

Δυνατότητες Εκτίμησης του Συντελεστή Συμπεριφοράς για Κλάσεις Κτιρίων σε Σύγχρονους Κανονισμούς

Βαμβάτσικος Δ¹

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

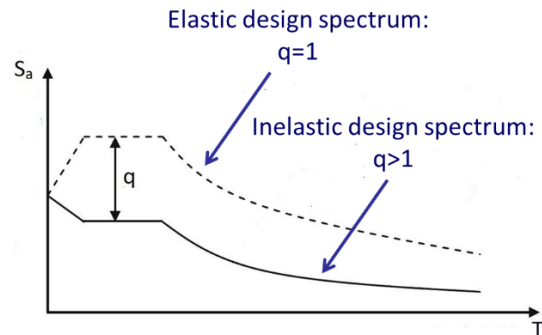
Η χρήση του συντελεστή συμπεριφοράς συνεχίζει να αποτελεί τη βάση των σύγχρονων σεισμικών κανονισμών για το σχεδιασμό κτιρίων με ελαστικές μεθόδους. Για την καθεαυτό εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς όμως, η τρέχουσα βιβλιογραφία προτείνει μια ευρεία πλειάδα από μεθοδολογίες. Αυτές μπορεί να βασίζονται σε στατικές ή δυναμικές αναλύσεις, χρησιμοποιώντας είτε προσδιοριστικές είτε πιθανοτικές μεθόδους, προσεγγίσεις βάσει έντασης ή βάσει διακινδύνευσης, ενώ άλλοτε ακολουθούν πορεία απευθείας εκτίμησης και άλλοτε επαλήθευσης μιας προεπιλεγμένης τιμής. Ιδιαίτερης σημασίας επίσης είναι η επιλογή μίας ή περισσότερων στάθμεων επιτελεστικότητας βάσει των οποίων κρίνεται η καταλληλότητα του συντελεστή συμπεριφοράς ώστε να ικανοποιούνται οι (άμεσες και έμμεσες) απαιτήσεις ασφάλειας του κανονισμού. Για τη σύνθεση μιας μεθόδου συμβατής με τον Ευρωκώδικα 8, αναλύονται όλες οι διαθέσιμες δυνατότητες και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, με έμφαση στην αξιόπιστη επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου ασφάλειας.

1 ΓΕΝΙΚΑ

Η εφαρμογή των σύγχρονων μεθόδων σεισμικού σχεδιασμού βασίζεται στην προσέγγιση της μη γραμμικής δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών μέσω ενός γραμμικού προσομοιώματος. Για να ληφθεί υπόψη η ευεργετική επίδραση της πλαστιμότητας, η οποία επιτρέπει τη μείωση των σεισμικών φορτίων σχεδιασμού αποδεχόμενη μεγαλύτερες αλλά ελεγχόμενες βλάβες, ο EN 1998-1 [1] υιοθετεί τον συντελεστή συμπεριφοράς. Γνωστός και ως συντελεστής q , χρησιμοποιείται για να μειώσει το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού στο ανελαστικό φάσμα, πρακτικώς με τη διαίρεση του πρώτου δια q (Σχήμα 1). Ωστόσο, ο EN 1998-1 παρέχει τιμές του q μόνο για λίγα συμβατικά συστήματα ανάληψης οριζοντίων φορτίων. Ακόμα και αυτές οι τιμές στηρίζονται σε περιορισμένες μελέτες και ελάχιστα αριθμητικά στοιχεία, όντας ουσιαστικώς βασισμένες περισσότερο στην κρίση των ειδικών, παρά σε ποσοτικές παρατηρήσεις [2]. Για την εισαγωγή νέων συστημάτων στον κανονισμό, ερευνητές έχουν κατά καιρούς προτείνει διάφορες μεθόδους για την εκτίμηση του q . Κάθε μέθοδος προτείνει το δικό της ορισμό για τον

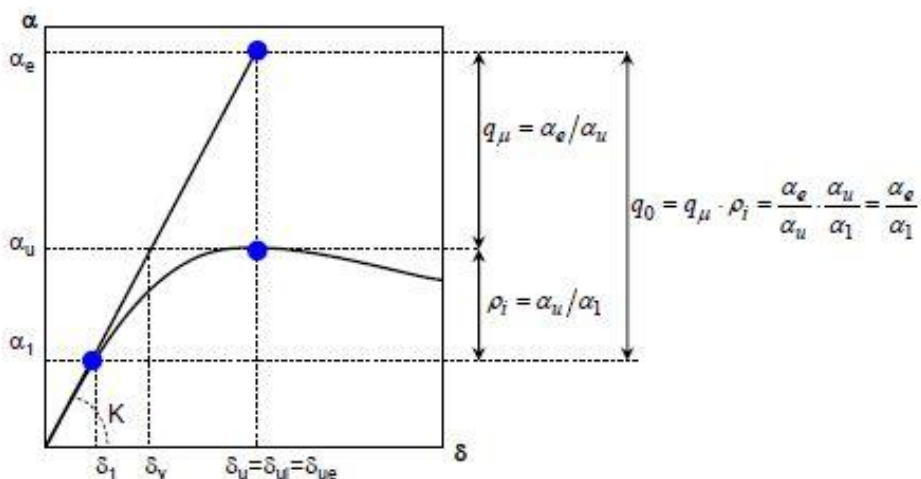
¹ Επίκουρος Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, divamva@central.ntua.gr

απαιτούμενο στόχο ασφάλειας και επιτελεστικότητας, καθώς και μια μέθοδο αποτίμησης αυτού, ενώ συνήθως έχει εφαρμοστεί σε ένα συγκεκριμένο σύστημα ανάληψης οριζοντίων φορτίων, χωρίς δυνατότητες γενίκευσης. Συνολικά, αυτή η άνιση προσέγγιση δεν παρέχει τα εχέγγυα αξιοπιστίας που θα έπρεπε να διαθέτουν οι προτεινόμενοι συντελεστές q , ιδιαίτερα ως προς το στόχο της επίτευξης μιας ομοιόμορφης διακινδύνευσης μεταξύ κτιρίων ανά την Ευρώπη, ανεξαρτήτως του δομικού συστήματος και της τοποθεσίας.

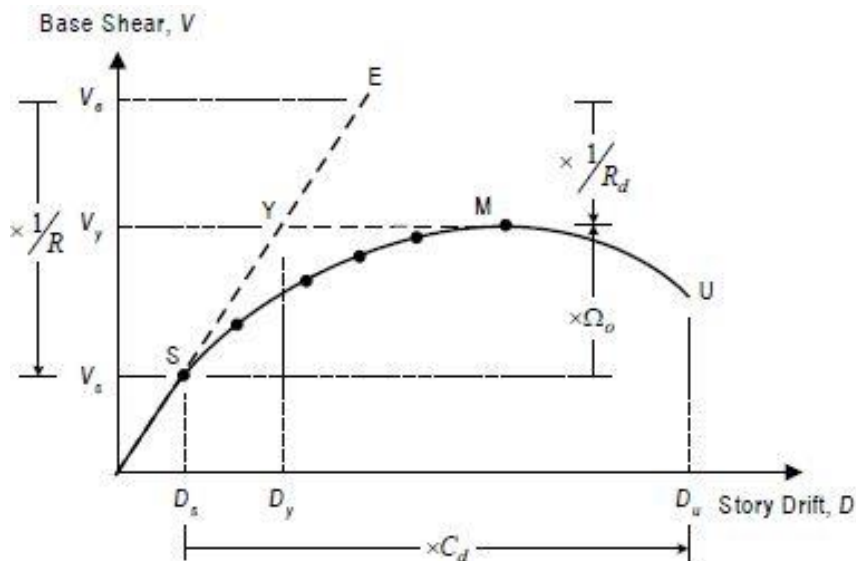


Σχήμα 1: Η βασική αρχή χρήσης του συντελεστή συμπεριφοράς q για σχεδιασμό.

Η διαφορά αυτή φαίνεται ιδιαίτερα έντονα κατά τη σύγκριση με τα πρότυπα των ΗΠΑ. Βάσει του τρέχοντος κανονισμού EN1998-1, για την Ευρώπη προτείνονται συντελεστές q της τάξης του 2.5 – 6.5 οι οποίοι εμφανώς αγνοούν μέρος της υπεραντοχής, αφού λαμβάνουν ως βάση υπολογισμού της την πρώτη διαρροή της σχεδιασμένης κατασκευής, και όχι την αρχικώς εκτιμηθείσα τέμνουσα βάσης για το σχεδιασμό (Σχήμα 2). Αντιθέτως, στις ΗΠΑ, το πρότυπο FEMA P-695 [3] έχει πλήρως καθορίσει τον τρόπο υπολογισμού των αντίστοιχων συντελεστών R . Προτείνονται γενικότερα υψηλότεροι συντελεστές R , κυρίως καθότι η εκτίμηση της υπεραντοχής βασίζεται στην αρχική εκτίμηση της τέμνουσα βάσης κατά το σχεδιασμό (Σχήμα 3), αντί της τελικώς επιτυγχανόμενης τιμής διαρροής, ενώ έχουν εκτελεστεί εκτεταμένες αναλύσεις για την τεκμηριωμένη ενσωμάτωση συμβατικών και νέων δομικών συστημάτων στον κανονισμό με τα κατάλληλα R .



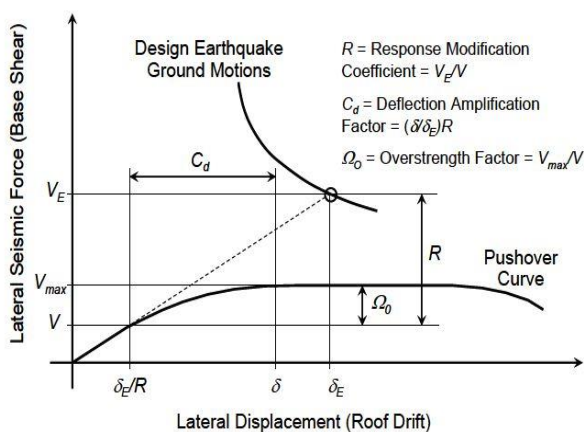
Σχήμα 2: Ο συντελεστής q κατά τον EN1998-1 [1].



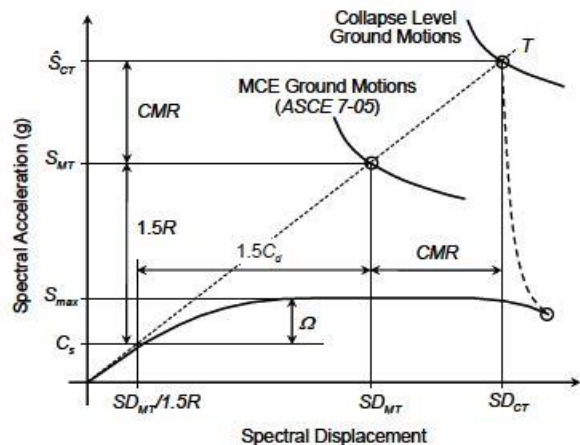
Σχήμα 3: Ο συντελεστής R κατά τους κανονισμούς των ΗΠΑ [4].

2 ΣΤΑΤΙΚΗ Ή ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ;

Κατά τη στατική ανελαστική μέθοδο, ο συντελεστής q (ή R) συνηθέστερα υπολογίζεται ως το γινόμενο του συντελεστή υπεραντοχής και του συντελεστή συμπεριφοράς λόγω πλαστιμότητας. Ο συντελεστής υπεραντοχής είναι ο $\Omega = V_{\max}/V_{\text{design}}$ κατά τους κανονισμούς των ΗΠΑ ή a_u/a_1 κατά τον EN1998-1, όπου $V_{\max} = a_u$ είναι η μέγιστη τέμνουσα βάσης που επιτυγχάνεται επί της καμπύλης ικανότητας, V_{design} η τέμνουσα βάσης όπως προκύπτει από το φάσμα σχεδιασμού και a_1 η τέμνουσα βάσης που αντιστοιχεί στην εμφάνιση της πρώτης πλαστικοποίησης μέλους (ή πρώτης εμφάνισης πλαστικής άρθρωσης σε πλαισιακά συστήματα) κατά την ανάλυση (Σχήμα 4). Ο συντελεστής συμπεριφοράς λόγω πλαστιμότητας, q_{μ} , συνήθως θεωρείται ίσος με την πλαστιμότητα του συστήματος (θεώρηση ισοδύναμη με το «νόμο ίσων μετατοπίσεων»), υπολογιζόμενος ως μετακίνηση κατάρρευσης δια τη μετακίνηση πλήρους πλαστικοποίησης, ή ισοδύναμα ως ελαστική τέμνουσα βάσης σχεδιασμού δια V_{\max} (Σχήμα 2).



Σχήμα 4α: Ορισμός q βάσει στατικής ανάλυσης (από FEMA P695 [3]).



Σχήμα 4β: Ορισμός q βάσει δυναμικής ανάλυσης (από FEMA P695 [3]).

Η χρήση δυναμικών αναλύσεων (πχ. FEMA P695 [3]), προσφέρει εν γένει υψηλότερη πιστότητα στα αποτελέσματα, από την άλλη όμως απαιτεί πολλαπλά επιταχυνσιογραφήματα και επίπονες αναλύσεις, ενώ εισαγάγει καινά δαιμόνια, που έχουν να κάνουν με τη δυσκολία στην απευθείας εκτίμηση ενός συντελεστή q . Αν και έχουν προταθεί μέθοδοι (π.χ. Ballio et al. [5], Setti [6]) για την απευθείας εκτίμηση του q , αυτές δεν έχουν επαληθευθεί βάσει αυστηρών κριτηρίων. Συνηθέστερα, απαιτούνται επαναλήψεις, καθώς οι δυναμικές αναλύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν κυρίως για αποτίμηση μιας κατασκευής (και ενός προτεινόμενου συντελεστή q) βάσει δεδομένων κριτηρίων επιτελεστικότητας, αλλά όχι για την εκτίμηση της ακριβούς τιμής. Αυτό το πρόβλημα μας οδηγεί στο αμέσως επόμενο ερώτημα προς διερεύνηση.

3 ΑΜΕΣΗ Ή ΕΜΜΕΣΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ;

Είτε χρησιμοποιείται η στατική είτε η δυναμική προσέγγιση στην εκτίμηση του συντελεστή συμπεριφοράς, η πορεία της εκτίμησης μπορεί να γίνει είτε άμεσα, με απευθείας ορισμό μιας νέας τιμής q βάσει των αναλύσεων ενός συνόλου αρχέτυπων κατασκευών, είτε έμμεσα, μέσω της επαλήθευσης συγκεκριμένων κριτηρίων επιτελεστικότητας. Οι δύο μέθοδοι διαφέρουν ουσιαστικά και ως προς την πρακτική τους, αλλά και ως προς τη φιλοσοφία τους

Από πρακτικής πλευράς, στην περίπτωση του άμεσου ορισμού, είθισται να μη γίνονται επαναλήψεις επανασχεδιασμού και αποτίμησης, ιδίως αν η αρχικώς χρησιμοποιηθείσα τιμή με την οποία έγινε ο σχεδιασμός και η τελικώς υπολογιζόμενη τιμή δεν διαφέρουν «σημαντικά». Αντιθέτως, η χρήση της μεθοδολογίας επαλήθευσης οδηγεί σε επαναλήψεις σχεδιασμού και αποτίμησης, καθότι δεν εκτιμάται η τιμή του q , αλλά απλώς λαμβάνουμε ένα ναι ή ένα όχι ως προς το αν επιτυγχάνεται η ζητούμενη επιτελεστικότητα. Αν ναι, τότε μπορούμε να αυξήσουμε το q , άλλως πρέπει να το μειώσουμε. Αν υπάρξει αλλαγή του q , τότε οφείλουμε να επαναλάβουμε τη διαδικασία σχεδιασμού και να επανεκτιμήσουμε την επιτελεστικότητα έως ότου η τιμή του q με την οποία σχεδιάστηκαν οι αρχέτυπες κατασκευές να συγκλίνει στην υπολογιζόμενη τιμή του q μετά το πέρας των επαναλήψεων. Επομένως, η μεθοδολογία επαλήθευσης εμφανίζεται ως σημαντικά πιο δαπανηρή στην εφαρμογή της.

Από την άποψη της φιλοσοφίας εφαρμογής, όμως, η μέθοδος επαλήθευσης πλεονεκτεί σημαντικά, καθότι επιτρέπει την ξεκάθαρη σύνδεση του συντελεστή q με συγκεκριμένους στόχους επιτελεστικότητας. Αυτός είναι και ο βασικός λόγος της χρήσης της από τις οδηγίες FEMA P695 [3]. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος της άμεσης εκτίμησης, αν και απλούστερη στην εφαρμογή της, βασίζεται κυρίως σε προσεγγίσεις αμφίβολης αξιοπιστίας. Συνήθως, τέτοιες προσεγγίσεις που επιτρέπουν άμεση εκτίμηση του q είτε προέρχονται από χονδρικά στατιστικά ευρήματα (π.χ. νόμος ίσων μετατοπίσεων), είτε από εμπειρικές εκτιμήσεις που δεν έχουν ευρεία εφαρμογή σε κάθε τύπο δομικού συστήματος ανεξαρτήτως πλαστιμότητας. Με άλλα λόγια, η φαινομενική απλότητα της «απευθείας εκτίμησης» φέρνει μαζί της και μια αποσύνδεση από την αυστηρώς επιστημονική βάση ποσοτικής εκτίμησης του q η οποία δεν είναι σαφές ότι μπορεί να προσδώσει ενιαίο επίπεδο ασφάλειας σε οποιαδήποτε κατασκευή, είτε ψαθυρή, είτε όλκιμη, με διαφορετικούς μηχανισμούς αστοχίας.

4 ΜΕ ΠΟΙΟ ΜΕΤΡΟ ΕΝΤΑΣΗΣ;

Ένα λιγότερο εμφανές ερώτημα αφορά την επιλογή του μέτρου έντασης βάσει του οποίου θα γίνει η εκτίμηση του q . Ο λόγος είναι ότι οι περισσότερες μεθοδολογίες κάνουν (συνειδητά ή ασυνειδητά) την ίδια κλασική επιλογή της φασματικής επιτάχυνσης πρώτης ιδιομορφής με 5% ιξώδη απόσβεση, $S_a(T_1)$. Είναι πρακτικώς η μοναδική επιλογή που υφίσταται αν χρησιμοποιηθεί η στατική προσέγγιση και φέρνει μαζί της όλα τα προβλήματα της ανελαστικής στατικής μεθόδου. Συγκεκριμένα, αγνοεί τις ανώτερες και «επιμηκυμένες» ιδιομορφές (λόγω πλαστικοποίησης). Επιπλέον, όταν χρησιμοποιείται η δυναμική μέθοδος, χρειάζεται σχετικώς μεγάλους συντελεστές κλιμάκωσης για την επίτευξη της κατάρρευσης και απαιτεί διόρθωση λόγω σχήματος του φάσματος για την αμερόληπτη εκτίμηση του q [3].

Μια προσφάτως προταθείσα επιλογή που δείχνει να κερδίζει έδαφος για την εκτέλεση δυναμικών αναλύσεων είναι το $AvgS_a$ [7–13]. Πρόκειται για το γεωμετρικό μέσο πολλαπλών τιμών φασματικής επιτάχυνσης S_a (με 5% απόσβεση) σε περιόδους T_{Ri} ($i = 1 \dots n$) που χαρακτηρίζουν όλη την κλάση αρχέτυπων κτιρίων που αναλύονται:

$$AvgS_a(T_{Ri}) = \left(\prod_{i=1}^n S_a(T_{Ri}) \right)^{1/n} \quad (1)$$

Κάθε τιμή S_a στην Εξίσωση (1) είναι στην πραγματικότητα ο γεωμετρικός μέσος όρος των δύο αντίστοιχων τιμών που υπολογίζονται για τις οριζόντιες συνιστώσες κάθε καταγραφής, παρά μια τυχαία επιλογή μίας εξ' αυτών. Οι περίοδοι T_{Ri} μπορούν να επιλεγούν σε ίσα διαστήματα εντός του διαστήματος μεταξύ μιας χαμηλής περιόδου T_L που αντιπροσωπεύει τη δεύτερη ή τρίτη ιδιομορφή και μιας υψηλής περιόδου T_H που αντιπροσωπεύει την «επιμηκυμένη» πρώτη ιδιοπερίοδο. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης του $AvgS_a$ είναι πολλαπλά, καθότι παρέχεται υψηλή αμεροληψία [8,10, 12], χαμηλή διασπορά της απόκρισης [7–13], και χαμηλοί συντελεστές κλιμάκωσης για την επίτευξη κατάρρευσης.

Performance Level

	Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention
Frequent 95 yrs	DL		
Occasional 475 yrs		LS	
Rare 2475 years			CP

Design level
10% in 50yrs

FEMA P695 basis
1-2% in 50yrs

Σχήμα 5: Οριακές καταστάσεις προς ορισμό του συντελεστή q .

5 ΜΕ ΠΟΣΕΣ ΚΑΙ ΠΟΙΕΣ ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ;

Η χρήση της μεθόδου επαλήθευσης, φέρνει μαζί της και τη δυνατότητα για την επαλήθευση των κατασκευών σε πολλαπλές οριακές καταστάσεις (βλέπε π.χ. Σχήμα 5). Γενικότερα η FEMA P695 [3] χρησιμοποιεί την πλήρη κατάρρευση της κατασκευής, ενώ ο EN1998-1 δείχνει να βασίζεται στην προστασία ζωής, παρέχοντας εχέγγυα (όμως χωρίς ποσοτική τεκμηρίωση) για την πρόληψη κατάρρευσης. Μια μεθοδολογία επαλήθευσης συμβατή με τον EN1998-1 δίνει τη δυνατότητα να ενσωματωθούν και οι δύο αυτές οριακές καταστάσεις ώστε να εκτιμηθούν συντελεστές q με επαρκή τεκμηρίωση και σε πρόληψη κατάρρευσης και σε προστασία ζωής και να παρέχεται η επιθυμητή ασφάλεια και στις δύο περιπτώσεις, αντί απλά να υπονοείται.

6 ΒΑΣΕΙ ΕΝΤΑΣΗΣ Ή ΒΑΣΕΙ ΔΙΑΚΙΝΔΥΝΕΥΣΗΣ;

Η μέθοδος της επαλήθευσης επιβάλλει και την ανάγκη ορισμού της βάσης με την οποία θα διενεργηθεί η εν λόγω επαλήθευση. Συγκεκριμένα η μέθοδος της FEMA P695 επαληθεύει το q βάσει έναν έλεγχο επιπέδου έντασης. Αν και η μέθοδος αυτή είναι πιθανοτική, και όχι προσδιοριστική, στην πραγματικότητα η χρήση της είναι εφικτή μόνο με τη χρήση φασμάτων στόχευσης διακινδύνευσης (risk-targeted spectra) τα οποία είναι διαθέσιμα μόνο στις ΗΠΑ. Ακόμα και έτσι όμως, είναι απλά μια προσέγγιση της πλήρους πιθανοτικής εκτίμησης με μη αμελητέα περιθώρια σφάλματος. Αντιθέτως, η μέθοδος επαλήθευσης βάσει διακινδύνευσης δεν έχει τέτοιους περιορισμούς και διαθέτει υψηλότερη ακρίβεια. Επομένως κρίνεται ως πλεονεκτικότερη, τουλάχιστον μέχρι της ενσωμάτωσης φασμάτων στόχευσης διακινδύνευσης στον EN1998-1.

7 ΤΕΛΙΚΗ ΕΤΥΜΗΓΟΡΙΑ

Εν τέλει, το ζητούμενο είναι απλό: Τι προτείνουμε για εφαρμογή στον Ευρωκώδικα ως προς το καθένα από τα πέντε ζητήματα που εξετάσαμε;

- i. Στατική ή Δυναμική Ανάλυση: Προτείνεται η χρήση στατικής ανάλυσης μόνο για μια πρώτη εκτίμηση του συντελεστή q . Είναι σαφώς προτιμότερο να χρησιμοποιούνται δυναμικές αναλύσεις υπό πολλαπλά επιταχυνσιογραφήματα για την τελική εκτίμηση και επαλήθευση του συντελεστή.
- ii. Άμεση ή έμμεση εκτίμηση: Έμμεση εκτίμηση μέσω επαναληπτικής επαλήθευσης των προτεινόμενων τιμών του συντελεστή. Είναι ακριβέστερη και δεν υπόκειται σε περιορισμούς χρήσης λόγω εμπειρικών προσεγγίσεων.
- iii. Ποιο μέτρο έντασης: Δεν τίθεται αμφισβήτηση ότι το $AvgSa$ είναι μακράν η καλύτερη επιλογή, ιδιαίτερα δεδομένου ότι πρόκειται για ολόκληρες κλάσεις κατασκευών για τις οποίες εκτιμάται το q και όχι μία μεμονωμένη.
- iv. Πόσες και ποιες οριακές καταστάσεις: Αυτό ειδικά επαφίεται σε αποφάσεις κανονιστικών επιτροπών και είναι ξεκάθαρα θέμα επιλογής. Η προτίμηση του συγγραφέα όμως είναι

προς τη χρήση τουλάχιστον δύο οριακών καταστάσεων, μίας συναφούς με την προστασία ζωής και μίας συναφούς με την πρόληψη κατάρρευσης, δεδομένου ότι προσφέρεται μια συνολική θεώρηση για τη γενικότερη μείωση βλαβών και τραυματισμών και δίνει στιβαρή πιθανοτική βάση στον EN1998-1.

- v. Βάσει εντάσεως ή διακινδύνευσης: Τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη χρήση της βάσης διακινδύνευσης είναι τέτοια που κατά τη γνώμη μας δεν τίθεται ζήτημα επιλογής.

Μια πρόταση βασισμένη στα παραπάνω στοιχεία έχει κωδικοποιηθεί και διερευνηθεί στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος INNOSEIS [14] και περιλαμβάνει 7 διακριτά βήματα:

- a. Επιλογή γεωγραφικών θέσεων, εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας και επιλογή συμβατών επιταχυνσιογραφημάτων
- β. Ορισμός και σχεδιασμός των αρχέτυπων κτιρίων βάσει μιας δοκιμαστικής τιμής του q
- γ. Δημιουργία μη γραμμικών κτιριακών προσομοιωμάτων
- δ. Αρχική εκτίμηση του q μέσω μη γραμμικής στατικής ανάλυσης
- ε. Εκτέλεση μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων
- στ. Ορισμών επιθυμητών κριτηρίων επιτελεστικότητας και εκτίμηση των καμπυλών τρωτότητας
- ζ. Αποδοχή ή απόρριψη της δοκιμαστικής τιμής q , διόρθωση και επιστροφή στο βήμα 2.

Στα μελλοντικά μας βήματα προβλέπεται η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας για συμβατικά συστήματα κτιρίων από χάλυβα ή οπλισμένο σκυρόδεμα, τόσο σχεδιασμένα με τον υφιστάμενο EN1998-1 [1] όσο και με τη επερχόμενη βελτιωμένη έκδοσή του.

8 ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα έρευνα χρηματοδοτήθηκε μερικώς από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή μέσω του Research Fund for Coal and Steel (RFCS), πρόγραμμα INNOSEIS, Grant Agreement Number 709434.

9 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. CEN. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN 1998-1:2004. European Committee for Standardization, Brussels, 2004.
2. Uang CM. Establishing R (or R_w) and Cd factors for building seismic provisions. Journal of Structural Engineering ASCE, 1991; 117(1): 19–28.
3. FEMA. Quantification of Building Seismic Performance Factors. FEMA P-695, Prepared by Applied Technology Council for Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2009.
4. SEAOC Seismology Committee. STRUCTURE Magazine 2008; 9: 30 – 32.
5. Ballio G, Perotti F, Rampazzo L, Setti P. Determinazione del fattore di struttura per costruzioni metalliche soggette a carichi assiali. II Convegno nazionale ANIDIS, L'ingegneria Sismica in Italia, Rapallo, 1984.
6. Setti P. Un metodo per la determinazione del coefficiente di struttura per le costruzioni metalliche in zona sismica. Costruzioni Metalliche 1985; 3: 128–139.
7. Cordova P, Deierlein G, Mehanny SF, Cornell CA. Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic design procedure. The Second U.S.- Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures, Sapporo, Hokkaido, 2001.

8. Vamvatsikos D, Cornell CA. Developing efficient scalar and vector intensity measures for IDA capacity estimation by incorporating elastic spectral shape information. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 2005; 34(13): 1573–1600. DOI: 10.1002/eqe.496.
9. Bianchini M, Diotallevi PP, Baker JW. Prediction of Inelastic structural response using an average of spectral accelerations. 10th Int. Conf. Struct. Saf. Reliab., Osaka, Japan: 2009.
10. Kazantzi AK, Vamvatsikos D. Intensity measure selection for vulnerability studies of building classes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 2015; 44(15): 2677–2694. DOI: 10.1002/eqe.2603.
11. Eads L, Miranda E, Lignos DG. Average spectral acceleration as an intensity measure for collapse risk assessment. *Earthq Eng Struct Dyn* 2015; 44:2057–73. doi:10.1002/eqe.2575.
12. Kohrangi M, Vamvatsikos D, Bazzurro P. Implications of Intensity Measure Selection for Seismic Loss Assessment of 3-D Buildings. *Earthq Spectra* 2016; 32:2167–89. doi:10.1193/112215EQS177M.
13. Tsantaki S, Adam C, Ibarra LF. Intensity measures that reduce collapse capacity dispersion of P-delta vulnerable simple systems. *Bull Earthq Eng* 2017; 15:1085–109. doi:10.1007/s10518-016-9994-4.
14. Vamvatsikos D, Bakalis K, Kohrangi M, Thanopoulos P, Vayas I, Castiglioni C, Kanyilmaz A, et al. Recommended procedure for EN1998-compatible behaviour factor evaluation of new structural systems. Technical Report D2.1, INNOSEIS Consortium, Athens, 2017
<http://innoseis.ntua.gr/deliverables.php?deliverable=reports>