img = imgNames(i).name;
    [filepath,name,ext] = fileparts(imgNames(i).name);
    Image = imread(img); %Get the image.
    [rows, columns, numColorChannels] = size(Image);
    % impixelinfo
    numBandsVertically = 10; % Number of bands vertically.
    numBandsHorizontally = 10; % Number of bands horizontally.
    topRows = round(linspace(1, rows+1, numBandsVertically + 1));
    leftColumns = round(linspace(1, columns+1, numBandsHorizontally + 1));
    % Draw lines over image
    for k = 1 : length(topRows)
        yline(topRows(k), 'color', 'y', 'Linewidth', 2);
    end
    for k = 1 : length(leftColumns)
        xline(leftColumns(k), 'color', 'y', 'Linewidth', 2);
    end
    % Extract into subimages
    for row = 1 : length(topRows) - 1
        row1 = topRows(row);
        row2 = topRows(row + 1) - 1;
        for col = 1 : length(leftColumns) - 1
            col1 = leftColumns(col);
            col2 = leftColumns(col + 1) - 1;
            subImage = Image(row1 : row2, col1 : col2, :); %Define the subimage.
            baseFileName = sprintf('%s_%dx%d.jpg', name,row,col);
            fullFileName = fullfile(FolderPath,'SubImages', baseFileName);
            imwrite(subImage, fullFileName); % write the subimage in the new subfolder.
        end
    end
    fprintf('Done running %s.m.\n', mfilename);
end
y = fprintf('\n Total number of images: %d \n',N);
end
```

Στη συνέχεια, χαρακτηρίζονται χειροκίνητα περίπου 10,000 υποεικόνες ως εξής: 223 ως «crack», 382 ως «clear», 8,647 ως «spalling» και 567 ως «not appropriate surface». Οι πηγές αυτών των εικόνων είναι από το πεδίο των δύο γεφυρών που εξετάστηκαν στο πλαίσιο της εφαρμογής. Ειδικά για την κατηγορία της αποκόλλησης (spalling), λόγω της απουσίας πλήθους εικόνων που να το περιλαμβάνουν διακριτά, χρησιμοποιήθηκε και dataset από το διαδίκτυο. Έτσι δικαιολογείται το τεράστιο πλήθος εικόνων με spalling σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες. Ωστόσο, το dataset για την εκπαίδευση πρέπει να περιέχει ίδιο πλήθος εικόνων κάθε κατηγορίας. Οπότε διαλέγεται ο αριθμός 200 προσπαθώντας να συμπεριληφθεί στο Train Dataset το 70% του πλήθους της κάθε ετικέτας και να μείνει το 30% για την διεξαγωγή εφαρμογής με το Validation Dataset. Στο παρακάτω script, με όνομα **Create\_Data\_Store.m** γίνεται η διαδικασία που περιγράφεται.

### *Define Data Store*

```
currentFolder = 'D:\Διπλωματική Εργασία\DIPLOMA_THESIS'; % Go to the folder with the Dataset for
training.
CracksDatasetPath = fullfile(currentFolder,'DATA',{'crack';'clear';'spalling';'not appropriate
surface'});
imds = imageDatastore(CracksDatasetPath, 'IncludeSubfolders',true,'LabelSource','foldernames'); %
Create the Datastore.
labelCount = countEachLabel(imds);
img = readimage(imds,2);
size(img);
img = readimage(imds,2);
numTrainFiles = 200; % Number of training images.
[imdsTrain,imdsValidation] = splitEachLabel(imds,numTrainFiles,'randomize'); % Split the datastore
to train and validation dataset.
```

Επόμενο βήμα αποτελεί η ανάκληση του προ-εκπαιδευμένου νευρωνικού δικτύου της Google, το GoogLeNet και η εφαρμογή της μεταφοράς μάθησης επεξεργάζοντας τα layer εξόδου του. Στο script που ακολουθεί με όνομα **CNN.m**, παρατίθεται η διαδικασία αυτή, καθώς και η εκπαίδευση του δικτύου με το Datastore που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο script.

### *Define the CNN*

```
net = googlenet;
net.Layers(1);
inputSize = net.Layers(1).InputSize;
if isa(net,'SeriesNetwork')
    lgraph = layerGraph(net.Layers);
else
    lgraph = layerGraph(net);
end
[learnableLayer,classLayer] = findLayersToReplace(lgraph);
[learnableLayer,classLayer] ;

numClasses = numel(categories(imdsTrain.Labels));
if isa(learnableLayer,'nnet.cnn.layer.FullyConnectedLayer')
    newLearnableLayer = fullyConnectedLayer(numClasses, ...
        'Name','new_fc', ...
        'WeightLearnRateFactor',10, ...
        'BiasLearnRateFactor',10);
```

```

elseif isa(learnableLayer,'nnet.cnn.Layer.Convolution2DLayer')
    newLearnableLayer = convolution2dLayer(1,numClasses, ...
        'Name','new_conv', ...
        'WeightLearnRateFactor',10, ...
        'BiasLearnRateFactor',10);
end

lgraph = replaceLayer(lgraph,learnableLayer.Name,newLearnableLayer);

newClassLayer = classificationLayer('Name','new_classoutput');
lgraph = replaceLayer(lgraph,classLayer.Name,newClassLayer);

figure('Units','normalized','Position',[0.3 0.3 0.4 0.4]);
plot(lgraph)
ylim([0,10])

layers = lgraph.Layers;
connections = lgraph.Connections;

layers(1:10) = freezeWeights(layers(1:10));
lgraph = createLgraphUsingConnections(layers,connections);

pixelRange = [-30 30];
scaleRange = [0.9 1.1];
imageAugmenter = imageDataAugmenter( ...
    'RandXReflection',true, ...
    'RandXTranslation',pixelRange, ...
    'RandYTranslation',pixelRange, ...
    'RandXScale',scaleRange, ...
    'RandYScale',scaleRange);
augimdsTrain = augmentedImageDatastore(inputSize(1:2),imdsTrain, ...
    'DataAugmentation',imageAugmenter);

augimdsValidation = augmentedImageDatastore(inputSize(1:2),imdsValidation);

miniBatchSize = 10;
valFrequency = floor(numel(augimdsTrain.Files)/miniBatchSize);
options = trainingOptions('sgdm', ...
    'MiniBatchSize',miniBatchSize, ...
    'MaxEpochs',6, ...
    'InitialLearnRate',3e-4, ...
    'Shuffle','every-epoch', ...
    'ValidationData',augimdsValidation, ...
    'ValidationFrequency',valFrequency, ...
    'Verbose',false, ...
    'Plots','training-progress');

```

Για τη διαδικασία αυτή, χρησιμοποιούνται τρεις συναρτήσεις, η [findLayersToReplace.m](#), η [freezeWeights.m](#) και η [createLgraphUsingConnections.m](#) που δεν είναι built-in συναρτήσεις, αλλά έχουν δημιουργηθεί και βρίσκονται στο repository του Mathworks για την εφαρμογή του Transfer Learning. Οι συναρτήσεις αυτές επισυνάπτονται στο τέλος του παραρτήματος.

## Network Training with the defined Datastore

```
net = trainNetwork(augimdsTrain, lgraph, options);  
Googlenet_Transfered = net;  
save Googlenet_Transfered
```

Κατά την εκπαίδευση, στο Matlab εμφανίζεται το παράθυρο Εικόνα 1-Π. που δείχνει αναλυτικά την πρόοδο της. Τέλος, αποθηκεύεται το εκ νέου εκπαιδευμένο δίκτυο με το όνομα **Googlenet\_Transfered.mat** ώστε να μπορεί να φορτωθεί χωρίς τη διαδικασία της εκπαίδευσης.



Εικόνα 1-Π. Πρόοδος Εκπαίδευσης Νευρωνικού Δικτύου

Έπειτα, στο script που ακολουθεί με όνομα **Script\_Post\_CNN\_Validation.m**, φορτώνεται στη γραμμή εργασιών του Matlab ως μεταβλητή, το δίκτυο **Googlenet\_Transfered.mat**. Στη συνέχεια, ορίζεται η θέση του Dataset το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για το Validation. Συγκεκριμένα, είναι το υπόλοιπο 30% που «περίσσεψε» κατά τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Γι' αυτό το 30%, σημειώνεται ότι οι ετικέτες των εικόνων είναι επίσης χειροκίνητα προσημειωμένες και η ποιότητα και η λογική των εικόνων που το αποτελούν, είναι όμοια με το Dataset που έγινε η εκπαίδευση. Η διαδικασία αυτή γίνεται με σκοπό τον υπολογισμό της απόδοσης του προγράμματος σε εικόνες παρεμφερείς με αυτές που εκπαιδεύτηκε. Η απόδοση ισούται με το  $0,9863 = 98,63\%$ .

## Classify the Validation Dataset with the CNN

```
load('Googlenet_Transfered.mat','net') % Load the CNN  
TestDatasetPath = fullfile('D:\Έγγραφα\Διπλωματική  
Εργασία\DIPLOMA_THESIS\DATA',{'crack';'clear';'spalling';'not appropriate surface'}); % Define the  
path of the Validation Dataset.  
TestImds = imageDatastore(TestDatasetPath, 'IncludeSubfolders',true,'LabelSource','foldernames');  
% Define the labeled Datastore.
```

```

outputSize=[224 224 3]; % Define the size of the images that the CNN is trained for.
auimds = augmentedImageDatastore(outputSize,TestImds); % Resize the Validation Datastore according
to the input size.
[XPred,scores] = classify(net,auimds); % Classify the Datastore with the trained CNN.
Xva1=TestImds.Labels; % Find the true label of every image.
accuracyVal = sum(XPred == Xva1)/numel(Xva1) % Compare with the predicted label and find the
accuracy.

```

accuracyVal =

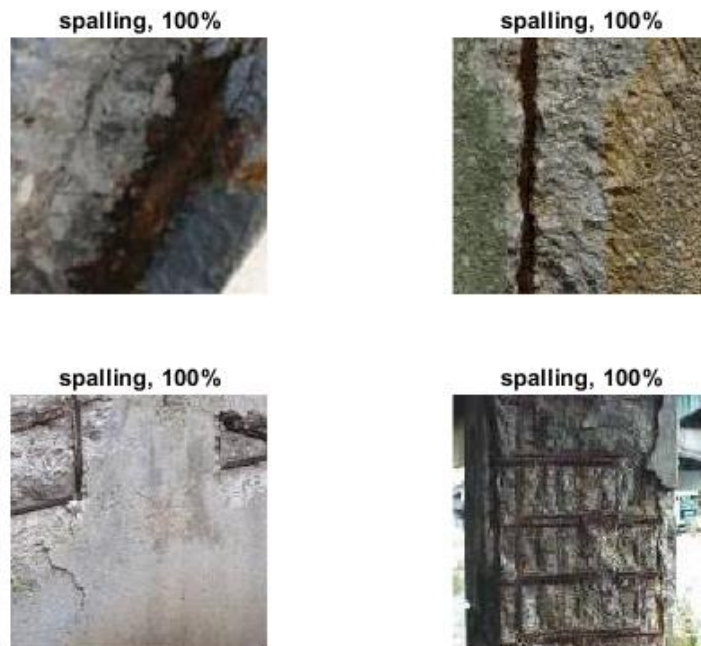
0.9863

### *Visualize the outcome*

```

idx = randperm(numel(TestImds.Files),4);
figure
for i = 1:4
    subplot(2,2,i)
    I = readimage(TestImds,idx(i));
    imshow(I)
    label = XPred(idx(i));
    title(string(label) + ", " + num2str(100*max(scores(idx(i),:)),3) + "%");
end

```



**Εικόνα 2-Π. Outcome 1**

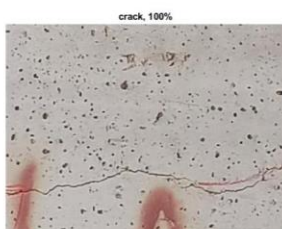




**Εικόνα 3-Π. Outcome 2**



**Εικόνα 4-Π. Outcome 3**



**Εικόνα 5-Π. Outcome 4**

Στα σχήματα (Εικόνα 2-Π-Εικόνα 5-Π) φαίνεται το αποτέλεσμα της κατηγοριοποίησης του Validation Dataset. Το score το οποίο αναγράφεται, είναι η πιθανότητα να είναι σωστή η κατηγορία στην οποία έχει «μπει» η εικόνα σύμφωνα με το πρόγραμμα.

*[Published with MATLAB® R2020b](#)*

...για τη συνέχεια του κώδικα μπορείτε να επικοινωνείτε με τη συγγραφέα [katerine.papadatou@gmail.com](mailto:katerine.papadatou@gmail.com) και τον επιβλέποντα [badstrat@mail.ntua.gr](mailto:badstrat@mail.ntua.gr).