

ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΩΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗΣ ΒΛΑΒΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

ΤΣΙΜΠΟΥΚΑΚΗ ΓΕΩΡΓΙΑ

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία, γίνεται μια παρουσίαση των περισσότερων και συνηθέστερων δεικτών βλάβης που έχουν προταθεί διεθνώς ως μέθοδοι αποτίμησης βλαβών σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής, επιλέχθηκε οι δείκτες βλάβης να ταξινομηθούν ανάλογα με τα στοιχεία στα οποία βασίζονται: τις τελικές παραμορφώσεις, την απορροφούμενη υστερητική ενέργεια, τον αριθμό των κύκλων φόρτισης, την ιδιοπερίοδο της κατασκευής, την εμπειρία του παρατηρητή σε θέματα βλαβών, το κόστος επισκευής ως προς το κόστος αντικατάστασης/ανακατασκευής. Γίνεται αναφορά στον ορισμό του κάθε δείκτη, στη φιλοσοφία βάσει της οποίας αυτός αναπτύχθηκε στην τελική του μορφή, στα στοιχεία που απαιτούνται για τον υπολογισμό του, στο πεδίο εφαρμογής του, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις παρουσιάζεται και η ταξινόμηση των βλαβών που προτείνεται από κάθε ερευνητή με βάση το δικό του δείκτη βλάβης.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δείκτες βλάβης προέκυψαν από την ανάγκη να εκτιμηθεί ποσοτικά ο βαθμός βλάβης ενός στοιχείου ή και μιας κατασκευής στο σύνολό της, και να εκφραστεί όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά η υφιστάμενη κατάσταση τους από την άποψη της υποβάθμισης της συνολικής αντοχής τους και της δυσκαμψίας τους, έτσι ώστε να είναι δυνατή η ταξινόμηση και η αντικειμενική σύγκριση στοιχείων ή κατασκευών που έχουν υποστεί οποιασδήποτε μορφής βλάβη. Πέρα, όμως από την ευρύτατη χρήση τους στο πεδίο του μετασεισμικού ελέγχου, του ανασχεδιασμού και των επεμβάσεων σε ήδη βλαμμένες κατασκευές, αποδείχθηκαν ιδιαίτερα χρήσιμοι στον αντισεισμικό σχεδιασμό νέων κατασκευών. Συνέπεια αυτού ήταν να προταθούν κατά καιρούς διάφορες μορφές δεικτών βλάβης, οι συνηθέστερες από τις οποίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Οι δείκτες βλάβης που έχουν προταθεί θα μπορούσαν πρακτικά να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς που λαμβάνουν υπόψη τις τελικές παραμορφώσεις και βασίζονται στη δυσκαμψία και τις μέγιστες τιμές παραμορφώσεων, και σε αυτούς που λαμβάνουν υπόψη τη βλάβη που προκαλείται από ανακυκλιζόμενες φορτίσεις βασιζόμενοι στην απορροφούμενη υστερητική ενέργεια, στον αριθμό των κύκλων φόρτισης κτλ. Παρ' όλα αυτά, στη παγκόσμια βιβλιογραφία απαντώνται πολλές μορφές δεικτών βλάβης που περιλαμβάνουν συνδυασμό των δύο παραπάνω στοιχείων, καθώς και δείκτες βλάβης που βασίζονται σε άλλες παραμέτρους όπως η ιδιοπερίοδος της κατασκευής, η οπτική εκτίμηση των βλαβών σε συνδυασμό με τη βαρύτητα της κάθε βλάβης, το κόστος επισκευής ως προς το κόστος αντικατάστασης/ανακατασκευής.

Ένας αρχικός ορισμός του δείκτη βλάβης ενός στοιχείου είναι ο παρακάτω [4]:

$$D = J / J_c$$

Όπου: J = μια ποσότητα απόκρισης (response quantity)

J_c = η κρίσιμη ποσότητα απόσβεσης (critical value of J)

και θα είναι : $D = 0 \rightarrow$ αβλαβές

$D = 1 \rightarrow$ αστοχία

Πάνω σε αυτό τον στοιχειώδη ορισμό βασίστηκαν πολλοί ερευνητές για να προτείνουν τους δικούς τους δείκτες βλάβης, και μάλιστα μερικοί από αυτούς τους δείκτες δύνανται να εφαρμοστούν και στο σύνολο της κατασκευής.

1. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΙΣ ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

1.1 Δείκτης βλάβης κατά Lybas και Sozen (1977) [5]

Οι Lybas και Sozen πρότειναν ένα δείκτη που εξαρτάται από τη δυσκαμψία του στοιχείου, βασιζόμενοι στο ότι η μείωση της δυσκαμψίας είναι ένα φαινόμενο χαρακτηριστικό της βλάβης:

$$D_r = k_0 / k_r$$

Όπου: k_0 = η αρχική δυσκαμψία του στοιχείου

k_r = η δυσκαμψία που αντιστοιχεί στη μέγιστη μετατόπιση

Για το δείκτη αυτό ισχύει πάντα $D_r > 1$ και μάλιστα όσο πιο εκτεταμένη είναι η βλάβη τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του δείκτη.

Σε περίπτωση ανακυκλιζόμενης φόρτισης, η δυσκαμψία του στοιχείου μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση

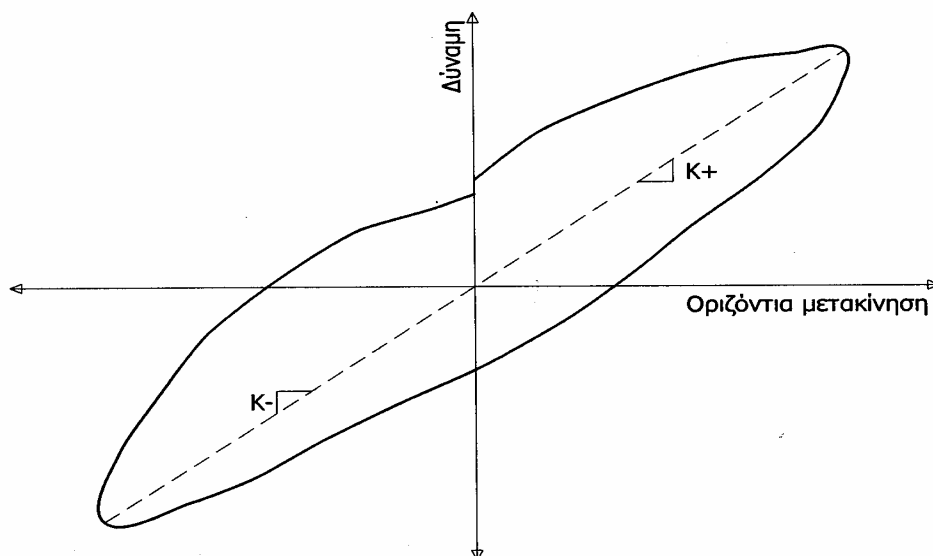
$$k = (k_+ + k_-) / 2$$

Όπου: k = η μέση δυσκαμψία του στοιχείου στον κύκλο που εξετάζεται

k_+, k_- = η μέση δυσκαμψία στη θετική και στην αρνητική φορά φόρτισης

Οι δυσκαμψίες αυτές υπολογίζονται διαιρώντας τη μέγιστη δύναμη στην εξεταζόμενη φορά του κύκλου με την αντίστοιχη μετακίνηση.

Σε περίπτωση μονοτονικής φόρτισης, οι παραπάνω δυσκαμψίες υπολογίζονται είτε απευθείας από τα δεδομένα για μονοτονική φόρτιση, είτε με κάποια κατάλληλη θεώρηση από τα δεδομένα της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, όπως με χρήση της περιβάλλουσας των υστερητικών βρόχων και λήψη τιμών μέχρι πτώσης του φορτίου σε συγκεκριμένο ποσοστό του μέγιστου. Αυτό ισχύει γενικότερα και βρίσκει εφαρμογή σε όλους τους δείκτες βλάβης που θα αναφερθούν παρακάτω, για αυτό και δεν θα επαναλαμβάνεται.



σχ. 1 Ορισμός δυσκαμψίας στοιχείου σε κάθε κύκλο φόρτισης [2]

Ο συγκεκριμένος δείκτης βλάβης μπορεί να χρησιμοποιηθεί άνετα για την ανάλυση πειραματικών αποτελεσμάτων. Είναι, όμως, δυνατό να φανεί χρήσιμος και στο μηχανικό της πράξης: ο λόγος της αρχικής δυσκαμψίας ενός στοιχείου προς την δυσκαμψία που αυτό έχει τη στιγμή της εξέτασης μπορεί να αποτελέσει ένα μέτρο για την ποσοτικοποίηση και την ταξινόμηση των βλαβών που έχουν υποστεί τα στοιχεία μιας κατασκευής.

1.2 Δείκτης βλάβης κατά Kunath και Jenne (1994) [5]

Οι Kunath και Jenne προτείνουν την ποσοτικοποιημένη μορφή του δείκτη βλάβης των Lybas και Sozen:

$$D_r' = 1 - (k_r / k_0)$$

Με αυτό τον τρόπο, ο δείκτης είναι $D_r' \leq 1$ (όπως ισχύει και για τον αρχικό ορισμό ενός δείκτη βλάβης), γεγονός που επιτρέπει τη σύγκρισή του με άλλους δείκτες βλάβης και την ρεαλιστικότερη απόδοση της σημασίας του. Όπως για όλους τους δείκτες βλάβης, έτσι και εδώ:

$$\begin{aligned} D_r' = 0 &\rightarrow \text{αβλαβές στοιχείο} \\ D_r' = 1 &\rightarrow \text{στοιχείο σε αστοχία} \end{aligned}$$

Τα k_0 , k_r ορίζονται όπως και παραπάνω

Κατ' αναλογία με τον δείκτη των Lybas και Sozen, ο δείκτης των Kunath και Jenne είναι εξίσου εύχρηστος τόσο για τους ερευνητές όσο και για τους μηχανικούς της πράξης. Μάλιστα, η μορφή του και το πεδίο των τιμών που μπορεί να πάρει τον καθιστούν ακόμη πιο δημοφιλή, δεδομένου ότι με αυτόν τον δείκτη μπορεί να καθοριστεί με σαφήνεια το αν στοιχείο έχει αστοχήσει ή όχι, το περιθώριο που έχει μέχρι την αστοχία, αλλά και ο χρόνος της αστοχίας.

1.3 Κατά EC8 – Part 1.4 (1995) [1] [12] [13]

Σύμφωνα με τον EC8 [1], η αποτίμηση των βλαβών ενός στοιχείου ή μιας κατασκευής γίνεται με χρήση δεικτών βλάβης που βασίζονται στην αντοχή. Αναλυτικότερα, ορίζεται ο συντελεστής:

$$r_R = R_{res} / R_0$$

όπου: R_{res} = η απομένουσα αντοχή του στοιχείου
 R_0 = η αντοχή του στοιχείου χωρίς βλάβες

Ο συντελεστής αυτός αποτελεί ένα μέτρο της εναπομένουσας αντοχής. Για την απλοποίηση της διαδικασίας, στον EC8-Part 1.4 παρατίθεται πίνακας με μια εκτίμηση των τιμών του συντελεστή r_R για κατακόρυφα στοιχεία (υποστυλώματα και τοιχώματα) ανάλογα με την κατάσταση της κατασκευής και το βαθμό βλάβης του στοιχείου.

Κατάσταση κτιρίου	Βαθμός βλάβης			
	A	B	C	D
Καλή	0.95	0.75	0.45	0.15
Κακή	0.85	0.65	0.35	0.00

Πίν. 1 Τιμές του συντελεστή r_R για κατακόρυφα στοιχεία (υποστυλώματα και τοιχώματα) ανάλογα με την κατάσταση της κατασκευής και το βαθμό βλάβης του στοιχείου.[1]

Σημειώνεται πως ο EC8 επιτρέπει τη χρήση του παραπάνω πίνακα και για δοκούς. Πληροφοριακά αναφέρεται πως στον EC8-Part 1.4 προτείνεται και ένα μέτρο της εναπομένουσας δυσκαμψίας:

$$r_k = K_{res} / K_o$$

όπου: K_{res} = η απομένουσα δυσκαμψία του στοιχείου

K_o = η δυσκαμψία του στοιχείου χωρίς βλάβες

Για απλοποίηση των υπολογισμών, ο EC8 προτείνει για το μέτρο δυσκαμψίας να χρησιμοποιείται η προσέγγιση:

$$r_k = 0.8 r_R$$

Για μια ποιοτική εκτίμηση του βαθμού βλάβης του συνόλου μιας κατασκευής, ο EC8-Part 1.4 προτείνει ένα γενικό δείκτη ο οποίος λαμβάνει υπόψη την απομένουσα αντοχή των κατακόρυφων φερόντων στοιχείων του φορέα. Ειδικότερα:

$$r_g = \frac{\sum(V_{R_o,i} \cdot r_{R,i})}{\sum V_{R_o,i}}$$

όπου: i = ο δείκτης που προσδιορίζει το κατακόρυφο φέρον στοιχείο του φορέα
 r_R = το μέτρο της απομένουσας αντοχής του στοιχείου, όπως ορίστηκε παραπάνω.

V_{R_o} = η τέμνουσα σχεδιασμού που αναλαμβάνεται από το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος (ΥΠΕΧΩΔΕ, 1995)[13] αυτή ισούται με την V_{cd} . Η αντικατάσταση του V_{R_o} με το V_{Rd3} ($=V_{wd} + V_{cd}$) ίσως οδηγούσε σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα, όμως ο προσδιορισμός του V_{cd} είναι πιο ταχύς και με λιγότερες αβεβαιότητες, αφού δεν απαιτείται η εκτίμηση του υφιστάμενου οπλισμού διάτμησης, για αυτό και προτιμάται.

Η τελική αξιολόγηση της φέρουσας ικανότητας της κατασκευής σε συνδυασμό με τον καθορισμό προτεραιοτήτων για πιθανή επέμβαση προκύπτει με χρήση του τροποποιημένου γενικού δείκτη βλάβης r_f , ο οποίος προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$r_f = r_g K_R / \gamma_1$$

όπου: r_f = ο γενικός δείκτης που λαμβάνει υπόψη την απομένουσα αντοχή των κατακόρυφων φερόντων στοιχείων του φορέα, όπως ορίστηκε παραπάνω

K_R = ο συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την κανονικότητα του κτιρίου.
 Ειδικότερα:

- $K_R = 1.0$ για κανονικά κτίρια
- $K_R = 0.8$ για μη κανονικά κτίρια

γ_I = ο συντελεστής σπουδαιότητας του κτιρίου όπως ορίζεται στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Ο.Α.Σ.Π. 1999)[13]. Ειδικότερα:

Κατηγορία Σπουδαιότητας		γ_I
Σ1	Κτίρια μικρής σπουδαιότητας ως προς την ασφάλεια του κοινού, π.χ. αγροτικά οικήματα, υπόστεγα, στάβλοι κλπ.	0.85
Σ2	Συνήθη κτίρια κατοικιών και γραφείων, βιομηχανικά κτίρια, ξενοδοχεία κλπ.	1.00
Σ3	Εκπαιδευτικά κτίρια, κτίρια δημόσιων συναθροίσεων, αίθουσες αεροδρομίων και γενικώς κτίρια στα οποία ευρίσκονται πολλοί άνθρωποι κατά μεγάλο μέρος του 24/ώρου.	1.15
Σ4	Κτίρια τα οποία στεγάζουν εγκαταστάσεις πολύ μεγάλης οικονομικής σημασίας (π.χ. κτίρια που στεγάζουν υπολογιστικά κέντρα, ειδικές βιομηχανίες) κλπ.	
	Κτίρια των οποίων η λειτουργία, τόσο κατά την διάρκεια του σεισμού, όσο και μετά τους σεισμούς, είναι ζωτικής σημασίας, όπως κτίρια τηλεπικοινωνίας, παραγωγής ενέργειας, νοσοκομεία, πυροσβεστικοί σταθμοί, κτίρια δημόσιων επιτελικών υπηρεσιών.	1.30
	Κτίρια που στεγάζουν έργα μοναδικής καλλιτεχνικής αξίας (π.χ. μουσεία κλπ.).	

Πιν. 2 Συντελεστής σπουδαιότητας (Ε.Α.Κ. 1999) [13]

Σύμφωνα με τον EC8-Part 1.4:

για $r_f > 0.8 \rightarrow$ η αντοχή του κτιρίου θεωρείται επαρκής
 για $0.5 < r_f < 0.8 \rightarrow$ η αντοχή του κτιρίου θεωρείται μετρίως ανεπαρκής
 για $r_f < 0.5 \rightarrow$ θεωρείται ότι το κτίριο έχει σοβαρή ανεπάρκεια αντοχής

Η εκτίμηση της εναπομένουσας φέρουσας ικανότητας (άρα και ο υπολογισμός του αντίστοιχου δείκτη βλάβης) μιας κατασκευής που έχει υποστεί βλάβες θα μπορούσε να γίνει πιο αναλυτικά και με περισσότερη ακρίβεια, λόγω όμως της πολυπλοκότητας που τη χαρακτηρίζει ο EC8 προτείνει την παραπάνω απλουστευμένη διαδικασία η οποία καταλήγει γρήγορα σε αποτελέσματα που προσεγγίζουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα.

Σημειώνεται πως η παραπάνω διαδικασία προτείνεται και από τον Ο.Α.Σ.Π. στο εγχειρίδιο «Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτίρια» (2000) [12].

1.4 Δείκτης βλάβης κατά Cosenza, Manfrede και Ramasco (1993) [5]

Οι Cosenza, Manfrede και Ramasco προτείνουν ένα δείκτη που βασίζεται στην πλαστιμότητα του υπό εξέταση στοιχείου. Ως γνωστόν, η πλαστιμότητα μ ορίζεται ως εξής:

$$\mu = \delta_{\max} / \delta_u$$

όπου: δ_{\max} = η μέγιστη μετατόπιση (σε ένα κύκλο φόρτισης ή σε μονοτονική φόρτιση)
 δ_u = η μετατόπιση τη στιγμή της διαρροής (σε ένα κύκλο φόρτισης ή σε μονοτονική φόρτιση)

Ο προτεινόμενος δείκτης βλάβης έχει την παρακάτω μορφή:

$$D = \frac{\mu - 1}{\mu_u - 1}$$

όπου: μ = η πλαστιμότητα του στοιχείου σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (μία τιμή για κάθε κύκλο)

μ_u = η μέγιστη πλαστιμότητα του στοιχείου σε μονοτονική φόρτιση

Όσον αφορά την ταξινόμηση των βλαβών με βάση τον παραπάνω δείκτη, αυτή γίνεται θεωρώντας ότι $D = 0$ όταν η μετατόπιση του στοιχείου δεν έχει φτάσει στη μετατόπιση της διαρροής.

1.5 Δείκτης πλαστιμότητας γωνιών στροφής κατά Park και Ang (1985), κατά Παναγιωτάκος και Φαρδής (2001) [3] [6] [7]

Πρόκειται για ένα δείκτη που υπολογίζεται για ένα μέλος σε περιπτώσεις μονοτονικής φόρτισης, σε μία ακραία διατομή. Ορίζεται ως:

$$\mu_\theta = \frac{\theta_{\max}}{\theta_y}$$

όπου: θ_{\max} = η μέγιστη γωνία στροφής της εφαπτομένης στον άξονα του μέλους ως προς τη χορδή που συνδέει το εν λόγω άκρο με το σημείο καμπής του μέλους (εκεί όπου $M=0$)

θ_y = η τιμή της παραπάνω γωνίας στη διαρροή της ακραίας διατομής

Η διαθέσιμη τιμή του παραπάνω δείκτη δίνεται για $\theta_{\max} = \theta_u$, δηλαδή για τιμή της παραπάνω γωνίας στην αστοχία της ακραίας διατομής:

$$\mu_{\theta,u} = \frac{\theta_u}{\theta_y}$$

Η εκτίμηση των γωνιών στροφής χορδής βασίζεται στο ότι μη τοιχοπληρωμένες κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα έχουν ενεργή ιδιοπερίοδο στην περιοχή σταθερής ψευδοταχύτητας του φάσματος απόκρισης, όπου ισχύει περίπου ο κανόνας των ίσων μετατοπίσεων μεταξύ ελαστικών και ανελαστικών συστημάτων, έτσι όπως αυτός προτάθηκε από τους Panagiotakos & Fardis (1999)[6]. Συνεπώς, οι στροφές χορδής των μελών μπορούν να υπολογιστούν:

- με βάση το ελαστικό φάσμα απόκρισης για απόσβεση 5%
- μέσω ισοδύναμης στατικής ανάλυσης με ανεστραμμένη τριγωνική κατανομή οριζοντίων δυνάμεων
- μέσω φασματικής ιδιομορφικής ανάλυσης (δυναμική)

- με μη γραμμική στατική ανάλυση (pushover) μέχρι μία μετατόπιση στην κορυφή, δ_{top} , [ή μια ισοδύναμη από πλευράς έργου μετατόπιση $\delta_{eq} = \Sigma(m_i \delta_i^2) / \Sigma(\delta_i m_i)$] που προκύπτει από το ελαστικό φάσμα με απόσβεση 5% για τη θεμελιώδη περίοδο T_1 της κατασκευής

Η γωνία στροφής χορδής στη διαρροή θ_y υπολογίζεται από την παρακάτω ημ-εμπειρική σχέση που προτάθηκε από τους Park και Ang (1985)[7]. Η σχέση αυτή λαμβάνει υπόψη τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του μέλους, και θεωρεί χωριστές συμβολές λόγω καμπτικών παραμορφώσεων, λόγω ολίσθησης του οπλισμού από την αγκύρωση πέραν της στήριξης και λόγω διάτμησης:

$$\theta_y = \theta_{y,flex} + \theta_{y,slip} + \theta_{y,shear}$$

όπου: $\theta_{y,flex} = 1/3 \Phi_y M/V$

= η συμβολή στη θ_y λόγω καμπτικών παραμορφώσεων

με $\Phi_y = \epsilon_y / \{ [1 - \xi_y - (d_1/h)]h \}$

όπου : ϵ_y = η παραμόρφωση του χάλυβα στη διαρροή

$$\xi_y = \frac{f_c}{E_c \epsilon_y} \left\{ -(\omega_1 + \omega_2 + \nu) + \sqrt{(\omega_1 + \omega_2 + \nu)^2 + (2\epsilon_y E_c / f_c)[(1 - d_1/h)(\nu + \omega_1) + \omega_2 d_1/h]} \right\}$$

ξ_y = το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή ανηγμένο στο συνολικό ύψος h της διατομής. Η παραπάνω σχέση προκύπτει υποθέτοντας παραβολικό διάγραμμα σ - ϵ για το σκυρόδεμα σε θλίψη με τιμές f_c , ϵ_c στην κορυφή και λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι για σχετικά μικρές τιμές του ανοιγμένου αξονικού φορτίου (π.χ. μέχρι 0.3) το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται περίπου ελαστικά με μέτρο ελαστικότητας E_c . Στη σχέση:

f_c = η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος

E_c = το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος

ω_1 = ογκομετρικό ποσοστό εφελκυόμενου οπλισμού

ω_2 = ογκομετρικό ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού

ν = το ανοιγμένο αξονικό φορτίο

$\theta_{y,slip} = S_z / z$

= η συμβολή στη θ_y λόγω ολίσθησης του οπλισμού από την αγκύρωση πέραν της στήριξης

όπου: $z = d - d_1$

$$S_z = 7 \times 10^{-5} \Phi(\sigma_z / \sqrt{\tau_{max}})^{3/2}$$

με : $\sigma_z = f_y$

$\tau_{max} = 10.3$ ΜΡα για ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας

= 6.2 ΜΡα για δυσμενείς συνθήκες συνάφειας

$\theta_{y,shear} = \theta_s [1 + (1+l')(1-l') / 2zl]$

= η συμβολή στη θ_y λόγω διάτμησης

όπου l = το μήκος του τμήματος

$$\begin{aligned}
 l' &= \text{η απόσταση από το άκρο της διατομής} \\
 &= z + df_{ct} / \min[0.75\sqrt{f_c}, 0.45\sqrt{(f_c) + 100\rho_1 / \max(M/Vd, 1)}] \\
 &\quad \text{με } f_{ct} = \text{η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa} \\
 &\quad \rho_1 = \text{το ποσοστό του εφελκυσμένου χάλυβα} \\
 \theta_s &= [0.002 / \max(M/Vd - 0.5, 1)] \times [1 + \{0.925u' / \sqrt{[\max(0.2, 100\rho_{ws}) - 0.4]}\}] \quad \text{για } M/Vd \leq 2.5 \\
 &\quad \text{όπου: } \rho_{ws} = A_{sw} / sb_w \\
 &\quad u' = 2.4[0.25\Phi_f V] / [M\sqrt{(f_c - 1)}] \\
 \theta_s &= [0.002 / (M/Vd - 0.5)] \times [1 + 1.35\max[(M/Vd) - 4, 0]u'] \\
 &\quad \text{για } M/Vd > 2.5
 \end{aligned}$$

Σημειώνεται πως ανάλογες προτάσεις σχετικά με την τιμή της θ_y έχουν γίνει από τους Παναγιωτάκος και Φαρδής (2001)[6], και βασίζονται και αυτές στη θεώρηση χωριστών συμβολών λόγω λόγω καμπτικών παραμορφώσεων, λόγω ολίσθησης του οπλισμού από την αγκύρωση πέραν της στήριξης και λόγω διάτμησης.

Η γωνία στροφής χορδής στη αστοχία θ_u υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\theta_u = \theta_y + (1 - 0.5I_p/l)(\phi_u - \phi_y)I_p$$

όπου: I_p = το μήκος της πλαστικής άρθρωσης
 $= 0.08l + 0.022f_y\Phi_L$
 με : l = το μήκος του τμήματος μεταξύ του άκρου όπου η ροπή είναι μέγιστη και του σημείου που μηδενίζεται
 Φ_L = η διάμετρος των διαμήκων ράβδων
 f_y = η τάση διαρροής του χάλυβα των διαμήκων ράβδων σε MPa

Σημειώνεται πως ανάλογες προτάσεις σχετικά με την τιμή της θ_u έχουν γίνει από τους Παναγιωτάκος και Φαρδής (2001)[6]

1.6 Δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων [3] [7]

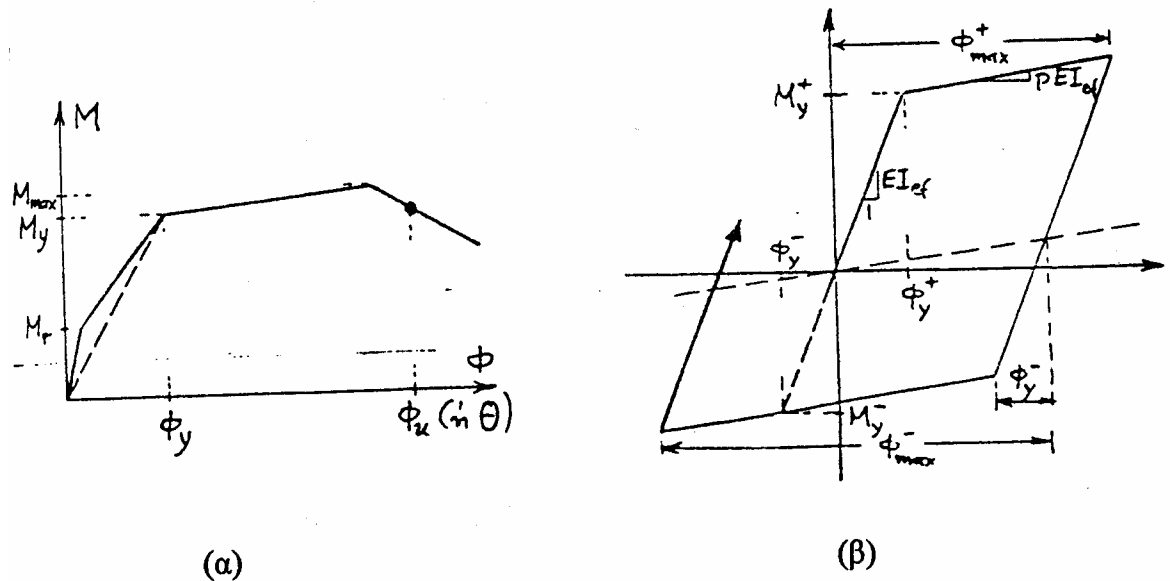
Πρόκειται για ένα δείκτη που υπολογίζεται για ένα μέλος σε περιπτώσεις μονοτονικής φόρτισης, σε μία ακραία διατομή. Ορίζεται ως:

$$\mu_\phi = \frac{\Phi_{\max}}{\Phi_y}$$

όπου: Φ_{\max} = η μέγιστη καμπυλότητα που αναπτύσσεται σε μία ακραία διατομή
 Φ_y = η τιμή της καμπυλότητας στη διαρροή της ακραίας διατομής

Η διαθέσιμη τιμή του παραπάνω δείκτη δίνεται για $\Phi_{\max} = \Phi_u$, δηλαδή για τιμή της καμπυλότητας στην αστοχία της ακραίας διατομής:

$$\mu_{\phi,u} = \frac{\Phi_u}{\Phi_y}$$



Σχ. 2 Καμπυλότητες για (α) μονοτονική (β) ανακυκλιζόμενη φόρτιση[3]

Για τον υπολογισμό της Φ_y : στο διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων $M - \Phi$, η διαρροή της διατομής θεωρείται ότι ταυτίζεται με τη διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού, συνεπώς η καμπυλότητα στη διαρροή δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi_y = \frac{\varepsilon_y}{[1 - \xi_y - (d_1/h)]h}$$

όπου : ε_y = η παραμόρφωση του χάλυβα στη διαρροή

h = το ύψος της διατομής

d_1 = η απόσταση οπλισμού από την πλησιέστερη ακραία ίνα

ξ_y = όπως ορίστηκε στην § 1.5

Για τον υπολογισμό της Φ_u : μπορεί να θεωρηθεί στο διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων $M-\Phi$ ότι η οριακή τιμή της καμπυλότητας στην αστοχία ταυτίζεται με την κορυφή του διαγράμματος όπου η τιμή της ροπής M είναι μέγιστη, ή ότι συμπίπτει με το σημείο του φθιτού κλάδου του διαγράμματος που αντιστοιχεί στο 95% ή στο 85% της μέγιστης ροπής, ή ακόμα θεωρώντας ως αστοχία την υπέρβαση μιας οριακής τιμής της θλιπτικής παραμόρφωσης ε_{cu} στην ακραία θλιβόμενη ίνα. Συνεπώς, για δοκούς:

- για **δοκούς**, η καμπυλότητα αστοχίας είναι:

$$\Phi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{\xi_u h}$$

Η τιμή ε_{cu} λαμβάνεται συνήθως ίση με την παραμόρφωση που αντιστοιχεί σε $\sigma = 0.85f_c$ στο φθιτό κλάδο του διαγράμματος σ - ε . Για ορθογωνικές διατομές με διαστάσεις πλευρών b και h και με κλειστούς συνδετήρες με ογκομετρικό ποσοστό ω_w και σε αποστάσεις s , οι οποίοι συγκρατούν στις γωνίες τους η συνολικά ράβδους κατά μήκος της περιμέτρου της διατομής, ισχύει:

$$\varepsilon_{cu} = 0.0035 + 0.1\alpha_n\alpha_s\omega_w$$

όπου: $\alpha_n = 1 - (1/3n)$

$$\alpha_s = [1 - (s/2b)][1 - (s/2h)]$$

Η τιμή του ανηγμένου ύψους της θλιβόμενης ζώνης μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά ως εξής: $\xi_u = 1.35 (v + \omega_1 - \omega_2)$

- για τα **υποστυλώματα**, η καμπυλότητα αστοχίας δίνεται από τη σχέση:

$$\Phi_u = \frac{\epsilon_{cu}}{\xi_u [h - 2(c + \Phi_h)]}$$

όπου: c = η επικάλυψη από σκυρόδεμα

Φ_h = η διάμετρος του συνδετήρα

Η τιμή του ανηγμένου ύψους της θλιβόμενης ζώνης μπορεί να ληφθεί προσεγγιστικά από τη σχέση $v \approx (A_o/A_c) \xi_u$

όπου: $A_o = bh$

= η επιφάνεια της πλήρους διατομής

$A_c = [h - 2(c + \Phi_h)][b - 2(c + \Phi_h)]$

= η επιφάνεια του περισφιγμένου πυρήνα

Το βασικό μειονέκτημα του δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων είναι ότι η καμπυλότητα της διατομής δεν έχει φυσική σημασία, αφού όλα τα μη γραμμικά φαινόμενα όπως η ρηγμάτωση, ο λυγισμός κτλ συμβαίνουν σε ένα πεπερασμένο μήκος στοιχείου. Οπότε είναι ορθότερο να αναφερόμαστε σε καμπυλότητα ενός τμήματος και όχι μιας διατομής.

2. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΥΠΟΨΗ ΤΗΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

2.1 Δείκτης βλάβης κατά Krätzig και Meskouris (1984) [5]

Ο δείκτης αυτός υπολογίζει τη βλάβη από την απορροφώμενη ενέργεια των ημικύκλων φόρτισης. Με αυτό τον τρόπο, λαμβάνεται υπόψη η συσσωρευμένη βλάβη που προκαλείται από ανακυκλιζόμενες φορτίσεις ακόμη και χωρίς αύξηση της μέγιστης παραμόρφωσης. Ορίζεται ως:

$$D_Q = D_Q^+ \times (1 - D_Q^-) + D_Q^-$$

Όπου:

$$D_Q^+ = (\sum E_{si}^+ + \sum E_i^+) / (E_u^+ + \sum E_i^+)$$

$$D_Q^- = (\sum E_{si}^- + \sum E_i^-) / (E_u^- + \sum E_i^-)$$

Όπου : E_{si} = η ενέργεια των ημικύκλων φόρτισης που ξεπερνούν την προηγούμενη παραμόρφωση (κύριοι ημίκυκλοι)

E_i = η ενέργεια των ημικύκλων φόρτισης με μικρότερη ή ίση παραμόρφωση από την προηγούμενη (δευτερεύοντες ημίκυκλοι)

E_u = η απορροφώμενη ενέργεια σε μονοτονική φόρτιση

Τα πρόσημα (+) και (-) αντιστοιχούν στους κύκλους φόρτισης (+ για αυξανόμενο κύκλο, - για μειούμενο). Οι αυξανόμενοι και μειούμενοι κύκλοι φόρτισης καθορίζονται από τη φορά της επιβαλλόμενης μετακίνησης, δηλαδή ουσιαστικά από τη διεύθυνση της φόρτισης.

Η ενέργεια που απορροφάται προκύπτει ως εμβαδό των υστερητικών βρόχων απόκρισης. Ειδικότερα, η ενέργεια του κάθε ημικύκλου μπορεί να θεωρηθεί ότι

είναι το μισό της ενέργειας του κάθε κύκλου, εφ' όσον οι βρόχοι στο διάγραμμα δύναμης-μετατόπισης προκύπτουν συμμετρικοί.

3. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΠΟΥ ΛΑΜΒΑΝΟΥΝ ΥΠΟΨΗ ΤΟΣΟ ΤΙΣ ΤΕΛΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΟΣΟ ΚΑΙ ΤΗ ΣΥΣΣΩΡΕΥΜΕΝΗ ΒΛΑΒΗ ΑΠΟ ΑΝΑΚΥΚΛΙΖΟΜΕΝΕΣ ΦΟΡΤΙΣΕΙΣ

3.1 Δείκτης βλάβης κατά Park και Ang (1985) [5]

Οι Park και Ang προτείνουν τον παρακάτω δείκτη:

$$D = (\delta_M / \delta_u) + (\beta |dE / Q_y \delta_u)$$

Όπου: δ_M = η μέγιστη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια του πειράματος

δ_u = η μέγιστη παραμόρφωση σε μονοτονική φόρτιση

Q_y = η δύναμη στη διαρροή

dE = η επαυξανόμενη απορροφώμενη υστερητική ενέργεια

β = σταθερός θετικός συντελεστής που ορίζεται ως:

$$\beta = [-0,447 + 0,073(l/d) + 0,24n_0 + 0,314p_t] \times 0,7^{\rho_w}$$

όπου : l/d = το διατμητικό άνοιγμα του στοιχείου ≥ 1.7 . Αν προκύψει τιμή < 1.7 θα χρησιμοποιηθεί η τιμή 1.7

n_0 = το (μέγιστο;) ανοιγμένο αξονικό φορτίο ≥ 0.2 . Ομοίως, αν προκύψει τιμή < 0.2 , θα χρησιμοποιηθεί η τιμή 0.2 .

p_t = το γεωμετρικό ποσοστό του συνολικού διαμήκους οπλισμού $\geq 0.75\%$. Ομοίως, αν προκύψει τιμή $< 0.75\%$, θα χρησιμοποιηθεί η τιμή 0.75%

ρ_w = το ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περίσφιξης

Ταυτόχρονα, προτείνεται και η παρακάτω αντιστοίχιση των τιμών που μπορεί να πάρει ο δείκτης με τις πραγματικές βλάβες. Η ταξινόμηση αυτή θα μπορούσε με ασφάλεια να χρησιμοποιηθεί και για τους περισσότερους δείκτες βλάβης που έχουν προταθεί κατά καιρούς:

$D < 0.10$	Χωρίς βλάβη ή μόνο εμφάνιση τοπικών ρωγμών (επισκευάσιμες)
$0.10 \leq D \leq 0.25$	Μικρές βλάβες (επισκευάσιμες)
$0.25 \leq D \leq 0.40$	Μέτριες βλάβες (επισκευάσιμες)
$0.40 \leq D \leq 1.00$	Σοβαρές βλάβες (μη επισκευάσιμες)
$D \geq 1.00$	Κατάρρευση (μη ασφαλής κατασκευή)

Πιν. 3 Ταξινόμηση βλαβών κατά Park και Ang[5]

3.2 Δείκτης γενικευμένης πλαστιμότητας γωνιών στροφής [3] [9]

Είναι ένας συνδυασμός της μέγιστης παραμόρφωσης διατομής, η οποία εκφράζεται από τη διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής μ_u , και του βαθμού κόπωσης της διατομής, ο οποίος εκφράζεται με τον αριθμό των κύκλων

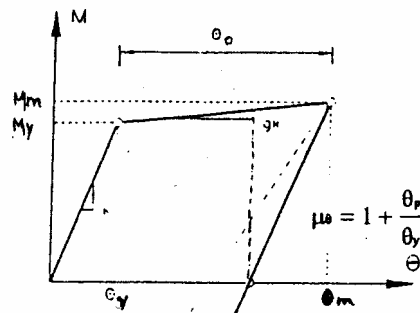
φόρτισης-αποφόρτισης. Η σεισμική βλάβη μπορεί να εκφραστεί σαν γραμμικός συνδυασμός της βλάβης που προκλήθηκε από υπερβολική παραμόρφωση και εκείνης που δημιουργήθηκε από την επίδραση της επανειλημμένης κυκλικής φόρτισης. Συνεπώς, ο δείκτης γενικευμένης πλαστιμότητας ορίζεται ως εξής:

$$\mu_{\theta}^* = \mu_{\theta} + \mu_{\theta}(\mu_{\sigma}/\mu_{\sigma})$$

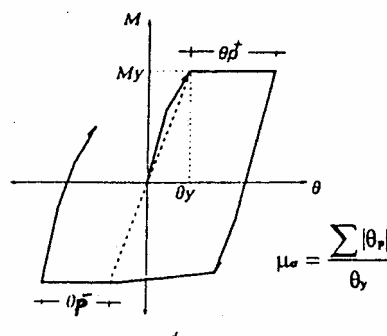
όπου: μ_{θ} = ο δείκτης πλαστιμότητας στροφών όπως αυτός ορίζεται στο παρακάτω σχήμα. (σχ. 3) Είναι ο όρος που εκφράζει τη συμμετοχή της υπερβολικής παραμόρφωσης.

μ_{σ} = ο δείκτης συσσωρευμένων πλαστικών στροφών όπως αυτός ορίζεται στο παρακάτω σχήμα (σχ. 4)

μ_{σ} = ο δείκτης που ρυθμίζει το ποσοστό συμμετόχης του αριθμού των κύκλων φόρτισης, δηλαδή ουσιαστικά της απορροφούμενης υστερητικής ενέργειας στη συγκεκριμένη βλάβη. Ο όρος $\mu_{\theta}(\mu_{\sigma}/\mu_{\sigma})$ εκφράζει τη συμμετοχή του αριθμού των κύκλων φόρτισης.



σχ. 3 Ορισμός του δείκτη μ_{θ} [3]



σχ. 4 Ορισμός του δείκτη μ_{σ} [3]

3.3 Δείκτης σχετικός με τον αριθμό των κύκλων φόρτισης [3]

Ο δείκτης αυτός ορίζεται για μέλη που καταπονούνται σε ανακυκλιζόμενη ένταση και μάλιστα λαμβάνει υπόψη το γεγονός πως τα μέλη αποκρίνονται διαφορετικά για θετική και αρνητική φόρτιση. Αναλυτικότερα, ορίζεται:

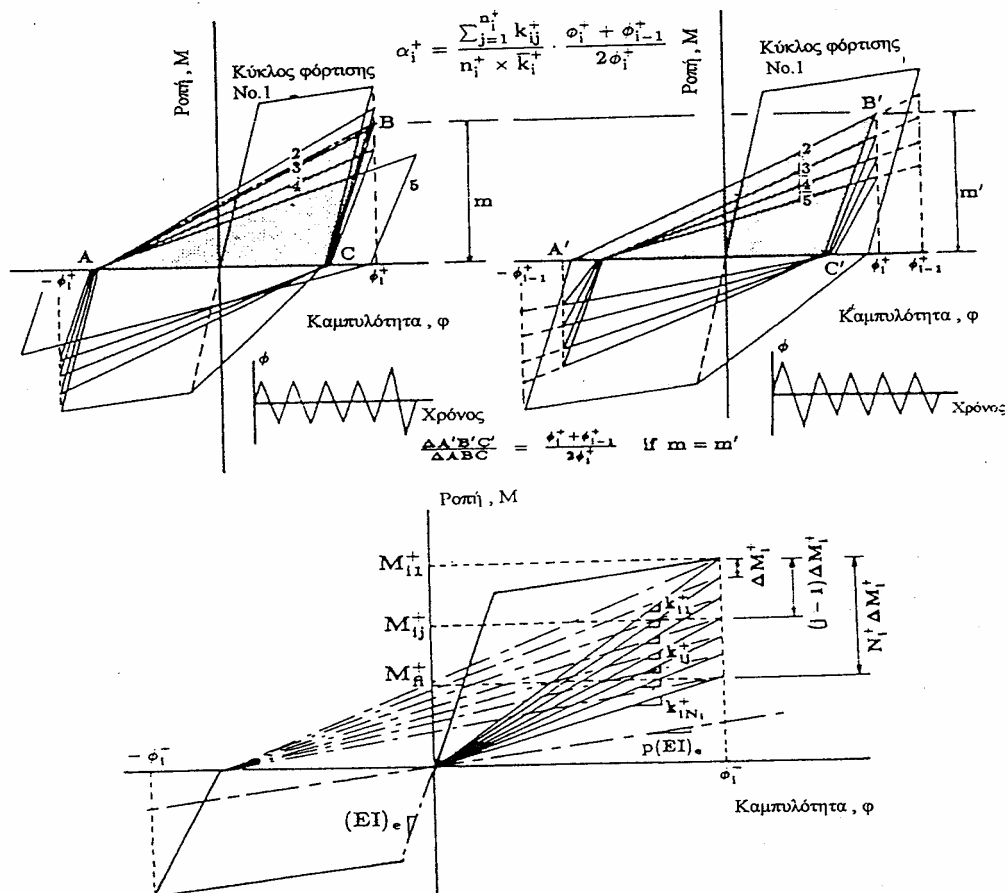
$$D_e = \Sigma [\alpha_i^+ (n_i^+/N_i^+) + \alpha_i^- (n_i^-/N_i^-)]$$

Όπου: $N_i = (M_i - M_{fi}) / \Delta M_i$
 = ο αριθμός των κύκλων φόρτισης που προκαλούν αστοχία για καμπυλότητα ϕ_i
 n_i = ο αριθμός των εφαρμοζόμενων κύκλων φόρτισης ως την καμπυλότητα ϕ_i

$$\alpha_i^+ = \frac{(1/n_i^+) \sum k_{ij}^+}{/k_i^+} \times \frac{\phi_i^+ + \phi_{i-1}^+}{2\phi_i^+} = \frac{M_{i1}^+ - (1/2)(n_i^+ - 1)\Delta M_i^+}{M_{i1}^+ - (1/2)(N_i^+ - 1)\Delta M_i^+} \times \frac{\phi_i^+ + \phi_{i-1}^+}{2\phi_i^+}$$

= παράμετρος που δίνεται σαν συνάρτηση του ιστορικού της φόρτισης και του αριθμού των κύκλων φόρτισης. Στη σχέση:

- $k_{ij}^+ = M_{ij}^+ / \Phi_i^+$
 = η δυσκαμψία κατά τη διάρκεια του j κύκλου μέχρι το επίπεδο καμπυλότητας i
- $/k_i^+ = (1/N_i^+) \sum k_{ij}^+$
 = η μέση δυσκαμψία κατά τη διάρκεια N_i^+ κύκλων μέχρι το επίπεδο καμπυλότητας i
- $M_{ij}^+ = M_{i1}^+ - (j-1)\Delta M_i^+$
 = η ροπή μετά από j κύκλους μέχρι το επίπεδο καμπυλότητας i



σχ. 5 Ορισμός της παραμέτρου α [3]

Από πειραματικές εφαρμογές, προέκυψε η σχέση του δείκτη βλάβης D_e και της πραγματικής βλάβης, η οποία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

D_e	Πραγματική βλάβη	Περιγραφή
0.0 – 0.2	Μη ορατή ρηγμάτωση	Μικρή βλάβη
0.2 – 0.5	Ορατή ρηγμάτωση	Επισκευάσιμη
0.5 – 1.0	Θραύση σκυροδέματος	Μη επισκευάσιμη
≥ 1.0	Σύνθλιψη σκυροδέματος	Μη ασφαλής κατασκευή

Πιν. 4 Ταξινόμηση βλάβης σύμφωνα με το δείκτη D_e [3]

Από τους δείκτες των στοιχείων του ορόφου μπορεί να παραχθεί ένας αθροιστικός δείκτης βλάβης για τον όροφο αυτό:

$$D_{sk} = \frac{\sum (D_i^k E_i^k)}{\sum (E_i^k)}$$

Όπου: D_i^k = ο δείκτης βλάβης του κόμβου i του υπό εξέταση ορόφου

E_i^k = η αποσβεννυμένη ενέργεια στον κόμβο i

Τα αθροίσματα περιλαμβάνουν όρους από $i=1$ μέχρι n_k = το πλήθος των ενδεχόμενων πλαστικών αρθρώσεων στον όροφο αυτό, και ισούται με το διπλάσιο του αριθμού των στοιχείων στον όροφο

3.4 Αθροιστικοί δείκτες βλάβης κατά Banon (1979) [3] [7]

Μία ανακυκλιζόμενη ένταση μεγάλου εύρους μειώνει τη δυσκαμψία και την αντοχή, οδηγώντας τελικά σε αστοχία για τιμές της μέγιστης απόκρισης μικρότερες από αυτές που προκαλούν αστοχία υπό μονοτονική φόρτιση, δηλαδή πριν εξαντληθεί η διαθέσιμη τιμή του δείκτη. Για αυτό, προτάθηκε από τον Banon (1979) την **ανοιγμένη αθροιστική γωνία στροφής**, η οποία ορίζεται ως εξής:

- για **μονοτονική** φόρτιση:

$$NCR = \mu_0 - 1$$

Όπου μ_0 = όπως έχει οριστεί και παραπάνω, στο δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής (§ 1.5)

- για **ανακυκλιζόμενη** φόρτιση

$$NCR = \sum (\theta_{pi} / \theta_y)$$

Όπου: θ_{pi} = η απόλυτη τιμή της μέγιστης πλαστικής γωνίας στροφής σε κάθε κύκλο ανελαστική απόκρισης του άκρου του μέλους

θ_y = όπως έχει οριστεί και παραπάνω, στο δείκτη πλαστιμότητας γωνιών στροφής (§ 1.5)

Ένας εναλλακτικός αθροιστικός δείκτης είναι η **ανηγμένη απορρόφηση ενέργειας**, η οποία ορίζεται ως εξής:

$$E_n = \int \frac{Md\theta_{pi}}{0.5M_y\theta_y}$$

δηλαδή ως η συνολική ενέργεια που απορροφάται μέσω της πλαστικής στροφής προς την ελαστική ενέργεια στη διαρροή. Ο δείκτης αυτός να μην υπερτερεί της NCR γιατί λαμβάνει υπόψη και τις ροπές και τις πλαστικές γωνίες στροφής, όμως υπολογίζεται δυσκολότερα.

3.5 Συνδυασμός αθροιστικού δείκτη και δείκτη που μετρά την παραμόρφωση για μονοτονική ένταση κατά Park και Ang (1985) [3] [7]

Οι Park και Ang πρότειναν έναν τέτοιο συνδυασμό βασιζόμενοι σε μια ιδέα του Banon (1979). Ο δείκτης αυτός μπορεί να περιγράψει καλύτερα τη βλάβη εκφράζοντας ποσοτικά την αβεβαιότητα αστοχίας των μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση:

$$D_{PA} = \frac{\mu_{\theta} + 0.5\beta E_n}{\mu_{\theta, uPA}} = \frac{\theta + \beta |M/M_y| d \theta_{p1}}{\mu_{\theta, uPA} \theta_{y, PA}}$$

όπου: μ_{θ} = ο δείκτης πλαστιμότητας γωνιών στροφής όπως ορίστηκε στην § 1.5

E_n = η ανοιγμένη απορρόφηση ενέργειας, όπως ορίστηκε στην § 3.5

$$\beta = 0.7^{100\rho_w} [0.073 \max(1, 7M/Vd) + 0.24 \max(0.2, v) + 3.14 \max(0.0075, \rho_1) - 0.447]$$

όπου: ρ_w = το γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού διάτμησης

v = το ανοιγμένο αξονικό φορτίο

ρ_1 = το γεωμετρικό ποσοστό του εφελκόμενου οπλισμού

$$M/M_y = (1.24 - 0.15\omega_1 - 0.5v)\varepsilon$$

όπου: ε = λογαριθμοκανονική τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή 1.0 και τυπική απόκλιση 0.12

$$\mu_{\theta, uPA} = (\varepsilon_p/\varepsilon_o)^{0.218\rho_w - 2.15} e^{0.654\rho_w + 0.38} > 1$$

$$= 1.0 \text{ αν } \mu_{\theta, uPA} < 1$$

$$\varepsilon_p = 0.5\varepsilon_o + 0.5\sqrt{(\varepsilon_o^2 + \theta_s^2)}$$

Ο παραπάνω δείκτης περιγράφει ικανοποιητικά τη βλάβη γιατί έχει αναπτυχθεί με βάση μεγάλο αριθμό πειραμάτων. Η τιμή του υπολογίζεται εύκολα από τα αποτελέσματα μιας μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης και από τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά του μέλους.

4. ΔΕΙΚΤΕΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΙΔΙΟΠΕΡΙΟΔΟ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

4.1 Δείκτης απομένουσας αντοχής κατά Συρμακέζη, Σοφοκλέους (1999) [8]

Οι Συρμακέζης και Σοφοκλέους προτείνουν ένα δείκτη σχετικό με την ιδιοπερίοδο μιας κατασκευής βασιζόμενη στη διαπίστωση ότι μπορεί να υπάρξει σχέση ανάμεσα στη μεταβαλλόμενη ιδιοπερίοδο και την τιμή της πλαστιμότητας του φορέα, όπως αυτό προέκυψε από έρευνα για σειρά πλαισίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Με τη βοήθεια του δείκτη μεταβολής της ιδιοπεριόδου της κατασκευής, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$B_T(T) = T_o / T$$

ορίζεται ο δείκτης απομένουσας αντοχής:

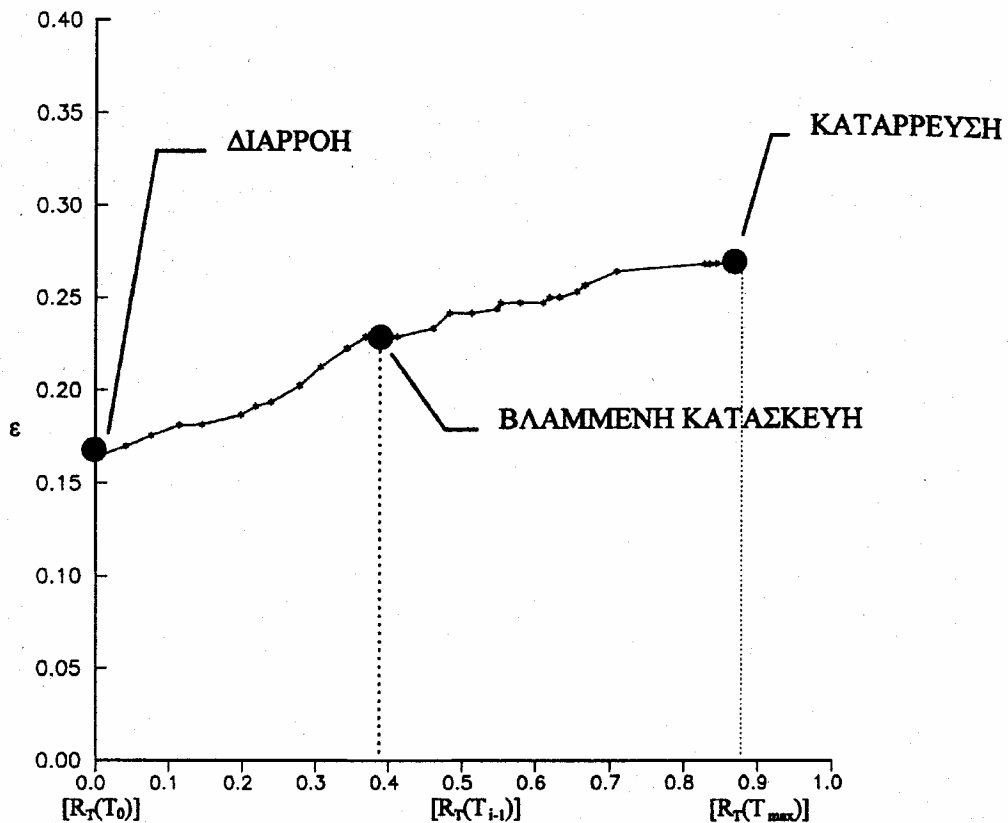
$$R_T(T) = 1 - (T_0 / T)$$

όπου: T_0 = η αρχική ιδιοπερίοδος της κατασκευής στην ελαστική περιοχή, πριν από οποιαδήποτε βλάβη

T_{max} = η ιδιοπερίοδος της κατασκευής στην οριακή κατάσταση αστοχίας, με οποιαδήποτε τρόπο κι αν αυτή προκαλείται (εξάντληση τοπικής πλαστιμότητας μιας διατομής, ανάπτυξη μηχανισμού ορόφου, υπέρβαση συγκεκριμένου λόγου σχετικών μετακινήσεων ορόφων)

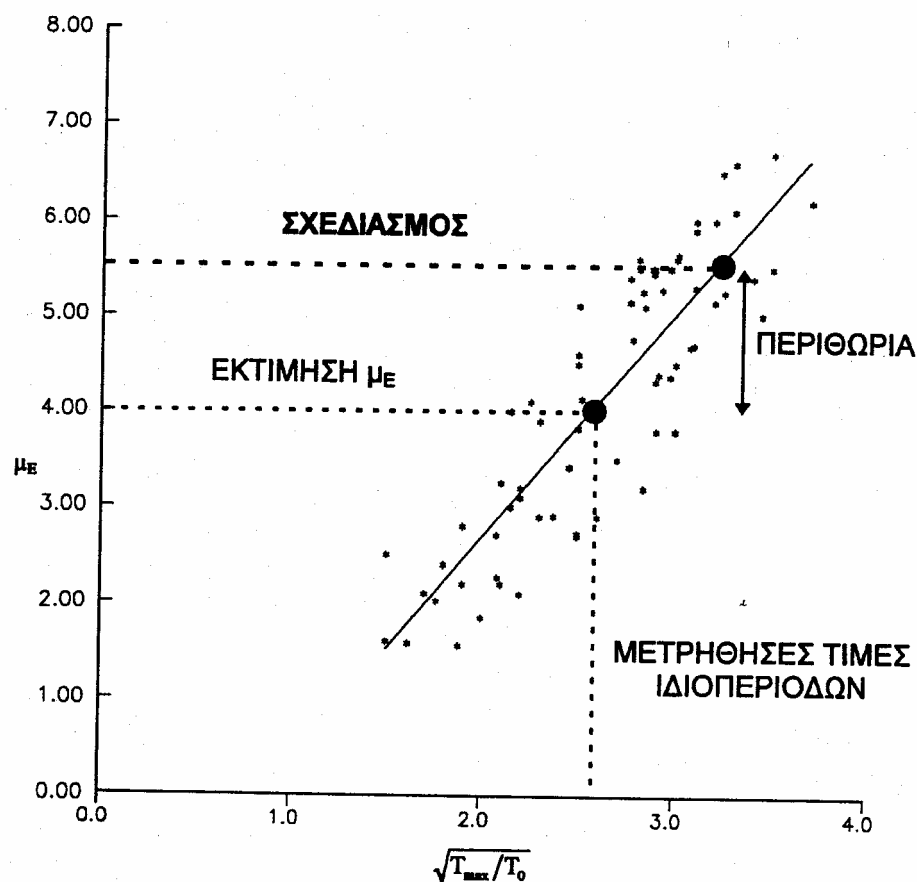
T = η ιδιοπερίοδος της κατασκευής σε ένα ενδιάμεσο στάδιο
($T_0 < T < T_{max}$)

Ο δείκτης χρησιμοποιείται ως εξής: με βάση την ελαστοπλαστική ανάλυση του φορέα και τον υπολογισμό των διαδοχικών τιμών της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου της κατασκευής μέχρι το τελικό στάδιο κατάρρευσης, μπορεί να κατασκευαστεί για το φορέα αυτό το διάγραμμα μεταβολής του δείκτη απομένουσας αντοχής ως προς το μεταβαλλόμενο κατά την διάρκεια της ελαστοπλαστικής ανάλυσης σεισμικό συντελεστή ε . Αφού μετρηθεί η παρούσα πραγματική ιδιοπερίοδος T του πλαισίου [π.χ. πειραματικά με τη χρήση της μεθόδου των μικροδονήσεων (Karydis 1982) ή αναλυτικά στην αρχική ελαστική κατάσταση του φορέα με την αξιοποίηση κατάλληλου λογισμικού (Συρμακέζης και άλλοι, 1996)], η υπάρχουσα κατάστασή του μπορεί να εκτιμηθεί από το διάγραμμα αυτό μέσω του δείκτη $R_T(T)$. Ο ίδιος δείκτης επιτρέπει και την εκτίμηση των περιθωρίων που ο φορέας εξακολουθεί να έχει μέχρι το τελικό στάδιο κατάρρευσης (περιθώριο περαιτέρω μεταβολής του $R_T(T)$). (σχ. 6)



σχ. 6 Μεταβολή του δείκτη απομένουσας αντοχής του φορέα σε σχέση με τον σεισμικό συντελεστή [8]

Ακόμα, είναι δυνατό να κατασκευαστεί διάγραμμα όπου θα παρουσιάζεται η μεταβολή του αναπτυσσόμενου συντελεστή πλαστιμότητας μ_E ως προς τη μεταβολή των ιδιοπεριόδων. Με βάση αυτό το διάγραμμα και με γνωστό λόγο T / T_0 , μπορεί να εκτιμηθεί ο συντελεστής πλαστιμότητας που ανέπτυξε η κατασκευή υπό τη δεδομένη σεισμική διέγερση καθώς επίσης και τα αποθέματα πλαστιμότητας που αυτή διαθέτει μέχρι το στάδιο κατάρρευσης. Ο δείκτης αυτός γίνεται ακόμα πιο χρήσιμος όταν κατασκευάζονται συγκεντρωτικά διαγράμματα $\mu_E - \sqrt{(T_{max}/T_0)}$ για διάφορες κατηγορίες φορέων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Εάν η διασπορά των δεδομένων αυτών δεν είναι πολύ μεγάλη, η κατά προσέγγιση γραμμική ή άλλη απεικόνισή τους είναι δυνατή. Έτσι, κατά αντιστοιχία με τα προηγούμενα διαγράμματα, το διάγραμμα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν μια μεγάλη ομάδα ομοειδών κατασκευών. (σχ. 7)



σχ. 7 Συσχέτιση συντελεστή πλαστιμότητας και λόγου ιδιοπεριόδων για επίπεδα πλαίσια οπλισμένου σκυροδέματος [8]

5. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΠΟΥ ΒΑΣΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟΝ ΟΠΤΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΤΟΥ ΠΑΡΑΤΗΡΗΤΗ

Τέτοιου είδους δείκτες χρησιμοποιούνται ευρύτατα από κανονισμούς διαφόρων χωρών γιατί καταλήγουν γρήγορα σε συμπεράσματα σχετικά με το βαθμό της βλάβης ενός στοιχείου ή μιας κατασκευής σε περιπτώσεις που εφαρμόζονται μετασεισμικές τεχνικές επέμβασης

έκτακτης ανάγκης. Με αυτό τον τρόπο, διευκολύνεται η διαδικασία της απόφασης για το αν θα γίνει επέμβαση ή επισκευή. Οι δείκτες αυτοί καταλήγουν σε αποτέλεσμα βασιζόμενοι στην επί τόπου παρατήρηση των βλαβών και στην κατάταξη αυτών βάσει μίας βαθμονομημένης κλίμακας. Η φιλοσοφία με την οποία προτείνεται μια τέτοια κλίμακα ξεφεύγει από τα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, για αυτό και εδώ απλώς παρουσιάζεται ένας τέτοιος δείκτης.

5.1 Δείκτης του τουρκικού κανονισμού αποτίμησης βλαβών (κατά Gülkan et al., 1994) [10]

Ο δείκτης βλάβης ενός μέλους εξαρτάται από το είδος του μέλους (δοκός, υποστύλωμα, σύνδεση, τοιχοπλήρωση) και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$MD = \frac{\omega (1 \times N_I + 2 \times N_m + 4 \times N_s)}{N_T}$$

Όπου: **MD** = ο δείκτης βλάβης για ένα είδος στοιχείων

N_I = το σύνολο των στοιχείων αυτού του είδους που έχουν υποστεί ελαφριάς μορφής βλάβη

N_m = το σύνολο των στοιχείων αυτού του είδους που έχουν υποστεί μέτριας μορφής βλάβη

N_s = το σύνολο των στοιχείων αυτού του είδους που έχουν υποστεί σοβαρής μορφής βλάβη

N_T = το σύνολο των στοιχείων του ίδιου είδους

ω = ο συντελεστής σπουδαιότητας για το είδος του στοιχείου. Είναι:

- **ω** = 2 για υποστύλωμα (columns)
- **ω** = 1 για δοκούς (beams)
- **ω** = 1 για συνδέσεις (joints)
- **ω** = 0.5 για τοιχοπληρώσεις (infills)

Οι συντελεστές 1, 2, 4 χρησιμοποιούνται για να ποσοτικοποιήσουν το βαθμό βλάβης. Ειδικότερα:

- 1 για βλάβες ελαφριάς μορφής
- 2 για βλάβες μέτριας μορφής
- 4 για βλάβες σοβαρής μορφής

Για το σύνολο της κατασκευής, ο δείκτης βλάβης θα είναι:

$$SD = \frac{[(MD)_{columns} + (MD)_{beams} + (MD)_{joints} + (MD)_{infills}] \times 100}{[\omega_{columns} + \omega_{beams} + \omega_{joints} + \omega_{infills}] \times 4}$$

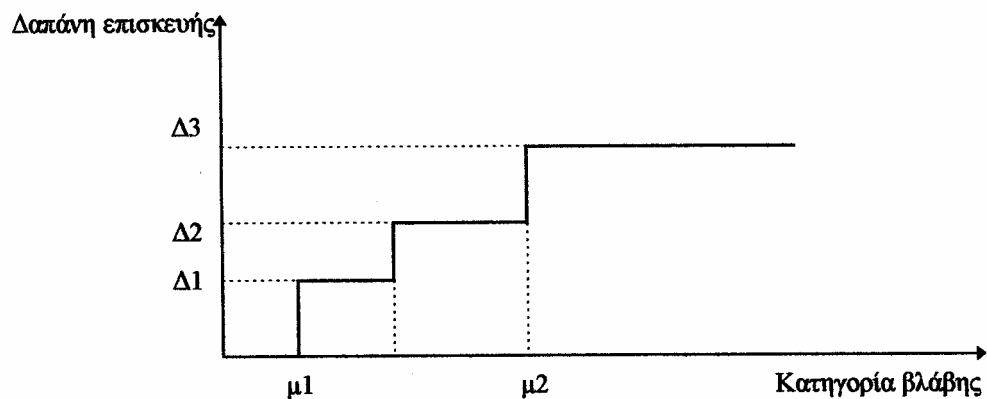
Το SD παίρνει τιμές ανάμεσα στο 0 και το 100. Η κατάσταση του φορέα ταξινομείται με βάση το SD ως εξής:

- $0 \leq SD \leq 5$ χωρίς βλάβες
- $6 \leq SD \leq 14$ με ελαφρές βλάβες
- $15 \leq SD \leq 43$ με μέτριες βλάβες
- $SD > 43$ με σοβαρές βλάβες

6. ΔΕΙΚΤΕΣ ΒΛΑΒΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΖΗΤΗΜΑΤΟΣ

6.1 Δείκτης σχετικός με τη δαπάνη επισκευής της κατασκευής κατά Παπαδόπουλο (1994) [3]

Ο συγκεκριμένος δείκτης έχει ως βάση το δείκτη γενικευμένης πλαστιμότητας γωνιών στροφής (όπως αυτός ορίστηκε στην §3.3) με τον οποίο ορίζεται η βλάβη (δηλαδή το μέγεθος και η έκταση των ρωγμών στο στοιχείο). Ο δείκτης αυτός συσχετίστηκε με τη δαπάνη επισκευής που απαιτείται για την επαναφορά μιας κρίσιμης διατομής που έχει υποστεί μερική ή ολική βλάβη στην αρχική της αντοχή. Η συσχέτιση αυτή φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα (σχ. 8), όπου στον οριζόντιο άξονα έχει τοποθετηθεί η κατηγορία της βλάβης εκφρασμένη μέσω του δείκτη μ_0^* και στον κατακόρυφο άξονα η δαπάνη επισκευής ανά διατομή.



σχ. 8 Συσχετισμός της κατηγορίας βλάβης με τη δαπάνη επισκευής [3]

Η αποκατάσταση για την κάθε κατηγορία βλάβης κλιμακώνεται σε τρία στάδια ανάλογα με το μέγεθος και την ένταση των ρωγμών. Η πρώτη κατηγορία αντιστοιχεί σε τριχοειδείς ρωγμές των οποίων η αποκατάσταση γίνεται με ρητινενέσεις και η δαπάνη επισκευής ανά διατομή είναι Δ_1 . Στη δεύτερη κατηγορία εντάσσονται ρωγμές μεγαλύτερης έκτασης, όπου οι επισκευές γίνονται με μεταλλικές επικολλητές λάμες και η δαπάνη επισκευής ανά διατομή είναι Δ_2 . Η τρίτη κατηγορία αφορά ρωγμές πολύ έντονες μέχρι αποδιοργάνωσης της διατομής, όπου οι επισκευές γίνονται με μανδύα σκυροδέματος και με δαπάνη Δ_3 ανά διατομή. Οι συνήθεις τιμές για τα μ_1 και μ_2 κυμαίνονται στα διαστήματα:

$$0.4 < \mu_1 < 0.8$$

$$3.5 < \mu_2 < 6.0$$

Από το παραπάνω διάγραμμα προκύπτει το διάγραμμα που ακολουθεί (σχήμα 2.9 καράμπελα), όπου ως κατηγορία βλάβης τέθηκε ο γενικευμένος δείκτης πλαστιμότητας μ_0^* και ως δαπάνη αποκατάστασης ένας δείκτης βλάβης ΔB_i . Για $\Delta B_i = 0$ δεν υπάρχει βλάβη, για $\Delta B_i = 1$ έχουμε ολική βλάβη ή τη μεγαλύτερη δυνατή από άποψη κόστους επισκευής βλάβη της διατομής.

Η **ολική δαπάνη** των επισκευών εκφράζεται από τον ολικό δείκτη της κατασκευής, ο οποίος περιλαμβάνει τους επιμέρους δείκτες βλάβης για όλες τις κρίσιμες διατομές του φορέα. Συγκεκριμένα:

$$\Delta B = \frac{\sum (\lambda_i \Delta B_i)}{\sum \lambda_i}$$

Όπου: λ_1 = είναι ο παράγοντας συμμετοχής της διατομής και κατά κανόνα λαμβάνεται ανάλογος του μήκους της παράπλευρης επιφάνειας της διατομής.

Το πεδίο τιμών του ολικού δείκτη είναι:

- $\Delta B = 0$ για μηδενική βλάβη
- $\Delta B = 1000$ για ολική βλάβη

6.2 Ποσοστό βλάβης με βάση το κόστος [11]

Πρόκειται για ένα τρόπο έκφρασης του βαθμού βλάβης μιας κατασκευής όταν το ενδιαφέρον επικεντρώνεται σε πεδία πέρα από αυτό της απομένουσας αντοχής και δυσκαμψίας, της απόφασης επισκευής και επέμβασης κτλ., δηλαδή όταν το ενδιαφέρον δεν είναι ο ίδιος ο φορέας αλλά άλλα στοιχεία, πχ η ένταση του σεισμού.

Εν προκειμένω, το ποσοστό βλάβης ορίζεται ως εξής:

$$\text{Ποσοστό βλάβης κατασκευής} = \frac{\text{Μέσο κόστος επισκευής}}{\text{Μέσο κόστος αντικατάστασης}}$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. **Ενισχύσεις-επισκευές κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα – Διαδικασίες, τεχνικές και διαστασιολόγηση**, Σ. Η. Δρίτσος, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα, 2005
2. **Πειραματική διερεύνηση συμπεριφοράς υποστυλωμάτων ενισχυμένων με μανδύες οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση**, Κ. Γ. Βανδώρος, διδακτορική διατριβή, Πάτρα, 2005
3. **Μέθοδοι αποτίμησης βλαβών σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα**, Δ. Καράμπελα, διπλωματική εργασία, Πάτρα 1999
4. **Damage assessment and remaining life prediction of structures**, L.Gao, IABSE report-Rapports AIPC-IVBH reports, IABSE Colloquium Copenhagen 1993, Remaining structural capacity, Vol. 67, Copenhagen, 1993
5. **Ακραίοι κόμβοι οπλισμένου σκυροδέματος με σπειροειδείς οπλισμούς – Δείκτες βλάβης και αξιολόγηση πειραματικών αποτελεσμάτων**, Χ. Καραγιάννης, Γ. Σιρκελής, 14^ο Ελληνικό Συνέδριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, ΤΕΕ – Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, τόμος Α, Κως, 2003
6. **Αποτίμηση σεισμικής τρωτότητας και ενίσχυση κτιρίου οπλισμένου σκυροδέματος με βάση τις μετακινήσεις**, Τ.Β. Παναγιωτάκος, Α.Ι. Κοσμόπουλος, Μ.Ν. Φαρδής, 2^ο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, ΤΕΕ – ΟΑΣ – ΙΤΣΑΚ – ΣΠΜΕ, τόμος ΙΙ, Θεσσαλονίκη, 28 – 30 Νοεμβρίου 2001
7. **Συγκριτική μελέτη δεικτών βλάβης μελών οπλισμένου σκυροδέματος υπό ανακυκλιζόμενη ένταση**, Μ.Ν. Φαρδής, Π.Α. Χριστόπουλος, 10^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ – Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, τόμος 2, Ρόδος, 1991
8. **Εκτίμηση του βαθμού βλάβης και αποθέματα πλαστιμότητας κατασκευών μετά από ένα σεισμό**, Κ.Α. Συρμακέζης, Α.Α. Σοφοκλέους, 13^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ – Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, τόμος ΙΙΙ, Ρέθυμνο, 25 – 27 Οκτωβρίου 1999
9. **Αναζήτηση κριτηρίου για το βέλτιστο αντισεισμικό σχεδιασμό κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα**, Π. Παπαδόπουλος, Ε. Μητσοπούλου, 1^ο Ελληνικό Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής και Τεχνικής Σεισμολογίας, τόμος 2, Αθήνα, 1992
10. **Seismic assessment of damaged/strengthened reinforced concrete buildings**, Erdem Canbay, Haluk Sucuoğlu, 2nd Japan – Turkey Workshop on Earthquake Engineering, Repair and Strengthening of Existing Buildings, Vol. 1, Istanbul, 1998
11. **Αναμενόμενα ποσοστά βλάβης κατασκευών του ελληνικού χώρου ανάλογα με την ένταση του σεισμού**, Ι. Βλάχος, Γ. Σταυρακάκης, Ι Ταφλαμπάς, 9^ο Ελληνικό συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ – Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, Καλαμάτα, 1990
12. **Συστάσεις για προσεισμικές και μετασεισμικές επεμβάσεις σε κτίρια**, ΟΑΣΠ, Αθήνα, 2000
13. **Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός**, ΟΑΣΠ, Αθήνα, 2000