

TACHYS OPTIKOS ELEGCHOS KTIΡΙΩΝ ME XΡΗΣΗ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ ΚΑΙ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΕΜΑΡΤΙΝΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Μεταπτυχιακός Φοιτητής

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών

Πανεπιστήμιο Πατρών

A.M. 245

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή παρουσιάζει τη συμπεριφορά μιας μεθόδου ταχέως οπτικού ελέγχου που βασίζεται στην ασαφή λογική. Η μέθοδος καταλήγει στην κατάταξη κτιρίων ανάμεσα σε πέντε τύπους ενδεχόμενης βλάβης, σε αντιστοιχία με την πιθανή εμφάνιση ενός μεγάλου σεισμικού γεγονότος. Προσαρμόσιμα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιήθηκαν για την εξάσκηση της μεθόδου, με βάση πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά το σεισμό της Πάρνηθας το 1999 από 102 κτίρια. Σκοπός της εξάσκησης ήταν η βελτίωση της μεθόδου ώστε να δίνει αποτελέσματα που αντιπροσωπεύουν αναμενόμενη βλάβη. Με τον τρόπο αυτό, η ακρίβεια και παράλληλα η αποτελεσματικότητα της μεθόδου βελτιώθηκε, παρουσιάζοντας αξιόλογα αποτελέσματα. Ωστόσο, λόγω του μικρού μεγέθους που χρησιμοποιήθηκε για τους σκοπούς της εξάσκησης η μέθοδος δεν έχει βελτιστοποιηθεί. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιώντας πληροφορίες από μεγαλύτερες βάσεις δεδομένων, η μέθοδος δύναται να βελτιώνεται συνεχώς, πράγμα που υποδηλώνει μια καλή προοπτική για τη δημιουργία μιας αξιόπιστης και σταθερής μεθόδου ταχέως προσεισμικού ελέγχου.

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μείωση της σεισμικής διακινδύνευσης είναι ένα πολυσύνθετο και δύσκολο πρόβλημα κυρίως λόγω της πολυσχιδούς φύσης του σεισμικού φαινομένου. Ο σεισμός αποτελεί ένα μείζον επιστημονικό, πολιτικό και κοινωνικό πρόβλημα. Συνεπώς, επισταμένη προσοχή πρέπει να δοθεί στην πρόληψη των ανεπιθύμητων συνεπειών στις υφιστάμενες κατασκευές, οι οποίες προφανώς είναι πιο τρωτές από ότι νέες κατασκευές που σχεδιάστηκαν με τους τελευταίους αντισεισμικούς κανονισμούς.

Ο προσεισμικός έλεγχος υφιστάμενων κατασκευών αποτελεί μέρος ενός πλαισίου διαχείρισης σεισμικού κινδύνου και στοχεύει στην υιοθέτηση μιας στρατηγικής επεμβάσεων στο δομικό απόθεμα με βάση κάποιες προτεραιότητες. Η πρώτη ολοκληρωμένη πρόταση παρουσιάστηκε στις ΗΠΑ από την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαχείρισης Καταστάσεων Ανάγκης (FEMA)^{1,2,3}. Η προτεινόμενη μεθοδολογία περιλαμβάνει τρία διαδοχικά επίπεδα αποτίμησης: Τον Ταχύ Οπτικό Έλεγχο (RVSP), την Προσεγγιστική Αποτίμηση Τρωτότητας και την Αναλυτική Αποτίμηση Σεισμικής Συμπεριφοράς. Ο Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας (ΟΑΣΠ) προσάρμοσε αυτή τη μεθοδολογία στα ελληνικά δεδομένα και πρότεινε μια μέθοδο που καθ' όμοιο τρόπο αποτελείται από τρία επίπεδα αποτίμησης¹⁷. Οι τροποποιήσεις που έγιναν στον ΤΟΕ σχετίζονται με κάποια δομικά χαρακτηριστικά που διαφέρουν στην Ελλάδα. Ονομαστικά τα χαρακτηριστικά είναι: *Ψηλό κτίριο, Κατηγορίας Εδάφους, Δομικός Τύπος, Σεισμική Ζώνη και Έτος Κατασκευής-Αντισεισμικός Κανονισμός*.

Οι μέθοδοι πρωτοβάθμιου ελέγχου που προτάθηκαν από τη FEMA και ακολούθως από τον ΟΑΣΠ είναι πιθανοτικές προσεγγίσεις στον προσεγγιστικό πρόβλημα λογικής του ΤΟΕ. Η ακρίβεια των μεθόδων αυτών στην εκτίμηση της πραγματικής τρωτότητας είναι χαμηλή^{4,5}, παρόλο που είναι σχετικά αποτελεσματικές στον καθορισμό προτεραιοτήτων για περαιτέρω διερεύνηση⁶. Επιπλέον, τα περιθώρια βελτίωσης της ακρίβειας τους είναι περιορισμένα λόγω του ότι η προτεινόμενη μεθοδολογία αντιμετωπίζει το δομικό σύστημα ως ένα σύνολο

ανεξάρτητων χαρακτηριστικών, τα οποία υποτίθεται ότι επιδρούν ξεχωριστά στη σεισμική απόκριση.

Αντιθέτως, η αντίστοιχη μεθοδολογία που βασίζεται στην Ασαφή Λογική (FL-RVSP) και προτείνεται στην παρούσα εργασία, είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιεί συλλογιστική με βάση τα ενδεχόμενα (possibilistic reasoning) και αντιμετωπίζει τις δομικές παραμέτρους με ένα ολιστικό τρόπο. Μέσω της μεθόδου εξάγεται ένα αριθμητικό αποτέλεσμα το οποίο αντιπροσωπεύει θεωρητικά ενδεχόμενη βλάβη κατά την εμφάνιση μεγάλου σεισμικού γεγονότος. Ως τέτοια, εννοούνται τα γεγονότα που παρουσιάζουν σεισμική επιτάχυνση εδάφους παραπλήσια του σεισμού σχεδιασμού.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν προσαρμόσιμα νευρωνικά δίκτυα για τη βελτίωση της ακρίβειας της μεθόδου στην εκτίμηση ενδεχόμενης βλάβης, με βάση πληροφορίες για την πραγματική σεισμική βλάβη κτιρίων. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάστηκε από τον Jang⁷ με τίτλο “Adaptive Network-based Fuzzy Inference System (ANFIS)”. Παρόμοια εργασία έχει παρουσιαστεί από τους Silva και Garcia⁸, ενώ η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί ένα στάδιο από τη συνεχιζόμενη έρευνα στο Πανεπιστήμιο Πατρών κάτω από την επίβλεψη του Αν. Καθηγητή κύριου Στέφανου Δρίτσου^{9,10,11,12}.

2. ΒΑΣΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

Η ασαφής λογική (Fuzzy Logic) είναι μια μέθοδος προσεγγιστικής συλλογιστικής, που χρησιμοποιείται για τη διαχείριση της αβεβαιότητας και ασάφειας που χαρακτηρίζει πολλά φαινόμενα. Είναι μια προσπάθεια μίμησης της ανθρώπινης συλλογιστικής, που μπορεί να θεωρηθεί ως επεξεργασία ανακριβών πληροφοριών για την εξαγωγή ενός συμπεράσματος ή τη λήψη μιας απόφασης. Στην ασαφή λογική, τα δεδομένα και οι πληροφορίες αντιπροσωπεύονται από ασαφή σύνολα, η λογική επεξεργασία γίνεται μέσω ασαφών κανόνων και τα συμπεράσματα εξάγονται με τη βοήθεια μαθηματικών σχέσεων.

2.1 ΑΣΑΦΗΣ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Το βασικό κύτταρο της ασαφούς λογικής είναι το ασαφές σύνολο. Ένα ασαφές σύνολο, f , ταυτίζεται με μια συνάρτηση συμμετοχής, μ_f , που αντιστοιχίζει ένα στοιχείο από το πεδίο τιμών, U , στο διάστημα $[0,1]$ ^{13,14,15}:

$$f = \{\mu_f = U \rightarrow [0,1]\} \quad (3)$$

Για κάθε στοιχείο x στο U , η τιμή $\mu_f(x)$ αντιπροσωπεύει το βαθμό συμμετοχής αυτού του στοιχείου στο ασαφές σύνολο, f . Αντίθετα με τα κλασσικά σύνολα, όπου ένα στοιχείο είτε ανήκει σε ένα σύνολο, είτε όχι, τα ασαφή σύνολα επιτρέπουν μερική συμμετοχή που κυμαίνεται από 0 (μη-συμμετοχή) έως 1 (πλήρης συμμετοχή). Χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ανακριβών καταστάσεων (π.χ., κακή, μέτρια, καλή) μιας γλωσσικής μεταβλητής (π.χ., κατάσταση κατασκευής). Έτσι, η $\mu_f(x)$ είναι στην πραγματικότητα ένα μέτρο της ομοιότητας του στοιχείου x με την ανακριβή κατάσταση που σχετίζεται με το ασαφές σύνολο, f .¹⁶ Διαφορετικά, η συνάρτηση, $\mu_f(x)$, υποδηλώνει το ενδεχόμενο απόλυτης ταύτισης του στοιχείου x με την ανακριβή κατάσταση που αντιστοιχεί στο ασαφές σύνολο, f .

Οι ανακριβείς πληροφορίες αποτελούν το χώρο εισαγόμενων δεδομένων σε ένα ασαφές επαγωγικό σύστημα (fis). Ο σκοπός της ασαφούς συλλογιστικής είναι να αντιστοιχίσει ένα χώρο εισαγόμενων δεδομένων με ένα συμπέρασμα, που είναι στην ουσία ένας χώρος εξερχόμενων δεδομένων. Αυτό πραγματοποιείται μέσω υποθετικών προτάσεων, που λέγονται ασαφείς κανόνες. Μια χαρακτηριστική μορφή ασαφούς κανόνα είναι η εξής:

Αν (ηγούμενο τμήμα) τότε (επακόλουθο τμήμα) ή Αν x είναι A ΚΑΙ y είναι B τότε z είναι C

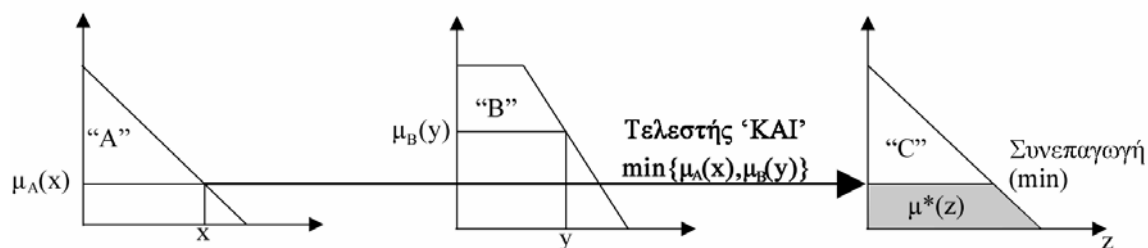
Στο ηγούμενο τμήμα, τα ‘ x ’ και ‘ y ’ είναι στοιχεία των εισερχόμενων μεταβλητών, ενώ τα ‘ A ’ και ‘ B ’ είναι ασαφή σύνολα. Έτσι, οι φράσεις ‘ x είναι A ’ και ‘ y είναι B ’, αντιπροσωπεύουν τα $\mu_A(x)$ και $\mu_B(y)$ αντίστοιχα. Ο λογικός τελεστής ‘ΚΑΙ’, που χρησιμοποιείται στην παρούσα μελέτη αντιστοιχεί στη συνάρτηση ελαχίστου, \min . Ως εκ τούτου, το ηγούμενο τμήμα μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$\text{Ηγούμενο τμήμα} \xrightarrow{\text{ΚΑΙ}} \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \quad (4)$$

Στο επακόλουθο τμήμα, το ‘ z ’ αντιστοιχεί σε ένα στοιχείο της εξερχόμενης μεταβλητής, που βασίζεται στο ηγούμενο τμήμα. Το ‘ C ’ αντιστοιχεί είτε σε ασαφές σύνολο (Mamdani fis), είτε σε μια σταθερή τιμή (Sugeno fis μηδενικής τάξης).

2.1.1. Mamdani fis

Στα συστήματα τύπου Mamdani, το εξαγόμενο αποτέλεσμα ενός κανόνα υπολογίζεται με εφαρμογή του αποτελέσματος του ηγούμενου στο επακόλουθο τμήμα. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται συνεπαγωγή και περιλαμβάνει την τροποποίηση του ασαφούς συνόλου ‘ C ’ σύμφωνα με το βαθμό συμμετοχής που καθορίζεται από το ηγούμενο τμήμα ($\min(\mu_A(x), \mu_B(y))$). Ο πιο συνήθης τρόπος τροποποίησης του εξερχόμενου συνόλου είναι η τομή του συνόλου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του ελαχίστου, \min method. Η μαθηματική ερμηνεία ενός ασαφούς κανόνα φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1. Ασαφής κανόνας-Mamdani fis

Κάθε ασαφές σύστημα αποτελείται από αρκετούς κανόνες. Από τη συνεπαγωγή κάθε κανόνα, λαμβάνονται αρκετά τεμημένα σύνολα, $\mu^*_i(z)$. Η αναγωγή των συνόλων αυτών σε ένα και μοναδικό σύνολο γίνεται με τη μέθοδο του μεγίστου, \max method, που εκφράζεται από την ένωση όλων των τεμημένων συνόλων κατά την Εξίσωση 5.

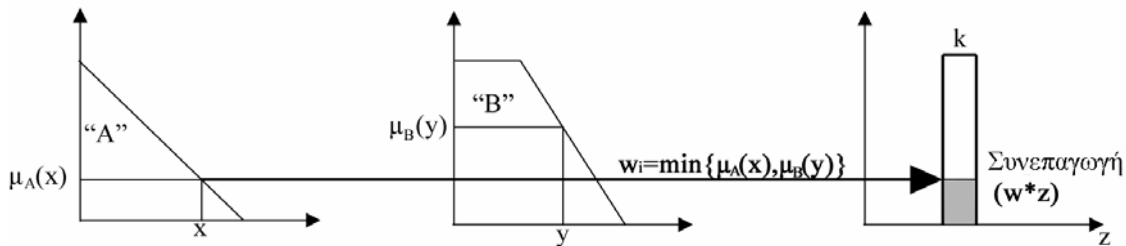
$$\max \text{ method} = \mu^*_1(z) \cup \mu^*_2(z) \cup \dots \cup \mu^*_n(z) = \mu(z) \quad (5)$$

όπου n , ο αριθμός των κανόνων. Το τελικό σύνολο, $\mu(z)$, συνθέτει τα εξαγόμενα σύνολα όλων των κανόνων και είναι ορισμένο σε ένα ευρύ πεδίο τιμών. Συνεπώς, πρέπει να αναχθεί σε μία τιμή, z^* , που θα αντιπροσωπεύει το τελικό συμπέρασμα ή την τελική απόφαση. Η διαδικασία αυτή λέγεται αποσαφήνιση. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία είναι η κεντροβαρική, που δίνει το κέντρο βάρους του συνόλου $\mu(z)$ και εκφράζεται ως ακολούθως:

$$z^* = \frac{\int \mu(z) \cdot z dz}{\int \mu(z) dz} \quad (6)$$

2.1.2. Sugeno fis

Τα συστήματα τύπου Mamdani και τύπου Sugeno διαφέρουν στην εκτίμηση του τελικού αποτελέσματος. Η φράση “z είναι C” ενός τυπικού ασαφούς κανόνα, μπορεί να εκφραστεί από τη σχέση “z=k_i”, όπου k, μια σταθερή τιμή και i, ο αριθμός του κανόνα. Η λογική λειτουργία στο ηγούμενο τμήμα εκφράζεται από το βάρος του κανόνα, w_i, το οποίο αντιστοιχεί στο $\min(\mu_A(x), \mu_B(x))$. Η συνεπαγωγή είναι ένας απλός πολλαπλασιασμός των w_i και k_i και η αναγωγή των αποτελεσμάτων όλων των κανόνων σε ένα σύνολο, γίνεται με απλή παράθεση των σταθερών τιμών σε ένα γράφημα. Η λειτουργία ενός ασαφούς κανόνα στην περίπτωση των Sugeno fis παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Ασαφής κανόνας-Sugeno fis

Η διαδικασία αποσαφήνισης υπολογίζει το ανισοβαρή μέσο όρο, k*, των εξερχόμενων τιμών όλων των κανόνων, όπως φαίνεται και στην Εξίσωση 7.

$$k^* = \frac{\sum_i w_i * k_i}{\sum_i w_i} \quad (7)$$

3. ΤΑΧΥΣ ΟΠΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΗΣ ΑΣΑΦΟΥΣ ΛΟΓΙΚΗΣ

Η FL-RVSP αντιστοιχίζει πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ) σε ένα συμπέρασμα που χρησιμοποιείται για τον καθορισμό προτεραιοτήτων για περαιτέρω ανάλυση ανάμεσα στα εξεταζόμενα κτίρια. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια ασαφής επαγωγική διαδικασία, κατά την οποία οι πληροφορίες που συλλέγονται στο πεδίο αποτελούν τις εισερχόμενες τιμές για τις εισερχόμενες μεταβλητές που αντιστοιχούν στα διάφορα δομικά χαρακτηριστικά.

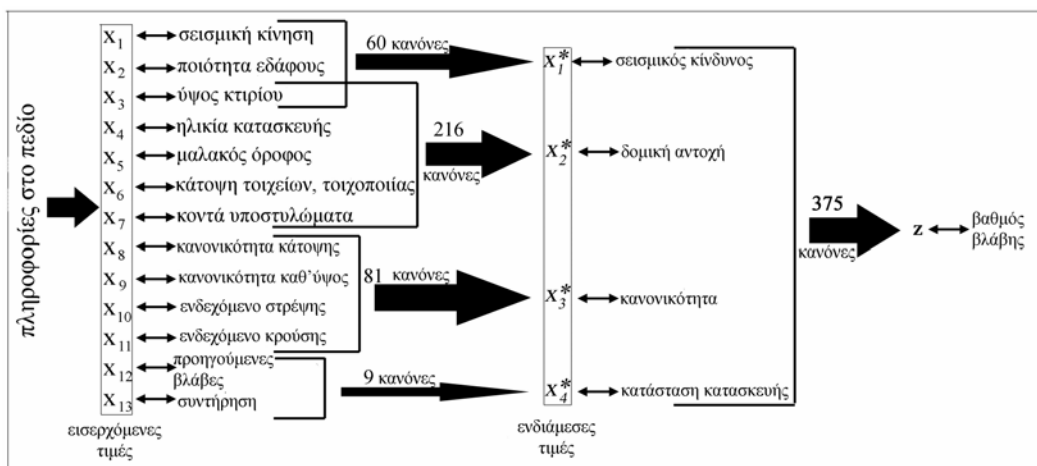
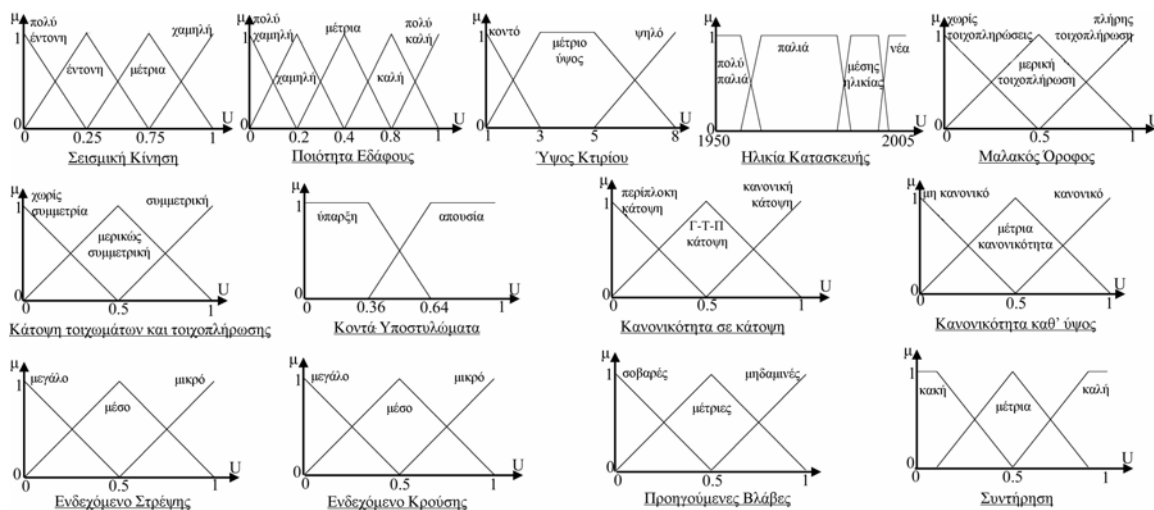


Figure 3. Αναπαράσταση συστήματος

Οι μεταβλητές αυτές συσχετίζονται με ενδιάμεσες μεταβλητές, μέσω ασαφών κανόνων. Ακολούθως, οι ενδιάμεσες μεταβλητές συνδέονται μέσω πρόσθετων ασαφών κανόνων για την παραγωγή της εξερχόμενης μεταβλητής. Η ασαφής επαγωγική διαδικασία της μεθόδου παρουσιάζεται περιληπτικά στο Σχήμα 3. Το αρχικό σύστημα (προσδιορισμός μεταβλητών, μόρφωση κανόνων) σχεδιάστηκε από τους Mandas and Dritsos¹¹.

3.1. ΕΙΣΕΡΧΟΜΕΝΕΣ ΚΑΙ ΕΝΔΙΑΜΕΣΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ

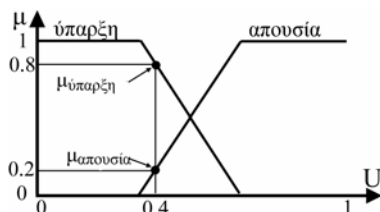
Οι εισερχόμενες μεταβλητές αντιπροσωπεύουν δομικά χαρακτηριστικά που αποδεδειγμένα επηρεάζουν τη σεισμική απόκριση. Ονομαστικά, αυτές είναι: *Σεισμική κίνηση, ποιότητα εδάφους, ύψος κτιρίου, ηλικία κατασκευής, μαλακός όροφος, κάτοψη τοιχομάτων και τοιχοπληρώσεων, κοντά υποστυλώματα, κανονικότητα σε κάτοψη, κανονικότητα καθ' ύψος, ενδεχόμενο στρέψης, ενδεχόμενο κρούσης, προηγούμενες βλάβες και συντήρηση*. Κάθε μεταβλητή περιγράφεται με γλωσσικούς όρους που προσδιορίζουν την κατάσταση τους. Οι όροι αυτοί αντιστοιχούν σε ασαφή σύνολα, τα οποία ορίζονται στο πεδίο ορισμού, U , μέσω συναρτήσεων συμμετοχής. Οι εισερχόμενες μεταβλητές παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Εισερχόμενες Μεταβλητές

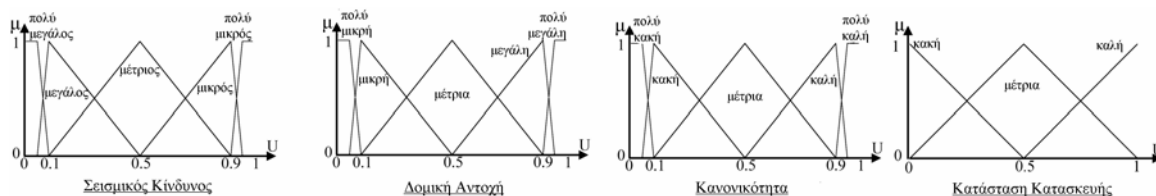
Κατά τον ΤΟΕ, ο μηχανικός έρχεται αντιμέτωπος με πληροφορίες για διάφορα δομικά χαρακτηριστικά, που στερούν σε λεπτομέρεια και συνεπώς είναι ανεπαρκείς στην εξαγωγή ενός κατηγορηματικού συμπεράσματος για την κατάσταση κάθε χαρακτηριστικού. Ο έλεγχος, δηλαδή, γίνεται εξ αντικειμένου προσεγγιστικά με χρήση γλωσσικών όρων που υποδηλώνουν ενδεχόμενο. Για παράδειγμα, το φαινόμενο του κοντού υποστυλώματος συνήθως συμβαίνει όταν ένα υποστύλωμα έχει μικρότερο ύψος σε σύγκριση με υποστυλώματα του ίδιου ή γειτονικών ορόφων. Ακόμα και αν το φαινόμενο ύψος είναι αρκετά μικρότερο από ότι στα γειτονικά υποστυλώματα, η επιρροή του στη σεισμική απόκριση σχετίζεται και με την κατασκευαστική ποιότητα. Οι πιο πρόσφατοι κανονισμοί προβλέπουν κατασκευαστικές διατάξεις για την απαλοιφή των δυσμενών επιπτώσεων των κοντών υποστυλωμάτων. Συνεπώς, η ανθρώπινη συλλογιστική σε μια τέτοια περίπτωση θα κατέληγε σε μια εκτίμηση του τύπου “*υπάρχει ένα σοβαρό ενδεχόμενο το υποστύλωμα να συμπεριφερθεί ως κοντό, και ένα μικρότερο ενδεχόμενο να μην υπάρχει καμία αρνητική συνέπεια*”. Ο ορισμός των εισερχόμενων μεταβλητών στην ουσία αντιστοιχίζει ένα εύρος ενδεχομένων για την κατάσταση κάθε δομικού χαρακτηριστικού. Άρα, η πρόταση για την κατάσταση του κοντού υποστυλώματος μπορεί να εκφραστεί με κατάλληλη επιλογή μιας τιμής, α , στο πεδίο ορισμού της αντίστοιχης μεταβλητής για την οποία θα ισχύει

$\mu_{\text{παρξη}}(a) > \mu_{\text{απουσία}}(a)$. Σύμφωνα με τον ορισμό της μεταβλητής ‘Κοντά Υποστυλώματα’, μια τέτοια τιμή θα ήταν η $a=0.4$ για την οποία $\mu_{\text{παρξη}} = 0.8$ και $\mu_{\text{απουσία}} = 0.2$, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.



Σχήμα 5. Μεταβλητή ‘Κοντά Υποστυλώματα’

Είναι προφανές ότι ο αριθμός των κανόνων που ορίζουν την αλληλεπίδραση των μεταβλητών ισούται με το πλήθος των πιθανών συνδυασμών μεταξύ των ασαφών συνόλων που ορίζουν κάθε μεταβλητή. Μια ευθεία συσχέτιση των εισερχόμενων μεταβλητών για την εξαγωγή του βαθμού βλάβης θα οδηγούσε σε ένα σύστημα 2361960 κανόνων. Ένα τέτοιο πλήθος κανόνων θα ήταν αδύνατο να οριστεί και θα συνιστούσε ένα πολύ απαιτητικό σύστημα, από άποψη υπολογιστικής ισχύος. Για το λόγο αυτό, οι εισερχόμενες μεταβλητές κατηγοριοποιήθηκαν σε αντιστοιχία με τέσσερις ενδιάμεσες μεταβλητές, που αποτελούν επακόλουθες ιδιότητες της κατασκευής. Συγκεκριμένα, αυτές είναι: Σεισμικός κίνδυνος, δομική αντοχή, κανονικότητα και κατάσταση κατασκευής. Οι τιμές των ενδιάμεσων μεταβλητών υπολογίζονται με ασαφή επαγωγική επεξεργασία των εισερχόμενων μεταβλητών. Έτσι, κάθε ομάδα ηγούμενων εισερχόμενων και επακόλουθων εξερχόμενων μεταβλητών αποτελεί ένα ασαφές επαγωγικό σύστημα. Ο ορισμός των ενδιάμεσων μεταβλητών παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. Ενδιάμεσες μεταβλητές

3.2. ΕΞΕΡΧΟΜΕΝΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ

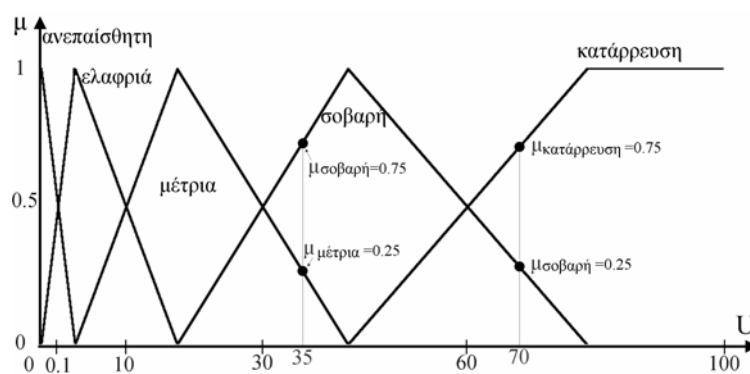
Η εξερχόμενη μεταβλητή ‘βαθμός βλάβης’ αντιπροσωπεύει το ενδεχόμενο εμφάνισης συγκεκριμένου τύπου βλάβης σε μια κατασκευή. Προσδιορίζει ένα σύνολο ενδεχομένων σε αντιστοιχία με πέντε τύπους βλάβης. Συγκεκριμένα: ανεπαίσθητη, ελαφριά, μέτρια, σοβαρή βλάβη και κατάρρευση. Οι τύποι αυτοί αναφέρονται στα επίπεδα επιτελεστικότητας: *συνεχής λειτουργία, άμεση χρήση μετά το σεισμό, προστασία ζωής και οιονεί κατάρρευση*.¹⁸ Οι διάφορες καταστάσεις βλάβης αποδόθηκαν σε αντίστοιχα ασαφή σύνολα, τα οποία ήταν ορισμένα στο πεδίο τιμών [0,100] της μεταβλητής. Για τον ορισμό των ασαφών συνόλων λήφθηκε υπόψη η συσχέτιση του δείκτη βλάβης και των μορφών βλάβης, σύμφωνα με τις προδιαγραφές της επιτροπής εφαρμοσμένης τεχνολογίας (ATC)¹⁹. Έτσι, οι συναρτήσεις συμμετοχής που ορίζουν κάθε ασαφές σύνολο δίνουν τιμές μεγαλύτερες του 0.5 στα υποδιαστήματα που προβλέπει η ATC (Πίνακας 1), έτσι ώστε να υποδηλώνουν μεγαλύτερο ενδεχόμενο εμφάνισης του αντίστοιχου τύπου βλάβης. Η εξερχόμενη μεταβλητή παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 7.

Η φυσική σημασία του βαθμού βλάβης ($\beta\beta$) είναι ότι αντιπροσωπεύει ενδεχόμενη τρωτότητα. Συνεπώς, όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός βλάβης, τόσο μεγαλύτερη είναι η

ενδεχόμενη τρωτότητα της υπό εξέταση κατασκευής. Δεδομένων δύο κτιρίων, λοιπόν, ο ββ χρησιμοποιείται για να καθορίσει το ενδεχόμενο το ένα να είναι πιο τρωτό από το άλλο. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της αναμενόμενης σεισμικής βλάβης σε μεγάλο σεισμό, σε όρους ενδεχομένων. Για παράδειγμα, μεταξύ δύο κτιρίων με $\beta\beta_1=70$ και $\beta\beta_2=35$, το πρώτο κτίριο είναι ενδεχομένως πιο τρωτό από το δεύτερο. Παράλληλα, ο ββ₁ δίνει $\mu_{κατάρρευση}=0.75$ και $\mu_{σοβαρή}=0.25$ (Σχήμα 7), που σημαίνει ότι υπάρχει μεγάλο ενδεχόμενο κατάρρευσης για το πρώτο κτίριο σε μεγάλο σεισμικό γεγονός. Ομοίως, ο ββ₂ δίνει $\mu_{σοβαρή}=0.75$ και $\mu_{μέτρια}=0.25$ οδηγώντας στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μεγάλο ενδεχόμενο σοβαρής βλάβης για το δεύτερο κτίριο.

Πίνακας 1. Συσχέτιση δείκτη βλάβης και τύπου βλάβης

Τύπος Βλάβης	Δείκτης Βλάβης
Ανεπαίσθητη	0.0-0.1
Ελαφριά	0.1-10
Μέτρια	10-30
Σοβαρή	30-60
Κατάρρευση	60-100



Σχήμα 7. Εξερχόμενη μεταβλητή 'Βαθμός Βλάβης'

3.3. ΜΟΡΦΩΣΗ ΚΑΝΟΝΩΝ-ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Οι ασαφείς κανόνες καθορίζουν τη συσχέτιση μεταξύ των ηγούμενων μεταβλητών για την εξαγωγή της επακόλουθης εξερχόμενης μεταβλητής. Για δεδομένο fis, οι ασαφείς κανόνες περιλαμβάνουν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των γλωσσικών μεταβλητών που περιγράφουν την κατάσταση κάθε εισερχόμενη μεταβλητή. Για κάθε συνδυασμό αντιστοιχίζεται μια κρίση για την ενδεχόμενη επίδραση του στην κατάσταση της εξερχόμενης μεταβλητής. Συνεπώς, οι ασαφείς κανόνες εμπεριέχουν την κρίση για την ενδεχόμενη επίδραση στη σεισμική απόκριση ενός κτιρίου, δεδομένων των πληροφοριών για τα δομικά του χαρακτηριστικά. Κατά συνέπεια, η εγκυρότητα της διαδικασίας εξαρτάται κυρίως από τον ορισμό των ασαφών κανόνων για κάθε ασαφές επαγωγικό σύστημα. Ο αρχικός ορισμός των κανόνων έγινε από ειδικούς.

Όσο αφορά στη λειτουργία της προτεινόμενης μεθοδολογίας, αυτή μπορεί να συνοψιστεί ως εξής: Ο μηχανικός καλείται να προσδώσει μια τιμή σε κάθε εισερχόμενη μεταβλητή σύμφωνα με ασαφή σύνολα που την ορίζουν. Ακολουθώντας, μέσω της επαγωγικής διαδικασίας

που περιγράφεται στο προηγούμενο εδάφιο, υπολογίζονται οι ενδιάμεσες μεταβλητές μέσω των αντίστοιχων ασαφών συστημάτων. Οι εξαγόμενες τιμές γίνονται εισερχόμενες μεταβλητές για το σύστημα που αντιστοιχεί στη μεταβλητή ‘βαθμός βλάβης’ και το τελικό αποτέλεσμα υπολογίζεται καθ’ όμοιο τρόπο. Στην παρούσα εργασία, η επαγωγική διαδικασία πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Matlab[®].²⁰

4. Η ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ANFIS ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΣΚΗΣΗ ΤΗΣ FL-RVSP

4.1. ΒΑΣΙΚΗ ΙΔΕΑ

Οι διάφορες βάσεις δεδομένων που περιλαμβάνουν πληροφορίες για τη σεισμική συμπεριφορά κτιρίων παρέχουν καταγεγραμμένη και την πραγματική βλάβη που υπέστησαν, στο σεισμό που αναφέρονται. Έτσι, για κάθε κτίριο ο βαθμός βλάβης μπορεί να συγκριθεί με μια επιθυμητή τιμή που προκύπτει από την κατάλληλη ποσοτικοποίηση της παρατηρημένης βλάβης. Συνεπώς, μπορεί να υπολογιστεί ένα σφάλμα ως η διαφορά μεταξύ των επιθυμητών και των εκτιμημένων από τη μέθοδο (πραγματικών) βαθμών βλάβης. Με αυτό τον τρόπο, ο στόχος βελτίωσης της ακρίβειας της μεθόδου ανάγεται στο στόχο μείωσης του σφάλματος αυτού.

Η εξερχόμενη τιμή της FL-RVSP εξαρτάται κυρίως από τη σχέση μεταξύ των εισερχόμενων και των εξερχόμενων μεταβλητών, που αντανακλάται στους ασαφείς κανόνες. Για το σύστημα ‘βαθμός βλάβης’, χρειάστηκε να οριστεί αυτή η σχέση για 375 συνδυασμούς των γλωσσικών περιγραφών των ενδιάμεσων μεταβλητών. Ένα τέτοιο σύνολο κανόνων είναι δύσκολο να οριστεί και ευλόγως οδηγεί σε αποφάσεις που στερούνται αντικειμενικότητας. Ένας δευτερεύων παράγοντας που επηρεάζει την εξερχόμενη τιμή είναι ο ορισμός κάθε μεταβλητής (πλήθος ασαφών συνόλων, ορισμός συνάρτησης συμμετοχής).

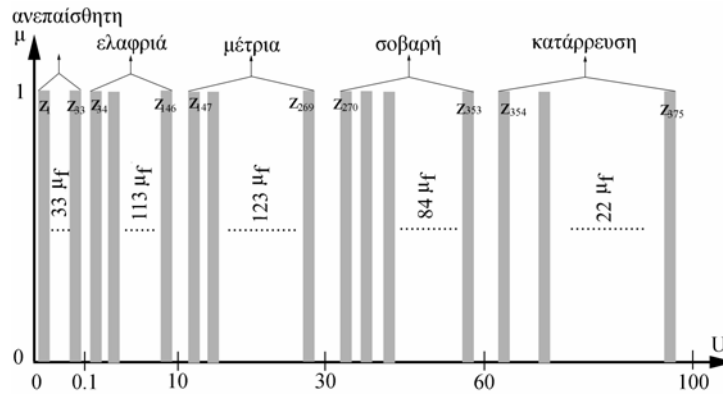
Κατά συνέπεια, το σφάλμα μεταξύ επιθυμητών και πραγματικών τιμών εξαρτάται από τους ασαφείς κανόνες και τον ορισμό των συναρτήσεων συμμετοχής των ασαφών συνόλων που συμμετέχουν στους κανόνες. Για να τροποποιηθούν οι κανόνες και οι συναρτήσεις συμμετοχής με κριτήριο την εξάλειψη του σφάλματος, το ασαφές σύστημα ‘βαθμός βλάβης’ εφαρμόστηκε στο πλαίσιο των προσαρμόσιμων νευρωνικών δικτύων, σύμφωνα με τη μελέτη του Jang (1993) με το τίτλο ‘Adaptive Network-based Fuzzy Inference System’ (ANFIS).

4.2. ADAPTIVE NETWORK-BASED FUZZY INFERENCE SYSTEM

4.2.1. Δομή

Το προσαρμόσιμο νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από πολλά επίπεδα, στα οποία αντιστοιχίζονται συγκεκριμένες συναρτήσεις επεξεργασίας των εισερχόμενων σημάτων. Κάθε επίπεδο αποτελείται από κόμβους που αντιπροσωπεύουν συναρτήσεις εξαρτώμενες από το εισερχόμενο σήμα (ή εισερχόμενη τιμή) μόνο του ή σε συνδυασμό με παραμέτρους που βρίσκονται στον κομβό. Έτσι, για δύο διαδοχικά επίπεδα, η έξοδος ενός κόμβου που βρίσκεται στο πρώτο επίπεδο γίνεται εισερχόμενο σήμα για το ακόλουθο. Κόμβοι που απλά ενεργοποιούν συναρτήσεις του εισερχόμενου σήματος αναπαριστώνται από κυκλικά σχήματα, ενώ κόμβοι των οποίων το εξερχόμενο σήμα εξαρτάται προσθέτως από εγγενείς παραμέτρους αναπαριστώνται από τετράγωνα σχήματα. Σε κάθε δίκτυο, εφαρμόζονται αλγόριθμοι που προσδιορίζουν τον τρόπο με τον οποίο οι παράμετροι του πρέπει να αλλάξουν ώστε να ελαχιστοποιηθεί ένα δεδομένο σφάλμα. Η διαδικασία αυτή λέγεται διαδικασία μάθησης ή εξάσκησης και οι σειριακοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την άριστη ρύθμιση των παραμέτρων λέγονται κανόνες μάθησης.

Το ANFIS είναι ένα προσαρμόσιμο δίκτυο που είναι λειτουργικά ισοδύναμο με ένα ασαφές σύστημα τύπου Sugeno. Αυτή η προϋπόθεση περιορίζει τη δυνατότητα εξάσκησης των συστημάτων τύπου Mamdani, στα οποία η αποσαφήνιση είναι χρονοβόρα και μια συστηματική ρύθμιση των παραμέτρων θα ήταν δύσκολη.⁷ Παρά ταύτα, τα συστήματα αυτά μπορούν να αναχθούν σε συστήματα Sugeno, με την αντικατάσταση των ασαφών συνόλων που ορίζουν την εξερχόμενη μεταβλητή από πλήθος σταθερών τιμών. Η τροποποιημένη μεταβλητή ‘βαθμός βλάβης’ απεικονίζεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8. Τροποποιημένη μεταβλητή ‘βαθμός βλάβης’

Η δομή του νευρωνικού δικτύου που αναπαράγει το ασαφές σύστημα τύπου Sugeno ‘βαθμός βλάβης’ παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 9. Κάθε επίπεδο αντιστοιχεί σε διαφορετική μαθηματική λειτουργία της ασαφούς επαγωγικής διαδικασίας. Στο επίπεδο 1, οι εισερχόμενες τιμές ασαφοποιούνται μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής που αντιστοιχούν στα ασαφή σύνολα, με τα οποία ορίζονται οι ενδιάμεσες μεταβλητές (Σχήμα 6). Οι εξερχόμενες τιμές αυτών των κόμβων εξαρτώνται από τις εισερχόμενες τιμές και από τις παραμέτρους των συναρτήσεων συμμετοχής. Οι παράμετροι αυτοί ονομάζονται ηγούμενες παράμετροι. Το επίπεδο 2 αναπαριστά τη λογική λειτουργία για κάθε κανόνα και οι εξερχόμενες τιμές αναφέρονται στο παραγόμενο βάρος κάθε κανόνα (Εδάφιο 2.1.1). Το επίπεδο 3 αναφέρεται στην κανονικοποίηση των εξαγόμενων βαρών του επιπέδου 2, που περιγράφεται από την Εξίσωση 9.

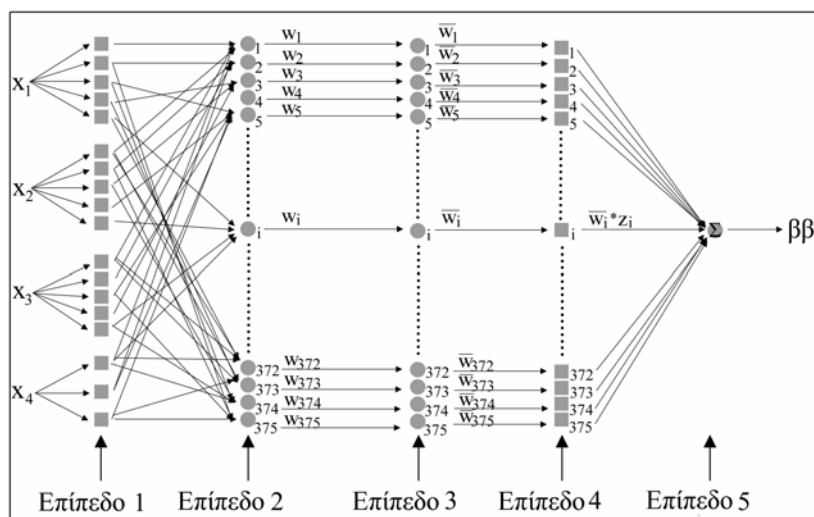


Figure 9. ANFIS ‘Damage Score’

Το επίπεδο 4 αποτελείται από 375 κόμβους που εκφράζουν το αποτέλεσμα κάθε κανόνα, κατ’ αντιστοιχία με την Εξίσωση 10, όπου O_i^{4L} είναι η εξερχόμενη συνάρτηση του $i^{\text{οστού}}$

κόμβου. Οι παράμετροι που υπάρχουν σε αυτό το επίπεδο λέγονται επακόλουθες παράμετροι. Τέλος, το επίπεδο 5 αποτελείται από έναν κόμβο που υπολογίζει τον ανισοβαρή μέσο όρο των αποτελεσμάτων των κανόνων, που αντιστοιχεί στον τελικό βαθμό βλάβης (Εξίσωση 7).

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_i w_i} \quad (9)$$

$$O_i^{AL} = \bar{w}_i * z_i \quad (10)$$

4.2.2. Κανόνες μάθησης

Το ANFIS χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό δύο αλγόριθμων μάθησης για τη ρύθμιση των ηγούμενων και των επακόλουθων παραμέτρων. Αρχικά, γίνεται η τροποποίηση των επακόλουθων παραμέτρων με τη μετάδοση των πληροφοριών προς τον εξερχόμενο χώρο, ενόσω οι ηγουμένες παράμετροι παραμένουν σταθερές. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ονομάζεται εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων (LSE) του εξερχόμενου σφάλματος. Συγκεκριμένα, για δεδομένο πλήθος P ζευγών εισερχόμενων τιμών- επιθυμητών αποτελεσμάτων, το σφάλμα ταυτίζεται με τη διαφορά των ανυσμάτων $O^{\text{πραγματικό}}$ και $O^{\text{επιθυμητό}}$, των οποίων τα στοιχεία αντιστοιχούν στα πραγματικά και τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η συνάρτηση του ββ, για το $p^{\text{οστό}}$ ζεύγος των δεδομένων εξάσκησης, εκφράζεται από την Εξίσωση 11:

$$O_p^{\text{πραγματικό}} = \sum_i \bar{w}_i * z_i \quad (11)$$

Προφανώς, ο ββ είναι μια γραμμική συνάρτηση των επακόλουθων παραμέτρων. Αν W και Z είναι μητρώα που αντιπροσωπεύουν τα βάρη των κανόνων και τις επακόλουθες παραμέτρους αντίστοιχα, το προς επίλυση σύστημα μπορεί να περιγραφεί από τη Σχέση 12. Τα W , Z και O είναι μητρώα διαστάσεων $P \times M$, $M \times 1$ and $P \times 1$ αντίστοιχα.

$$O^{\text{πραγματικό}} = O^{\text{επιθυμητό}} \Leftrightarrow W \bullet Z = O^{\text{επιθυμητό}} \quad (12)$$

Η LSE του μητρώου Z , Z^* , ελαχιστοποιεί το τετραγωνισμένο σφάλμα $\|W \bullet Z - O^{\text{desired}}\|^2$. Το Z^* υπολογίζεται με μια επαναληπτική διαδικασία με χρήση των ακόλουθων σειριακών σχέσεων⁷:

$$Z_{i+1} = Z_i + S_{i+1} \cdot W_{i+1} * (O_{i+1}^{\text{επιθυμητό}} - W_{i+1}^T \cdot Z_i) \quad (13)$$

$$S_{i+1} = S_i - \frac{S_i \cdot W_{i+1} \cdot W_{i+1}^T \cdot S_i}{1 + W_{i+1}^T \cdot S_i \cdot W_{i+1}}, \quad i = 0, 1, \dots, P-1, \quad (14)$$

, όπου W_i^T , η $i^{\text{οστή}}$ γραμμή του πίνακα W , $O_i^{\text{επιθυμητό}}$ είναι το $i^{\text{οστό}}$ στοιχείο του ανύσματος $O^{\text{επιθυμητό}}$, S_i , το μητρώο συνδιασποράς, ενώ το ζητούμενο Z^* είναι ίσο με Z_P . Οι αρχικές συνθήκες ορίζονται από τις τιμές $Z_0=0$ και $S_0=\gamma I$, όπου το γ είναι ένας μεγάλος θετικός αριθμός και I είναι ο μοναδιαίος πίνακας διαστάσεων $M \times M$.

Για τη ρύθμιση των ηγούμενων παραμέτρων, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος αντίστροφης μετάδοσης (back-propagation algorithm), ο οποίος βασικά υπολογίζει παραγώγους του σφάλματος μεταδίδοντας τους προς τον εισερχόμενο χώρο⁷. Ο συνδυασμός του αλγόριθμου αντίστροφης μετάδοσης και της μεθόδου LSE διαμορφώνει έναν υβριδικό αλγόριθμο που χρησιμοποιείται κατά τη μεθοδολογία του ANFIS.

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ FL-RVSP

5.1 ΣΚΟΠΟΣ

Η εφαρμογή της FL-RVSP σε ένα σύνολο κτιρίων αποδίδει ένα βαθμό βλάβης σε κάθε κτίριο, ο οποίος εκφράζει ενδεχόμενη τρωτότητα. Συνεπώς, η προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιείται για την κατάταξη των κτιρίων σε υποσύνολα υψηλής και χαμηλής προτεραιότητας. Η μέθοδος κρίνεται αποτελεσματική αν το σύνολο υψηλής προτεραιότητας περιλαμβάνει κτίρια τα οποία είναι ιδιαιτέρως εύτρωτα. Ωστόσο, η πραγματική τρωτότητα ενός κτιρίου μπορεί να εκτιμηθεί μόνο ύστερα από ένα μεγάλο σεισμικό γεγονός. Προς τούτο, κτίρια με εκτιμημένη τρωτότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ένα υποθετικό σύνολο κτιρίων προς προσεισμική αποτίμηση. Αυτό εξυπηρετεί δύο στόχους: τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της μεθόδου (που αποτελεί πρωταρχικό στόχο για μεθόδους TOE) και την αξιολόγηση της ακρίβειας της μεθόδου να εκφράζει αναμενόμενη βλάβη.

Το κριτήριο της αποτελεσματικότητας επιβάλλει ότι κτίρια που κατέρρευσαν πρέπει να παράγουν μεγαλύτερους βαθμούς βλάβης από ότι κτίρια με σοβαρές βλάβες και παράλληλα κτίρια με σοβαρές βλάβες πρέπει να αντιστοιχίζονται σε βαθμούς βλάβης μεγαλύτερους από ότι κτίρια με μη-σοβαρές βλάβες. Διαφορετικά, κτίρια που κατέρρευσαν ή υπέστησαν σοβαρές βλάβες πρέπει να ανήκουν στο σύνολο υψηλής προτεραιότητας. Το κριτήριο της ακρίβειας επιβάλλει ότι η πραγματική βλάβη ταυτίζεται με την αναμενόμενη βλάβη, η οποία εκφράζεται από το βαθμό βλάβης. Η εγκυρότητα της μεθόδου εξαρτάται από την πλήρωση αυτών των κριτηρίων. Κατά συνέπεια, οι πληροφορίες σχετικά με την τρωτότητα των κτιρίων χρησιμοποιούνται για την επικύρωση της μεθόδου.

5.2. ΔΕΙΓΜΑ ΚΤΙΡΙΩΝ

Το δείγμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη αποτελείται από 102 κτίρια που υπέστησαν βλάβες στο σεισμό της Πάρνηθας το 1999. Το δείγμα λήφθηκε από μια ομάδα μηχανικών²¹ και περιλαμβάνει την εκτίμηση της βλάβης κάθε κτιρίου. Συγκεκριμένα, καταγράφηκαν 26 κτίρια με μέτριες βλάβες, 42 κτίρια με σοβαρές βλάβες και 34 κτίρια που κατέρρευσαν. Ανάλογα με τον τύπο της βλάβης τα κτίρια χωρίζονται σε τρεις ομάδες. Αυτές είναι, το M-group, το S-group και το C-group κατά αντιστοιχία με τις μέτριες βλάβες, σοβαρές βλάβες και καταρρεύσεις.

Οι πληροφορίες της παραπάνω βάσης δεδομένων αναφέρονται σε διάφορα δομικά χαρακτηριστικά, όπως ο δομικός τύπος, ο αντισεισμικός κανονισμός που χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό κάθε κτιρίου, το σχήμα της κατασκευής, η κανονικότητα και άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με τη δομική αντοχή. Τα δεδομένα αυτά συλλέχθηκαν με σκοπό την αποτίμηση με βάση τον TOE, όπως προτείνεται από τον ΟΑΣΠ. Κατά συνέπεια, δεν μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν απευθείας για εφαρμογή της FL-RVSP. Για το λόγο αυτό, οι διάφορες πληροφορίες προσαρμόστηκαν σε τιμές για τις εισερχόμενες μεταβλητές της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

5.3. ΕΞΑΣΚΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το anfis 'βαθμός βλάβης' εξασκήθηκε μέσω 102 ζευγών εισερχόμενων-επιθυμητών εξερχόμενων τιμών. Οι επιθυμητές τιμές καθορίστηκαν σύμφωνα με το κριτήριο της ακρίβειας, το οποίο επιβάλλει ότι κτίρια που κατέρρευσαν, υπέστησαν σοβαρές και μέτριες βλάβες θα πρέπει να αντιστοιχούν σε τιμές στα διαστήματα [60,100], [30,60] και [10,30]. Ο αριθμός των επακόλουθων παραμέτρων του συστήματος είναι ίσος με 375, ενώ οι ηγούμενες παράμετροι ανέρχονται σε 60. Έτσι, το γραμμικό σύστημα της Εξίσωσης 12 ήταν

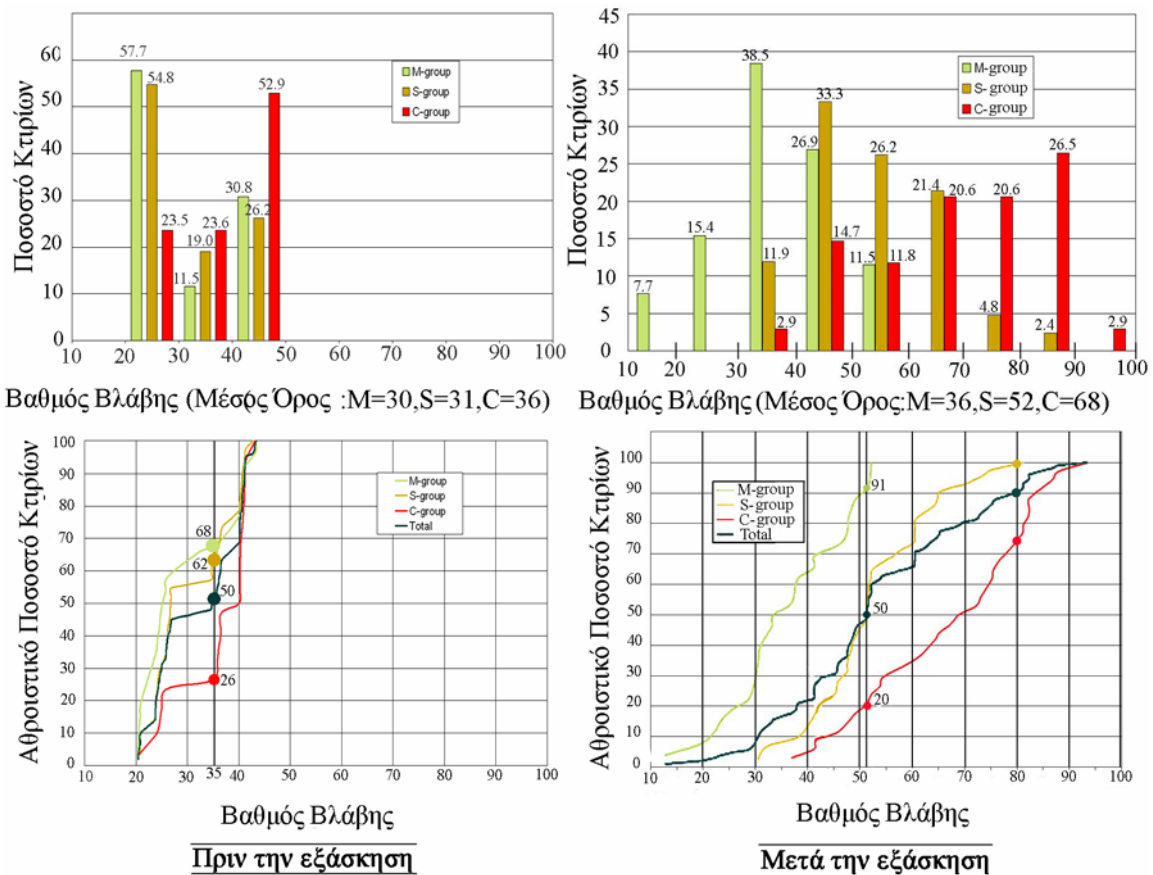
υποορισμένο (λιγότερες εξισώσεις από ότι άγνωστοι) και η σύγκλιση αναμενόταν να είναι μικρή. Παρόλα αυτά, η εξάσκηση της μεθόδου έγινε με σκοπό την εκτίμηση της ικανότητας της να βελτιώνεται σε συμφωνία με δεδομένα για την πραγματική τρωτότητα κτιρίων. Το τελικό σφάλμα που προέκυψε από τη μέθοδο ήταν ίσο με 14.7. Η τιμή αυτή υποδηλώνει το μέσο τετραγωνικό σφάλμα που εκφράζεται με την Εξίσωση 15.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_1^N (O_{\text{επιθυμητο}} - O_{\text{πραγματικο}})^2} \quad , \quad N: \text{αριθμός δεδομένων εξάσκησης} \quad (15)$$

5.3.1. ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ FL-RVSP

5.3.1.1 Αποτελεσματικότητα

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου τα εξαγόμενα αποτελέσματα συγκεντρώνονται στο Σχήμα 10. Στο πάνω τμήμα του γραφήματος απεικονίζεται η ποσοστιαία κατανομή των κτιρίων στο πεδίο ορισμού της εξερχόμενης μεταβλητής.



Σχήμα 10. Αποτελέσματα της FL-RVSP

Όπως φαίνεται, η κατανομή των κτιρίων παρουσιάζει συγκέντρωση στο διάστημα [20,50] για το ανεκπαιδευτο σύστημα, ενώ για το εκπαιδευμένο τα κτίρια κατανέμονται σε όλο το εύρος των επιθυμητών τιμών, το οποίο είναι το [10,100]. Το κριτήριο αποτελεσματικότητας μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά από την Εξίσωση 16.

$$\beta\beta_{C\text{-group}} > \beta\beta_{S\text{-group}} > \beta\beta_{M\text{-group}} \quad (16)$$

Στην περίπτωση του ανεκπαιδευτου συστήματος, το γεγονός ότι το ποσοστό του M-group δεν παρουσιάζει σημαντική διαφορά με το αντίστοιχο ποσοστό του S-group υποδηλώνει ότι

το κριτήριο αποτελεσματικότητας δεν πληρείται, για τα κτίρια με σοβαρές και μέτριες βλάβες. Αυτό δεν ισχύει για το C-group, του οποίου το ποσοστό είναι σχετικά μεγαλύτερο από ότι των δύο άλλων γκρουπ, στο διάστημα [40,50]. Επιπλέον, οι μέσες τιμές είναι 30, 31 και 36 για το M-group, το S-group και το C-group αντίστοιχα. Το δεδομένο αυτό επιβεβαιώνει ότι ενώ η Εξίσωση 16 πληρείται κατά τη σύγκριση του C-group με τα υπόλοιπα σύνολα, αλλά δεν ισχύει για τη σύγκριση των $\beta\beta_{S-group}$ και $\beta\beta_{M-group}$.

Αντίθετα, για το εκπαιδευμένο σύστημα, η Εξίσωση 16 ικανοποιείται για όλες τις περιπτώσεις βλάβης. 61.6% του M-group βρίσκεται στο διάστημα [10,40], 80.9% του S-group κατανέμεται στο διάστημα [40,70] και 49.9% του C-group αντιστοιχίζεται σε τιμές στο διάστημα [70,100]. Οι μέσες τιμές είναι 36, 52 και 68 για το M-group, το S-group και το C-group αντίστοιχα και είναι χαρακτηριστικές της αποτελεσματικότητας του συστήματος.

Τα κατώτερα διαγράμματα του Σχήματος 10, παρουσιάζουν τη διακύμανση του αθροιστικού ποσοστού των κτιρίων κατά μήκος του εύρους των εξαγόμενων τιμών του βαθμού βλάβης. Συγκεκριμένα, για κάθε x το y ισούται με το ποσοστό των κτιρίων που έχουν μικρότερο βαθμό βλάβης από x. Ας υποθέσουμε ότι τα 102 κτίρια που λαμβάνονται υπόψη σε αυτήν την εργασία, χρειαζόταν να αποτιμηθούν προσεισμικά με βάση τα αποτελέσματα της FL-RVSP. Κτίρια που αντιστοιχίζονται σε μεγαλύτερες τιμές βθμού βλάβης, θα επιλέγονταν για περαιτέρω ανάλυση. Το πλήθος των κτιρίων προς επιλογή εξαρτάται από τον προϋπολογισμό που έχει προβλεφθεί για τη διαδικασία της προσεισμικής αποτίμησης. Συνεπώς, το σύνολο υψηλής προτεραιότητας μορφώνεται με επιλογή ενός μόνο ποσοστού των πιο «επικίνδυνων» κτιρίων. Για τους σκοπούς της παρούσας διερεύνησης, παρουσιάζονται δύο πιθανά σύνολα υψηλής προτεραιότητας, αποτελούμενα από το 50% και το 10% του συνολικού αριθμού των κτιρίων. Το κριτήριο αποτελεσματικότητας μπορεί τώρα να εκφραστεί από την Εξίσωση 17, όπου P_i είναι το ποσοστό του i-group στο σύνολο υψηλής προτεραιότητας.

$$P_{C-group} > P_{S-group} > P_{M-group} \quad (17)$$

Η σύνθεση των συνόλων αυτών για το ανεκπαιδευτο και το εκπαιδευμένο σύστημα παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

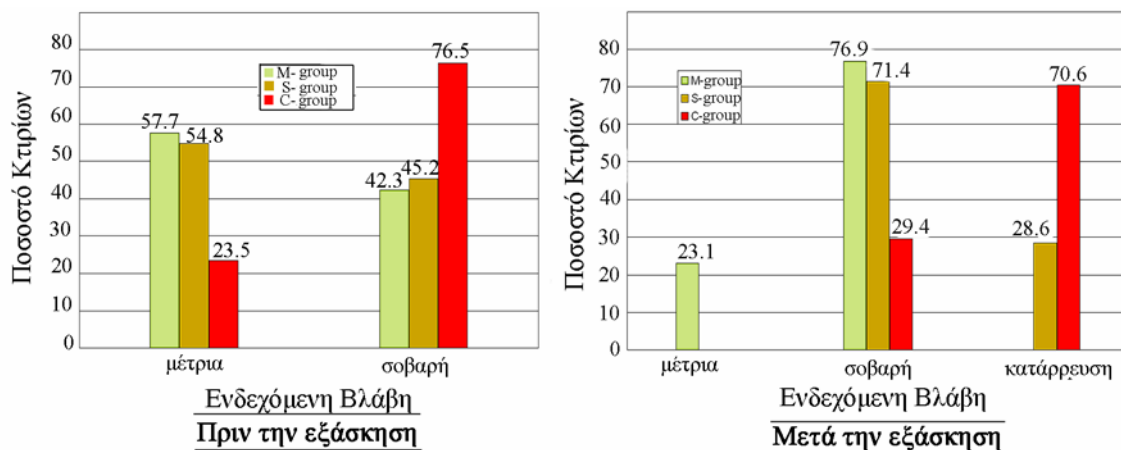
Πίνακας 2. Σύνολα υψηλής προτεραιότητας για το 50% και το 10% επί του συνόλου των κτιρίων

50% επί του συνόλου			10% επί του συνόλου		
Group	Πριν την εξάσκηση	Μετά την εξάσκηση	Group	Πριν την εξάσκηση	Μετά την εξάσκηση
M	32%	9%	M	8%	0%
S	38%	50%	S	6%	0%
C	74%	80%	C	16%	28%

Στην πρώτη περίπτωση (50% επί του συνόλου), η Εξίσωση 17 ικανοποιείται μόνο για το C-group για το σύστημα πριν την εξάσκηση, λόγω της μικρής διαφοράς ανάμεσα στα $P_{S-group}$ και $P_{M-group}$, ενώ για το εκπαιδευμένο σύστημα ικανοποιείται πλήρως. Το γεγονός ότι το ποσοστό του M-group μειώθηκε αισθητά ενώ το ποσοστό του S-group αυξήθηκε για το εκπαιδευμένο σύστημα, είναι χαρακτηριστικό της βελτίωσης στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Έτσι, σε αυτήν την υποθετική περίπτωση TOE, το 80% των καταρρεύσεων και το 50% των σοβαρών βλαβών θα είχαν αναλυθεί περαιτέρω. Στη δεύτερη περίπτωση, το σύνολο υψηλής προτεραιότητας αποτελείται εξολοκλήρου από καταρρεύσεις για το εκπαιδευμένο σύστημα αναδεικνύει τη βελτίωση της μεθόδου.

5.3.1.2 Ακρίβεια

Η συσχέτιση μεταξύ ενδεχόμενης βλάβης, που υποδηλώνεται από τους βαθμούς βλάβης, και της πραγματικής βλάβης παρουσιάζεται στο Σχήμα 11. Είναι προφανές ότι η ακρίβεια της μεθόδου βελτιώθηκε μετά την εξάσκηση. Για το ανεκπαιδευτο σύστημα, φαίνεται από το Σχήμα 11, ότι κανένα κτίριο που κατέρρευσε δεν αντιστοιχήθηκε με βαθμό βλάβης που να υποδηλώνει ενδεχόμενο κατάρρευσης. Αντίθετα, μετά την εξάσκηση, το 70.6% των κτιρίων που κατέρρευσαν σημείωσαν βαθμό βλάβης που υποδηλώνει ενδεχόμενο κατάρρευσης, ενώ το 71.4% των κτιρίων που υπέστησαν σοβαρές βλάβες αντιστοιχήθηκαν σε βαθμό βλάβης που υποδηλώνει ενδεχόμενο σοβαρών βλαβών. Το γεγονός ότι τα κτίρια με μέτριες βλάβες κατά μεγαλύτερο ποσοστό είχαν βαθμό βλάβης που υποδηλώνει ενδεχόμενο σοβαρών βλαβών, αποδίδεται στο μικρό μέγεθος των δεδομένων εξάσκησης.



Σχήμα 11. Συσχέτιση ενδεχόμενης-πραγματικής βλάβης

5.4. ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΜΙΚΡΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΣΤΗΝ ΕΞΑΣΚΗΣΗ

Όπως ανέφερα, ο μικρός αριθμός ζευγών εισερχόμενων-επιθυμητών εξερχόμενων τιμών οδήγησε σε ένα υποορισμένο σύστημα γραμμικών εξισώσεων. Το πρόβλημα αυτό επηρέασε την τροποποίηση των επακόλουθων παραμέτρων, και επακόλουθα τη ρύθμιση των ηγούμενων παραμέτρων. Οι τιμές των τροποποιημένων συναρτήσεων συμμετοχής της εξερχόμενης μεταβλητής είναι χαρακτηριστικές. Αρκετές έλαβαν τιμές εκτός του διαστήματος [0,100]. Ένα πρόσθετο πρόβλημα με τις μικρές βάσεις δεδομένων εξάσκησης είναι ότι δεν είναι αντιπροσωπευτικές όλων των πιθανών περιπτώσεων κτιρίων. Συνεπώς, η χρησιμοποίηση μιας τέτοιας βάσης για την εξάσκηση του συστήματος οδηγεί σε ρύθμιση κατά υποκειμενικό τρόπο των παραμέτρων και δεν επιτρέπει την ενσωμάτωση της πραγματικής απόκρισης των ποικίλων περιπτώσεων κτιρίων. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτήν τη μελέτη, ωστόσο, αναδεικνύουν τη δυνατότητα της μεθόδου να βελτιστοποιηθεί, με την προϋπόθεση ότι θα χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες βάσεις δεδομένων, με περιπτώσεις κτιρίων που θα καλύπτουν όλες τα πιθανά σύνολα δομικών χαρακτηριστικών, των οποίων η καταγραφή θα γίνεται σύμφωνα με τις προβλέψεις της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η FL-RVSP αποτελεί μια προσέγγιση με βάση τα ενδεχόμενα στη διαδικασία του ταχέως οπτικού ελέγχου. Υποκαθιστά τον τρόπο, με τον οποίο ο μηχανικός αντιλαμβάνεται την κατάσταση διάφορων δομικών χαρακτηριστικών στο πεδίο και χρησιμοποιεί ασαφή συλλογιστική για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικών με την ενδεχόμενη τρωτότητα

κτιρίων. Επιτρέπει την κατάταξη ενός κτιρίου σε πέντε δυνατές διαβαθμίσεις τρωτότητας, που επισημαίνει την προοπτική εφαρμογής της για πρόβλεψη βλάβης.

Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με προσαρμόσιμα νευρωνικά δίκτυα για να αποκτήσει γνώση από την πραγματική σεισμική συμπεριφορά των κτιρίων και να βελτιωθεί, σε όρους ακρίβειας και συνακόλουθα αποτελεσματικότητας. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής ανέδειξαν μια εντυπωσιακή βελτίωση στην ακρίβεια και την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Χαρακτηριστικά, επιλέγοντας το 10% επί του συνόλου των υπό εξέταση κτιρίων για μια υποθετική αποτίμηση, το σύνολο υψηλής προτεραιότητας αποτελούταν μόνο από κτίρια που κατέρρευσαν, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα του εκπαιδευμένου συστήματος. Η σημείωση αυτή αξίζει ιδιαίτερης προσοχής, καθώς αρκετά συχνά οι διαθέσιμοι πόροι για την προσεισμική αποτίμηση δεν επιτρέπουν μια εκτενή εφαρμογή της όποιας μεθοδολογίας αποτίμησης.

Το μικρό μέγεθος της βάσης δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την εξάσκηση, ωστόσο, δεν μπορούσε να οδηγήσει στη βελτιστοποίηση του συστήματος και κατ' επέκταση στην καθολική του εφαρμογή. Παρόλα αυτά, τα εξαγόμενα αποτελέσματα αυτά της μελέτης επιτρέπουν το συμπέρασμα ότι η χρησιμοποίηση μεγαλύτερων βάσεων δεδομένων -και μάλιστα με πληροφορίες συμβατές με τους ορισμούς των εισερχόμενων μεταβλητών της μεθόδου- θα οδηγήσει σε μια αξιόπιστη και αποτελεσματική μέθοδο ταχείας προσεισμικής αποτίμησης κτιρίων.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. FEMA-154, 1988. *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook*. ASCE.
2. FEMA-155, 1988. *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: Supporting Documentation*. ASCE
3. FEMA-178, 1992. *NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings*. BSSC, Washington, D.C..
4. Penelis G., 2001. *Pre-Earthquake Assessment of Public Buildings in Greece, International Workshop on Seismic Assessment and Rehabilitation of Structures*, Athens-Istanbul, Published by the Aristotle University of Thessaloniki, Dept. of Civil Engineering, Lab. of R/C Structures.
5. Καραμπίνης Α., 2003. “Βαθμονόμηση της Α' φάσης προσεισμικού ελέγχου (TOE)”, Πρακτικά 14^{ου} Συνεδρίου Σκυροδέματος, τ. Γ, σ. 505-518, Κως.
6. Στυλιανίδης Κ., Κάππος Α., Πενέλης Γ., Ιγνατάκης Χ., 2003. “Αξιολόγηση μεθόδων πρωτοβάθμιου προσεισμικού ελέγχου με κριτήριο τη συμπεριφορά των κτιρίων σε συγκεκριμένους σεισμούς”. Πρακτικά 14^{ου} Συνεδρίου Σκυροδέματος, τ. Γ, σ. 527-538, Κως.
7. Jang J-S R., 1993, “ANFIS: Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System”, IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, Vol. 23, No 3, pp 665-685.
8. Sanchez-Silva, M. and Garcia, L., 2001. “Earthquake Damage Assessment Based on Fuzzy Logic and Neural Networks”, Earthquake Spectra, Vol. 17, pp 89-112.
9. Λαμπαδάρης, Α., 2002. *Αποτίμησης σεισμικής ικανότητας υφιστάμενων κτιρίων με χρήση ασαφούς λογικής*. Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
10. Μαντάς Α.Δ., 2003. *Αποτίμηση της σεισμικής ικανότητας κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα με τη μέθοδο της ασαφούς λογικής*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.

11. Mandas A. D. and Dritsos S. E., 2004. “*Vulnerability Assessment of RC Structures using Fuzzy Logic*”, Proceedings of the International Conference on Risk Analysis IV, Rhodes, Greece. Transactions of the Wessex Institute.
12. Δεμαρτίνος Κ., 2004. *Πρωτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος κτιρίων με τη μέθοδο της ασαφούς λογικής*. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα.
13. Zadeh L.A., 1965. *Fuzzy Sets*, Information and Control, pp 338-353.
14. Levrat E., Dubois G., Rondeau L., Lammote M., Bremont J., 1996. *Fuzzy Relational Equation Problem Solving: Tools for Modeling*, Fuzzy Logic and Neural Networks Handbook, Ch. 8, Published by McGraw-Hill.
15. Kartalopoulos, S. V., 1995. *Understanding Neural Networks and Fuzzy Logic: Basic Concepts and Applications*. Published by Wiley-IEEE Press.
16. Bezdec J.C., 1996. *A Review of Probabilistic, Fuzzy and Neural Models for Pattern Recognition*, Fuzzy Logic and Neural Networks Handbook, Ch. 3, Published by McGraw-Hill.
17. ΟΑΣΠ, 2000. Πρωτοβάθμιος προσεισμικός έλεγχος κτιρίων δημόσιας και κοινωφελούς χρήσης. Αθήνα. ΥΠΕΧΩΔΕ.
18. FEMA-356, 2000. *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, ASCE.
19. ATC 13, 1985. *Earthquake Damage Evaluation for California*, Applied Technology Council, Redwood City, California.
20. The Mathworks Inc, 2002. Matlab[®] Release 13, Apple Hill Drive 3, Natick, Massachussetts.
21. Κωστίκας Χ., Τρέζος Κ., Καββαδάς Μ., Πλακάς Α., Τσιτότας Μ., Θεοδωράκης Σ.. 2000. Διερεύνηση των αιτιών κατάρρευσης των οικοδομών από σεισμό των Αθηνων την 7^η Σεπτεμβρίου 1999, Τελική Έκθεση. ΟΑΣΠ, Αθήνα.