

## **Εφαρμογή μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και παραμέτρων σεισμικής έντασης που λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά της κατασκευής για την ταχεία εκτίμηση της σεισμικής βλάβης κτιρίων ο/σ**

Κωστινάκης Κ<sup>1</sup>, Μορφίδης Κ<sup>2</sup>

### **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης Εξελιγμένων Παραμέτρων Σεισμικής Έντασης (ΕΠΣΕ) ως παραμέτρων εισόδου σε Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) τύπου Perceptron για την πρόβλεψη του επιπέδου σεισμικής βλάβης κτιρίων ο/σ με βάση τη διατύπωση και επίλυση προβλήματος αναγνώρισης προτύπων για 3 και 5 κατηγορίες σεισμικής βλάβης. Αρχικά έγινε μία εκτεταμένη διερεύνηση της διαμόρφωσης ΤΝΔ που εξάγουν τις βέλτιστες προβλέψεις του επιπέδου σεισμικής βλάβης κτιρίων ο/σ έχοντας ως εισόδους 5 ΕΠΣΕ και 4 δομικές παραμέτρους. Σε δεύτερο στάδιο, οι προβλέψεις αυτών των δικτύων συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες προβλέψεις δικτύων τα οποία έχουν ως εισόδους 14 Συμβατικές Παραμέτρους Σεισμικής Έντασης (ΣΠΣΕ) και 4 δομικές παραμέτρους όμοιες με αυτές των ΤΝΔ που έχουν ως εισόδους ΕΠΣΕ. Το κυριότερο συμπέρασμα που προέκυψε από τη διερεύνηση είναι ότι η χρήση των 5 ΕΠΣΕ σε σχέση με τη χρήση των 14 ΣΠΣΕ δεν διαφοροποιεί ιδιαίτερα το ποσοστό των ορθών προβλέψεων. Επιπλέον, αποδείχτηκε ότι η θεώρηση 3 κατηγοριών βλάβης (στη λογική «πράσινο»-«κίτρινο»-«κόκκινο») οδηγεί σε ορθές προβλέψεις σε ποσοστό της τάξης του 95% των εξεταζόμενων δειγμάτων.

### **1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών παρατηρείται παγκοσμίως μια προσπάθεια εκτίμησης της αντισεισμικής συμπεριφοράς των κτιρίων με στόχο να ληφθούν οι απαραίτητες αποφάσεις σχετικά με την αποκατάσταση αυτών που επλήγησαν από σεισμό ή την ενίσχυσή τους, έτσι ώστε να πληρούν τις απαιτήσεις των σύγχρονων προδιαγραφών ασφάλειας. Ιδιαίτερως σημαντική θεωρείται η δυνατότητα ταχείας εκτίμησης του επιπέδου σεισμικής βλάβης μεγάλων ομάδων κτιρίων σε πολεοδομικά συγκροτήματα μετά από έναν ισχυρό σεισμό, καθώς είναι αυτή που θα καθορίσει τις ενέργειες που θα ακολουθήσουν για την αντιμετώπιση των βλαβών αυτών.

<sup>1</sup>Επίκουρος Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, e-mail: kkostina@civil.auth.gr

<sup>2</sup>Εντεταλμένος Ερευνητής, ΟΑΣΠ/ΙΤΣΑΚ, e-mail: konmorf@gmail.com

Για την ταχεία και (εκ των πραγμάτων) προσεγγιστική εκτίμηση της φέρουσας ικανότητας συνόλων υφισταμένων κτιρίων, όπου η υψηλή ακρίβεια του επιπέδου εκτίμησης προσκρούει σε χρονικούς και οικονομικούς περιορισμούς, έχουν προταθεί ειδικές μεθοδολογίες, όπως μεθοδολογίες ταχέως οπτικού ελέγχου ή η προσεγγιστική εκτίμηση της τρωτότητας π.χ. με τις καμπύλες τρωτότητας [1]. Μία σχετικώς νέα προσέγγιση στο πρόβλημα της εκτίμησης του αναμενόμενου επιπέδου βλάβης υφισταμένων κτιρίων οπλισμένου σκυροδέματος (ο/σ) αποτελεί η εφαρμογή μεθοδολογιών που εμπίπτουν στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης και πιο συγκεκριμένα στο πεδίο των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ). Τα ΤΝΔ, τα οποία είναι σύνθετες υπολογιστικές δομές που στηρίζονται στις βασικές αρχές λειτουργίας των βιολογικών νευρώνων του ανθρώπινου εγκεφάλου, έχουν το πλεονέκτημα της αναγνώρισης προτύπων σε πραγματικό χρόνο, αρκεί να έχει προηγηθεί η εκπαίδευση στην αναγνώριση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων των προτύπων αυτών (βλ. π.χ. [2]). Επιπλέον, τα ΤΝΔ μπορούν να συσχετίσουν μεγάλο αριθμό παραμέτρων εισόδου με συγκεκριμένες παραμέτρους που παράγονται ως έξοδοι (όπως είναι το επίπεδο της σεισμικής βλάβης), επιτυγχάνοντας έτσι σημαντική ακρίβεια στα εξαγόμενα αποτελέσματα.

Η ως τώρα χρήση των ΤΝΔ για την εκτίμηση της σεισμικής βλάβης περιορίζεται στη συσχέτισή της με συγκεκριμένες συνθήκες και απλές παραμέτρους σεισμικής έντασης, ο υπολογισμός των οποίων λαμβάνει υπόψη μόνο τα χαρακτηριστικά της διέγερσης (βλ. π.χ. [3, 4]). Ωστόσο, η πολυπλοκότητα του φαινομένου, καθώς και το γεγονός ότι η επιλογή της κατάλληλης παραμέτρου σεισμικής έντασης είναι ιδιαίτερος κρίσιμη και καθοριστική για το τελικό συμπέρασμα της εκτίμησης, οδήγησε πολλούς ερευνητές να προτείνουν τη χρήση παραμέτρων σεισμικής έντασης που λαμβάνουν υπόψη τους εκτός από τα χαρακτηριστικά της διέγερσης και τα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου κτιρίου (π.χ. [5-9]).

Στην παρούσα εργασία επιχειρείται η εφαρμογή των ΤΝΔ για την πρόβλεψη του επιπέδου της σεισμικής βλάβης κτιρίων ο/σ χρησιμοποιώντας παραμέτρους σεισμικής έντασης που λαμβάνουν υπόψη τα χαρακτηριστικά της κατασκευής. Για το σκοπό αυτό δημιουργήθηκε μέσω μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων μία βάση δεδομένων με σεισμικές βλάβες 30 τύπων κτιρίων ο/σ λόγω της δράσης 65 σεισμικών διεγέρσεων. Διερευνήθηκε η αξιοπιστία των ΤΝΔ στην ορθή ταξινόμηση των επιλεχθέντων κτιρίων σε 3 ή 5 κατηγορίες βλάβης (επίλυση του προβλήματος ως πρόβλημα αναγνώρισης προτύπων [10]) οι οποίες βαθμονομήθηκαν με χρήση της Μέγιστης Σχετικής Μετακίνησης Ορόφου (ΜΣΜΟ), [11]. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με αντίστοιχα αποτελέσματα προγενέστερων αναλύσεων στις οποίες χρησιμοποιούνται Συμβατικές Παράμετροι Σεισμικής Έντασης (ΣΠΣΕ) [12], και οδήγησαν εκ νέου (σε συνδυασμό και με τα αποτελέσματα των προγενέστερων διερευνήσεων, π.χ. [4]) στο συμπέρασμα ότι τα ΤΝΔ μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα εργαλεία επίλυσης του προβλήματος.

## 2 ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ

Η χρήση παραμέτρων σεισμικής έντασης που λαμβάνουν υπόψη τους τα χαρακτηριστικά της κατασκευής έχει μελετηθεί από πολλούς ερευνητές. Οι Εξελιγμένες Παράμετροι Σεισμικής Έντασης (ΕΠΣΕ) που επιλέχθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας έρευνας μπορούν να προσδιοριστούν με τη βοήθεια των χαρακτηριστικών τόσο των σεισμικών διεγέρσεων όσο και

των κτιρίων. Στη συνέχεια παρατίθενται οι παράμετροι που επιλέχθηκαν (Intensity Measures = IM) και δίνονται σύντομες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο υπολογισμού τους:

- Παράμετρος που προτάθηκε από τον Kappos [5]:

$$IM_{Kappos} = \int_{T_{1-t}}^{T_{1+t}} S_v(T) dT \quad (1)$$

- Παράμετρος που προτάθηκε από τους Cordova et al. [6]:

$$IM_{Cordova et al} = S_a(T_1) \cdot \left[ \frac{S_a(2T_1)}{S_a(T_1)} \right]^{0.5} \quad (2)$$

- Παράμετρος που προτάθηκε από τους Bojorquez και Iervolino [7]:

$$IM_{Boj \& Ier} = S_a(T_1) \cdot \left[ \frac{\Gamma MO(S_a(T_1) \dots S_a(2T_1))}{S_a(T_1)} \right]^{0.4} \quad (3)$$

- Παράμετρος που προτάθηκε από τους Lin et al. [8]:

$$IM_{Lin et al} = S_a(T_1)^{0.5} \cdot S_a(1.5T_1)^{0.5} \quad (4)$$

- Παράμετρος που προτάθηκε από τους Yahyaabadi και Tehranizadeh [9]:

$$IM_{Yah \& Tehr-NC} = \left[ 0.8S_d^2(T_1) + 0.2S_d^2(1.2T_1) \right]^{0.5} \quad (5)$$

όπου  $S_v$  είναι η φασματική ταχύτητα,  $T_1$  είναι η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής,  $t=0.2T_1$ ,  $S_a$  και  $S_d$  είναι η φασματική επιτάχυνση και μετακίνηση της κατασκευής αντιστοίχως και  $\Gamma MO(S_a(T_1) \dots S_a(2T_1))$  είναι ο Γεωμετρικός Μέσος Όρος της φασματικής επιτάχυνσης για ιδιοπερίοδους μεταξύ  $T_1$  και  $2T_1$ .

Οι παραπάνω σεισμικές παράμετροι υπολογίστηκαν για κάθε μία από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες του συνόλου των καταγραφών που επιλέχθηκαν. Στη συνέχεια, οι τιμές των δύο συνιστωσών συνδυάστηκαν σε μία μόνο τιμή χρησιμοποιώντας τον Γεωμετρικό Μέσο Όρο (ΓΜΟ) των τιμών των δύο οριζόντιων συνιστωσών [13]:

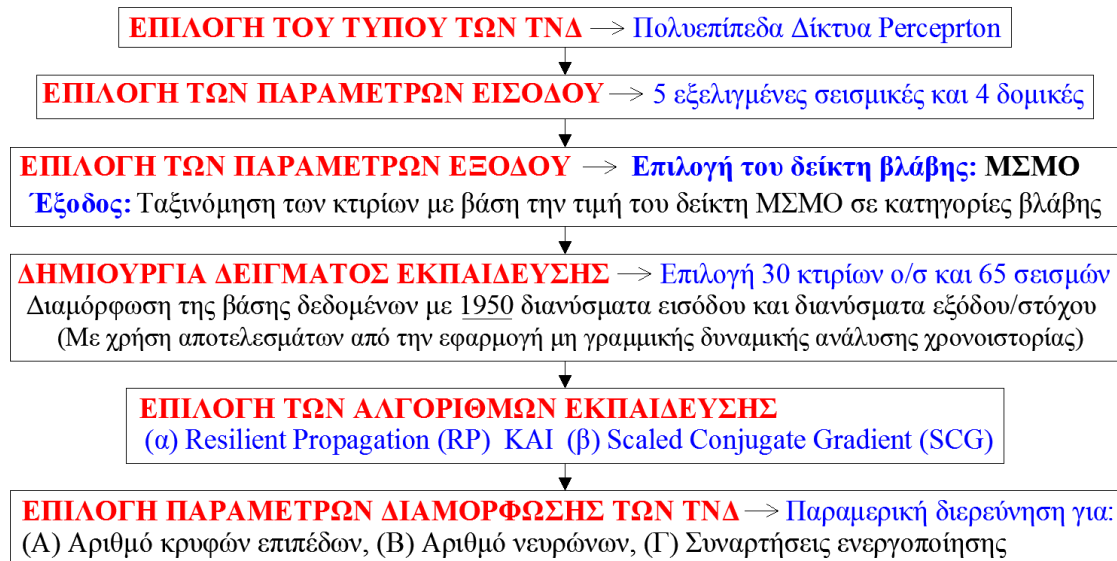
$$IM_{\Gamma MO} = \sqrt{IM_1 \cdot IM_2} \quad (6)$$

όπου  $IM_1$  and  $IM_2$  είναι οι τιμές των παραμέτρων σεισμικής έντασης των 2 οριζόντιων συνιστωσών της διέγερσης.

### 3 ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΝΔ

Για τη διατύπωση και την επίλυση του προβλήματος σε όρους συμβατούς με την λειτουργία των ΤΝΔ εφαρμόστηκε μία διαδικασία η οποία αποτελείται από τα βήματα που παρουσιάζονται στο Σχ. 1. Η διαδικασία αυτή έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε προγενέστερες εργασίες (βλ. π.χ. [4]) και προσαρμόστηκε στα δεδομένα της παρούσας μόνον όσον αφορά στην επιλογή των σεισμικών παραμέτρων για τις οποίες έγινε εφαρμογή των σχέσεων (1)-(5). Επομένως, ως είσοδοι των δικτύων επελέγησαν αφενός οι 5 ΕΠΣΕ των σχέσεων (1)-(5) και

αφετέρου οι ακόλουθες 4 δομικές παράμετροι: το ύψος των κτιρίων  $H_{ολ}$ , η δομική εκκεντρότητα  $e_0$  (=απόσταση μεταξύ του γεωμετρικού κέντρου βάρους των κατόψεων και του ίχνους του πραγματικού ή πλασματικού ελαστικού άξονα) και το ποσοστό της σεισμικής τέμνουσας βάσης που λαμβάνουν τα τοιχώματα ο/σ (εφόσον υπάρχουν) κατά τη διεύθυνση των δύο κάθετων μεταξύ τους κατασκευαστικών αξόνων  $x$  και  $y$ :  $n_{Tx}$ ,  $n_{Ty}$ . Έτσι, τα διανύσματα εισόδου των ΤΝΔ στην παρούσα εργασία έχουν διαστάσεις  $9 \times 1$ .



Σχήμα 1: Διαδικασία διατύπωσης του προβλήματος εκτίμησης του επιπέδου σεισμικής βλάβης κτιρίων ο/σ ως πρόβλημα Αναγνώρισης Προτύπων για την επίλυση του με χρήση ΤΝΔ

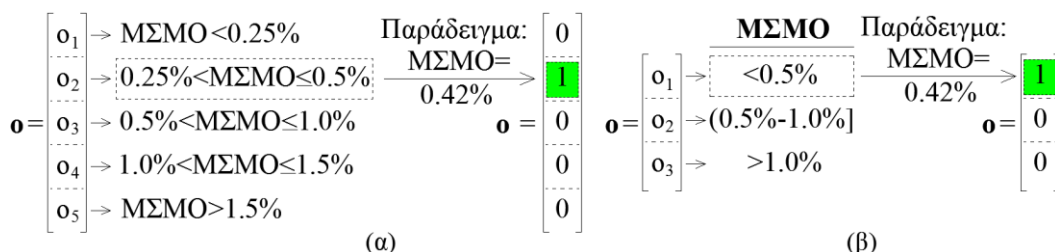
Η έξοδος των ΤΝΔ είναι ένα κατάλληλα διαμορφωμένο διάνυσμα που καθορίζει το επίπεδο βλάβης των κτιρίων. Για να οριστεί το διάνυσμα αυτό πρέπει αρχικά να επιλεγεί ο δείκτης βλάβης αλλά και η περιγραφή της βλάβης ανάλογα με το εύρος τιμών που μπορεί να λάβει αυτός. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας επελέγη ο δείκτης «Μέγιστη Σχετική Μετακίνηση Ορόφου» (ΜΣΜΟ) που αποτελεί έναν από τους ευρέως χρησιμοποιούμενους δείκτες βλάβης κτιρίων ο/σ. Για την αντιστοίχιση των τιμών του δείκτη ΜΣΜΟ με στάθμες βλάβης θεωρήθηκε ότι τα κτίρια ο/σ κατατάσσονται στα 3 ή τα 5 επίπεδα βλάβης του Πίνακα 1.

Πίνακας 1: Σχέση μεταξύ ΜΣΜΟ και επιπέδου σεισμικής βλάβης – 5 ή 3 κατηγορίες

ΜΣΜΟ (%)	<0.25	0.25-0.50	0.50-1.00	1.00-1.50	>1.50
Επίπεδο βλάβης	Μηδενικό	Μικρό	Μέσο	Μεγάλο	Κατάρρευση
	Μικρό (Μηδενικές ή εύκολα επισκευάσιμες βλάβες)		Μέσο (Σημαντικές αλλά επισκευάσιμες βλάβες)	Μεγάλο (Μη επισκευάσιμες βλάβες)	

Έχοντας ορίσει τις κατηγορίες βλάβης που οριοθετούνται από συγκεκριμένες τιμές του δείκτη ΜΣΜΟ θα πρέπει να γίνει η αντιστοίχιση των κατηγοριών αυτών σε προκαθορισμένες μορφές των διανυσμάτων εξόδου των ΤΝΔ. Ο τρόπος της αντιστοίχισης αυτής παρουσιάζεται στο Σχ.2. Σύμφωνα με το σχήμα αυτό, οι διαστάσεις των διανυσμάτων εξόδου είναι ίσες με τον αριθμό των επιπέδων βλάβης, ενώ τα στοιχεία τους λαμβάνουν την τιμή 1 όταν η τιμή του δείκτη

ΜΣΜΟ βρίσκεται εντός των ορίων των τιμών των επιπέδων βλάβης τα οποία αντιπροσωπεύουν. Διαφορετικά λαμβάνουν την τιμή 0.



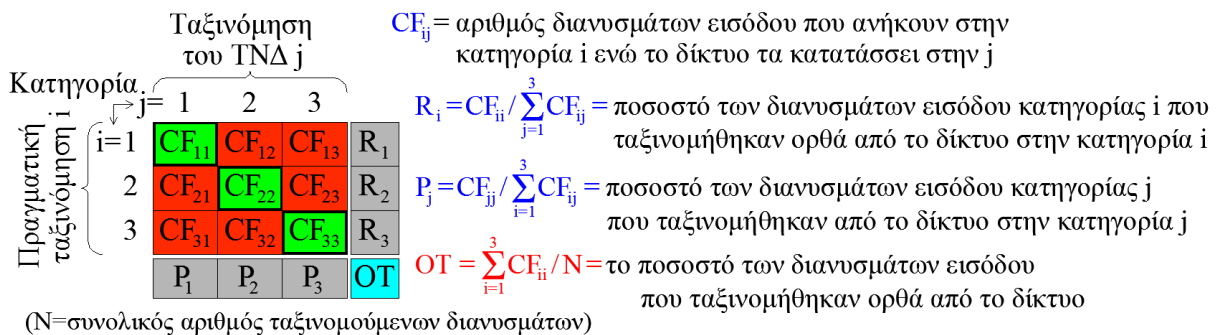
Σχήμα 2: Διαδικασία αντιστοίχισης των διανυσμάτων εξόδου  $o$  με τα προκαθορισμένα επίπεδα βλάβης για την περίπτωση: (α) 5 επιπέδων βλάβης, (β) 3 επιπέδων βλάβης

Για τη δημιουργία του δείγματος εκπαίδευσης επελέγησαν 30 κτίρια ο/σ με διαφορετικές τιμές των τεσσάρων επιλεγμένων δομικών παραμέτρων ( $H_{ολ}$ ,  $e_0$ ,  $n_{Tx}$  και  $n_{Ty}$ ). Τα κτίρια αυτά αναλύθηκαν για 65 σεισμικές διεγέρσεις (που επελέγησαν από διεθνείς βάσεις δεδομένων) με την μέθοδο της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης χρονοϊστορίας. Από τις αναλύσεις αυτές και μετά από κατάλληλη μετεπεξεργασία των αποτελεσμάτων υπολογίστηκε για κάθε περίπτωση ο καθολικός δείκτης βλάβης σε όρους ΜΣΜΟ αλλά και τα αντίστοιχα διανύσματα εξόδου (Σχ. 2). Έτσι δημιουργήθηκε ένα δείγμα εκπαίδευσης με 1950 (=30x65) δείγματα. Τα επιλεγμένα κτίρια αναλύθηκαν και σχεδιάστηκαν με βάση τις συστάσεις των ευρωκωδίκων. Οι αναλύσεις για το σχεδιασμό των κτιρίων πραγματοποιήθηκαν με εφαρμογή ελαστικής δυναμικής φασματικής ανάλυσης.

Το τελευταίο βήμα για την διατύπωση του προβλήματος σύμφωνα με το Σχ. 1 είναι η παραμετρική διερεύνηση για τον εντοπισμό των παραμέτρων που συνθέτουν τα ΤΝΔ έτσι ώστε αυτά να έχουν την βέλτιστη ικανότητα πρόβλεψης του επιπέδου σεισμικής βλάβης για περιπτώσεις για τις οποίες δεν έχουν εκπαιδευτεί. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε μία εκτεταμένη παραμετρική διερεύνηση από την οποία προέκυψαν (α) ο αριθμός των εσωτερικών επιπέδων (ΕΕ) (ελέγχθηκαν δίκτυα με 1 ή 2 ΕΕ), (β) ο αριθμός των νευρώνων στα ΕΕ (ελέγχθηκαν δίκτυα με αριθμό νευρώνων από 10 έως και 60 ανά ΕΕ) και (γ) οι συναρτήσεις ενεργοποίησης των νευρώνων στα ΕΕ καθώς και στο επίπεδο εξόδου (ελέγχθηκαν οι συναρτήσεις  $\text{logsig}$  και  $\text{tansig}$ , Σχ. 4). Για την αξιολόγηση της επίδοσης των ΤΝΔ χρησιμοποιήθηκε ο δείκτης Ορθών Ταξινομήσεων (ΟΤ) ο οποίος είναι ίσος με το ποσοστό των ορθών προβλέψεων/ταξινομήσεων που επιτυγχάνει ένα δίκτυο στο σύνολο των ταξινομήσεων που πραγματοποιεί. Ο δείκτης αυτός ορίζεται στα πλαίσια της διαμόρφωσης του πίνακα ανάλυσης των ταξινομήσεων (Confusion Matrix (CM), [4, 10]). Η γενική μορφή ενός τέτοιου πίνακα δίνεται στο Σχ.3.

Ο εντοπισμός της βέλτιστης διαμόρφωσης των ΤΝΔ έγινε με βάση την τιμή του δείκτη ΟΤ, ενώ ακολούθως για τα βέλτιστα δίκτυα έγινε έλεγχος της δυνατότητας τους να κάνουν ορθές προβλέψεις σε περιπτώσεις διανυσμάτων εισόδου οι οποίες δεν ανήκουν στο δείγμα με το οποίο εκπαιδεύτηκαν (δυνατότητα «γενίκευσης» των δικτύων). Για τον έλεγχο γενίκευσης έγινε χρήση των CM. Σημειώνεται εδώ ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα αφορούν στις ταξινομήσεις που έγιναν από τα δίκτυα για διανύσματα εισόδου που δεν ανήκουν στο δείγμα με το οποίο έγινε η εκπαίδευση τους.





Σχήμα 3: Γενική μορφή ενός CM για ένα πρόβλημα τριών κατηγοριών ταξινόμησης

Για να γίνει αυτό κατανοητό θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι το συνολικό δείγμα εκπαίδευσης χωρίστηκε σε τρία τμήματα. Με το πρώτο τμήμα (70% των δειγμάτων, 1364 διανύσματα) έγινε η κυρίως εκπαίδευση δηλ. η διαμόρφωση των τιμών των συναπτικών βαρών των νευρώνων [14]. Με το δεύτερο τμήμα (15% των δειγμάτων, 293 διανύσματα) έγινε ο έλεγχος του ποσοστού ορθών προβλέψεων των δικτύων σε άγνωστες περιπτώσεις για τις οποίες δεν εκπαιδεύτηκαν (ικανότητα γενίκευσης των δικτύων). Το τμήμα αυτό ονομάζεται δείγμα ελέγχου, αποτελεί πιο αξιόπιστο κριτήριο της επίδοσης των δικτύων και χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που θα παρουσιαστούν. Τέλος το τρίτο τμήμα του δείγματος (15% των διανυσμάτων) χρησιμοποιείται για τον έλεγχο αποφυγής της υπερπροσαρμογής (overfitting) των δικτύων δηλ. του φαινομένου να εξάγονται πολύ καλά αποτελέσματα για τα δείγματα εκπαίδευσης και ιδιαίτερα άσχημα αποτελέσματα για δείγματα άγνωστα στα δίκτυα.

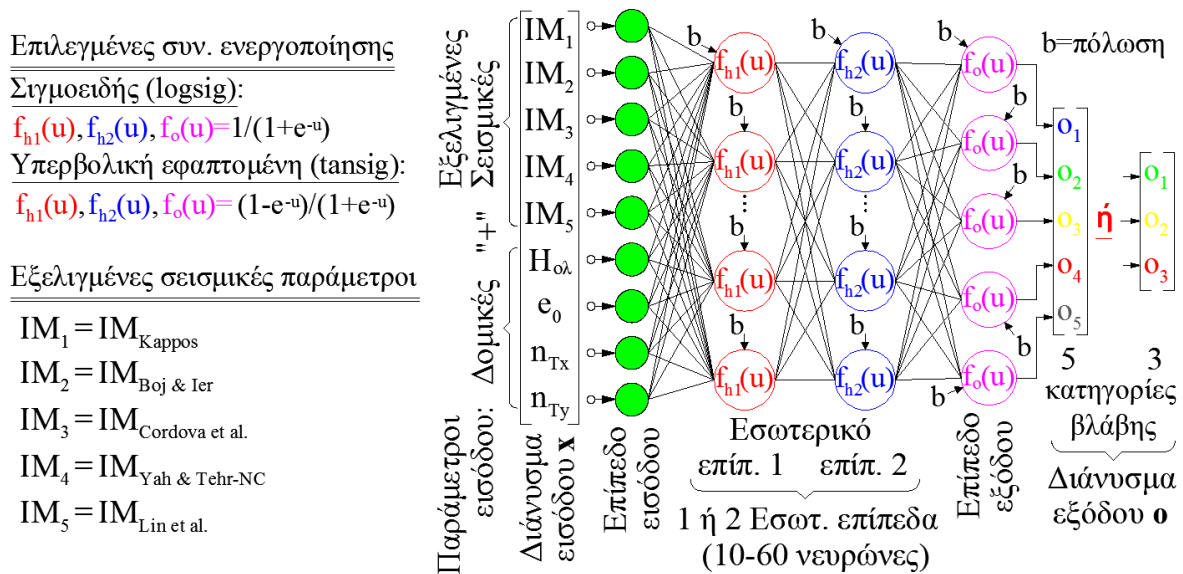
Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της παραμετρικής διερεύνησης για την βέλτιστη διαμόρφωση των δικτύων τα οποία τελικώς χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του επιπέδου βλάβης των επιλεγμένων κτιρίων. Όπως προκύπτει από τη μελέτη του συγκεκριμένου πίνακα, από τα συνολικά 204 ΤΝΔ με 1 ΕΕ νευρώνων και τα 20808 ΤΝΔ με δύο ΕΕ που διαμορφώθηκαν και εκπαιδεύτηκαν για κάθε μία από τις δύο κατηγοριοποιήσεις των επιπέδων βλάβης (3 ή 5) επελέγησαν τελικώς τα 4 βέλτιστα με κριτήριο τη μεγιστοποίηση του ποσοστού των ορθών ταξινομήσεων (δείκτης OT).

Πίνακας 2: Παράμετροι διαμόρφωσης των ΤΝΔ που αποδίδουν τις βέλτιστες προβλέψεις

Αριθμός κατηγοριών βλάβης	Αριθμός ΕΕ	Αριθμός νευρώνων/ΕΕ	Συναρτήσεις ενεργοποίησης	Αλγόριθμος εκπαίδευσης
5	1	30	tansig/tansig	SCG
	2	20/18	logsig/tansig/tansig	SCG
3	1	32	tansig/tansig	RP
	2	46/50	logsig/logsig/tansig	SCG

Από την μελέτη του Πίνακα 2 προκύπτει μία σειρά χρήσιμων συμπερασμάτων που μπορούν να ληφθούν υπόψη σε μελλοντικές αντίστοιχες εκπαιδεύσεις με διαφορετικά ή/και πιο εκτεταμένα δείγματα εκπαίδευσης. Το πλέον σημαντικό εξ αυτών είναι ότι η παράμετρος που επηρεάζει πιο πολύ την απόδοση των δικτύων είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης των νευρώνων του επιπέδου εξόδου (συναρτήσεις  $f_o(u)$  στο Σχ. 4), καθώς όπως προέκυψε από την παραμετρική διερεύνηση η συνάρτηση υπερβολικής εφασπτομένης (tansig) οδηγεί πάντα σε καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης σημαντικό συμπέρασμα είναι το ότι ο βέλτιστος αλγόριθμος εκπαίδευσης δεν είναι

πάντα ο ίδιος, αν και στην περίπτωση των 5 επιπέδων βλάβης είναι πάντα ο SCG. Έτσι προτείνεται να πραγματοποιείται πάντα μία διερεύνηση του βέλτιστου αλγορίθμου εκπαίδευσης σε αντίστοιχες διαδικασίες εκπαίδευσης. Τέλος, και ο αριθμός των νευρώνων στα επίπεδα των δικτύων μπορεί να προκύψει μόνο από παραμετρικές διερευνήσεις καθώς σύμφωνα και με την σχετική βιβλιογραφία δεν υπάρχει απευθείας μέθοδος (directmethod) ορισμού του. Η γενική μορφή των βέλτιστων ΤΝΔ που δημιουργήθηκαν με βάση τα δεδομένα του Πίνακα 2 παρουσιάζεται στο Σχ. 4.

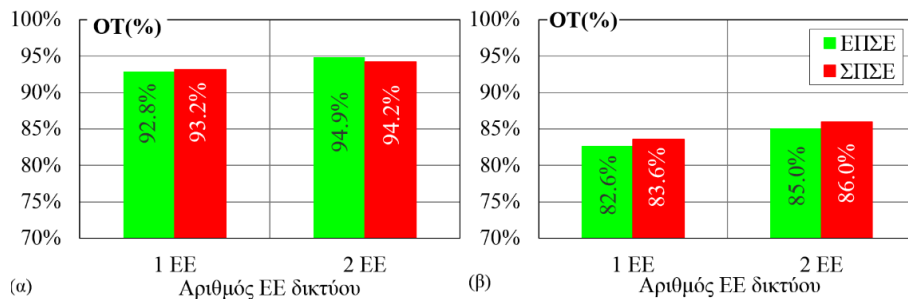


Σχήμα 4: Διαμόρφωση των βέλτιστων ΤΝΔ

#### 4 ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΕΩΝ ΤΟΥ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΒΛΑΒΗΣ ΑΠΟ ΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΑ ΤΝΔ

Στην παρούσα παράγραφο δίνονται τα αποτελέσματα της αποτίμησης των επιδόσεων των ΤΝΔ που προέκυψαν από την παραμετρική διερεύνηση που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3 (Πίνακας 2). Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται συγκριτικά με αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από προβλέψεις ΤΝΔ στα οποία ως σεισμικές παράμετροι εισόδου χρησιμοποιήθηκαν ΣΠΣΕ (βλ. [4, 15]).

Έτσι στο Σχ. 5 παρουσιάζονται τα ποσοστά των ορθών προβλέψεων (τιμές του δείκτη ΟΤ, Σχ. 3) που εξάγουν τα βέλτιστα διαμορφωμένα δίκτυα του Πίνακα 2 σε σύγκριση με τα αντίστοιχα ποσοστά ορθών προβλέψεων που προκύπτουν από τη χρήση δικτύων τα οποία προέκυψαν από αντίστοιχες παραμετρικές διερευνήσεις που παρουσιάζονται στις αναφορές [4] και [15]. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στις συγκεκριμένες αναφορές γίνεται χρήση 14 ΣΠΣΕ (βλ. [12]) και 4 δομικών (τα διανύσματα εισόδου αυτών των δικτύων έχουν διαστάσεις 18x1). Οι 4 δομικές παράμετροι είναι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιούνται και στην παρούσα εργασία, γεγονός που δίνει τη δυνατότητα να εξαχθούν συμπεράσματα αποκλειστικά για τη διαφοροποίηση που επιφέρει στο επίπεδο των προβλέψεων των δικτύων η χρήση ΣΠΣΕ ή ΕΠΣΕ.



Σχήμα 5: Ποσοστά ορθών προβλέψεων (OT) των ΤΝΔ με εισόδους εξελεγμένες (ΕΠΣΕ) και συμβατικές σεισμικές παραμέτρους (ΣΠΣΕ) για την περίπτωση (α) της θεώρησης 3 επιπέδων βλάβης και (β) 5 επιπέδων βλάβης.

Τα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από το Σχ. 5 είναι:

- Η χρήση των ΕΠΣΕ δεν διαφοροποιεί σημαντικά το επίπεδο της ακρίβειας των προβλέψεων των δικτύων σε σχέση με τις προβλέψεις που εξάγονται με τη χρήση ΣΠΣΕ. Έτσι, σε καμία από τις περιπτώσεις που παρουσιάζονται στο Σχ. 5 οι διαφορές δεν ξεπερνούν το 1%.
- Η προσθήκη του δεύτερου ΕΕ στα δίκτυα αυξάνει σε κάθε περίπτωση το επίπεδο των ορθών προβλέψεων. Η αύξηση αυτή είναι ελαφρώς μεγαλύτερη στην περίπτωση των 5 επιπέδων βλάβης. Ωστόσο, η αύξηση που επιτυγχάνεται από την προσθήκη του δεύτερου ΕΕ νευρώνων δεν μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη της αύξησης του υπολογιστικού κόστους που απαιτείται για την παραμετρική διερεύνηση του βέλτιστου δικτύου στις περιπτώσεις δικτύων με 1 ή 2 ΕΕ.
- Η πιο αδρομερής κατηγοριοποίηση των βλαβών (3 έναντι των 5 επιπέδων σεισμικής βλάβης) οδηγεί γενικά σε πολύ μεγάλο ποσοστό ορθών προβλέψεων (άνω του 90%), γεγονός πολύ σημαντικό αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι τα ΤΝΔ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μία πρώτη και σε σχεδόν πραγματικό χρόνο εκτίμηση του επιπέδου σεισμικής βλάβης μετά από έναν ισχυρό σεισμό.
- Γενικώς οι προβλέψεις των δικτύων ακόμα και στην περίπτωση των 5 επιπέδων βλάβης (είτε με ΣΠΣΕ είτε με ΕΠΣΕ) είναι πολύ ικανοποιητικές όταν χρησιμοποιούνται δίκτυα με 2 ΕΕ (σε κάθε περίπτωση  $OT > 85\%$ ).

Πέραν των συμπερασμάτων που μπορούν να προκύψουν από την σύγκριση του απόλυτου ποσοστού ορθών προβλέψεων των δικτύων μέσω του δείκτη OT (Σχ. 3), μια πιο λεπτομερής αποτίμηση των προβλέψεων των ΤΝΔ μπορεί να προκύψει μόνον από την μελέτη των πλήρων πινάκων ανάλυσης των ταξινομήσεων (CM). Έτσι, στο Σχ. 6 παρουσιάζονται τα CM για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις του Σχ. 5.

Από το Σχ. 6 προκύπτουν τα εξής βασικά συμπεράσματα:

- Η θεώρηση των ΕΠΣΕ δεν μεταβάλλει ριζικά το επίπεδο αξιοπιστίας των προβλέψεων των ΤΝΔ σε σχέση με τη θεώρηση των ΣΠΣΕ. Επομένως, τα επόμενα συμπεράσματα αφορούν και τις δύο αυτές θεωρήσεις.
- Η βελτίωση των προβλέψεων των ΤΝΔ με την προσθήκη δεύτερου ΕΕ δεν συνίσταται μόνον στην αύξηση του συνολικού ποσοστού ορθών προβλέψεων αλλά και στην αύξηση του ποσοστού των ορθών προβλέψεων ανά επίπεδο βλάβης (αύξηση τιμών των δεικτών R και P).
- Η θεώρηση 3 έναντι επιπέδων 5 επιπέδων βλάβης οδηγεί σε πιο μεγάλα ποσοστά ορθών προβλέψεων τόσο συνολικά όσο και ανά κατηγορία βλάβης. Έτσι, ο συνδυασμός ΤΝΔ με 2



ΕΕ και η θεώρηση 3 επιπέδων βλάβης οδηγεί σε επιτυχή πρόβλεψη του επιπέδου βλάβης σε ποσοστά περίπου 95%.

- Ο αριθμός των ταξινομήσεων που κάνουν τα ΤΝΔ σε επίπεδα σεισμικής βλάβης που δεν είναι γειτονικά του ορθού (π.χ. κατάταξη στο επίπεδο 3 ενώ το ορθό είναι το επίπεδο 1) είναι γενικώς ελάχιστος (βλ. γκριζα κελιά με κόκκινα γράμματα). Γίνεται μάλιστα αμελητέος όταν χρησιμοποιούνται ΤΝΔ με δύο κρυφά επίπεδα. Αυτό σημαίνει ότι η εικόνα των βλαβών που αποδίδουν τα δίκτυα δεν περιέχει στρεβλώσεις που μπορούν να οδηγήσουν σε εντελώς λάθος συμπεράσματα, αν και αποδίδεται σε πραγματικό χρόνο μετά από έναν σεισμό.

### Τρεις κατηγορίες σεισμικής βλάβης

		Ταξινόμηση δικτύου			
		1	2	3	R
Πραγματική	1	93	5	0	94.9%
	2	3	44	5	84.6%
	3	0	8	135	94.4%
	P	97%	77.2%	96.4%	92.8%

(α) Δίκτυο με 1 ΕΕ - ΕΠΣΕ

		Ταξινόμηση δικτύου			
		1	2	3	R
Πραγματική	1	82	3	0	96.5%
	2	3	46	9	79.3%
	3	0	5	145	96.7%
	P	96.5%	85.2%	94.2%	93.2%

(β) Δίκτυο με 1 ΕΕ - ΣΠΣΕ

		Ταξινόμηση δικτύου			
		1	2	3	R
Πραγματική	1	82	2	0	97.6%
	2	3	52	3	89.7%
	3	0	7	144	95.4%
	P	96.5%	85.2%	98.0%	94.9%

(γ) Δίκτυο με 2 ΕΕ - ΕΠΣΕ

		Ταξινόμηση δικτύου			
		1	2	3	R
Πραγματική	1	92	6	0	93.9%
	2	2	48	1	94.1%
	3	0	8	136	94.4%
	P	98%	77.4%	99.3%	94.2%

(δ) Δίκτυο με 2 ΕΕ - ΣΠΣΕ

### Πέντε κατηγορίες σεισμικής βλάβης

		Ταξινόμηση δικτύου					
		1	2	3	4	5	R
Πραγματική	1	41	1	0	0	0	97.6%
	2	2	31	2	0	0	88.6%
	3	0	7	54	16	2	68.4%
	4	0	0	7	35	7	71.4%
	5	0	0	2	5	81	92.0%
	P	95.3%	79.5%	83.1%	62.5%	90.0%	82.6%

(α) Δίκτυο με 1 ΕΕ - ΕΠΣΕ

		Ταξινόμηση δικτύου					
		1	2	3	4	5	R
Πραγματική	1	44	3	0	0	0	93.6%
	2	5	24	2	0	0	77.4%
	3	0	4	56	16	0	73.7%
	4	0	0	4	32	7	74.4%
	5	0	0	0	7	89	92.7%
	P	89.8%	77.4%	90.3%	58.2%	92.7%	83.6%

(β) Δίκτυο με 1 ΕΕ - ΣΠΣΕ

		Ταξινόμηση δικτύου					
		1	2	3	4	5	R
Πραγματική	1	48	6	0	0	0	88.9%
	2	2	31	3	0	0	86.1%
	3	0	4	56	5	1	84.8%
	4	0	0	9	39	6	72.2%
	5	0	0	0	8	75	90.4%
	P	96.0%	75.6%	82.4%	75.0%	91.5%	85.0%

(γ) Δίκτυο με 2 ΕΕ - ΕΠΣΕ

		Ταξινόμηση δικτύου					
		1	2	3	4	5	R
Πραγματική	1	41	2	0	0	0	95.3%
	2	4	34	4	0	0	81.0%
	3	0	2	48	6	0	85.7%
	4	0	0	12	37	5	68.5%
	5	0	0	0	6	92	93.9%
	P	91.1%	89.5%	75.0%	75.5%	94.8%	86.0%

(δ) Δίκτυο με 2 ΕΕ - ΣΠΣΕ

Σχήμα 6: Μητρώα CM για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις με 3 και 5 κατηγορίες σεισμικής βλάβης

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία διερευνήθηκε η δυνατότητα χρήσης Εξελιγμένων Παραμέτρων Σεισμικής Έντασης (ΕΠΣΕ) ως παραμέτρων εισόδου σε Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) τύπου Perceptron για την πρόβλεψη του επιπέδου σεισμικής βλάβης κτιρίων ο/σ με βάση τη διατύπωση και επίλυση προβλήματος αναγνώρισης προτύπων για 3 και 5 κατηγορίες σεισμικής βλάβης. Για το σκοπό αυτό έγινε μία εκτεταμένη διερεύνηση της διαμόρφωσης ΤΝΔ που

εξάγουν τις βέλτιστες προβλέψεις του επιπέδου σεισμικής βλάβης κτιρίων ο/σ έχοντας ως εισόδους 5 ΕΠΣΕ και 4 δομικές παραμέτρους. Οι προβλέψεις αυτών των δικτύων συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες προβλέψεις δικτύων τα οποία έχουν ως εισόδους 14 συμβατικές παραμέτρους σεισμικής έντασης (ΣΠΣΕ) και 4 δομικές παραμέτρους όμοιες με αυτές των ΤΝΔ που έχουν ως εισόδους ΕΠΣΕ. Το κυριότερο συμπέρασμα που προέκυψε από τη διερεύνηση είναι ότι η χρήση των 5 ΕΠΣΕ σε σχέση με τη χρήση των 14 ΣΠΣΕ δεν διαφοροποιεί ιδιαίτερα το επίπεδο των ορθών προβλέψεων των ΤΝΔ. Επομένως, τα συμπεράσματα από τη διερεύνηση των υπόλοιπων δύο βασικών διερευνώμενων παραμέτρων, όπως ο βέλτιστος αριθμός των εσωτερικών επιπέδων νευρώνων και ο αριθμός των κατηγοριών σεισμικής βλάβης, είναι κοινά και για τις δύο περιπτώσεις. Έτσι, όπως προέκυψε από τις αναλύσεις, η προσθήκη δεύτερου εσωτερικού επιπέδου νευρώνων δεν διαφοροποιεί σημαντικά το επίπεδο των ορθών προβλέψεων των δικτύων, ενώ η θεώρηση 3 κατηγοριών βλάβης (στη λογική «πράσινο»-«κίτρινο»-«κόκκινο») οδηγεί σε ορθές προβλέψεις σε ποσοστό της τάξης του 95% των εξεταζόμενων δειγμάτων. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι το συμπέρασμα ότι η χρήση ΕΠΣΕ δεν διαφοροποιεί σημαντικά τα αποτελέσματα σε σχέση με τη χρήση των ΣΠΣΕ είναι σημαντικό καθώς τεκμηριώνει και από διαφορετική «οδό» το συμπέρασμα προγενέστερων εργασιών σύμφωνα με το οποίο τα ΤΝΔ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιόπιστη και σε σχεδόν πραγματικό χρόνο εκτίμηση του επιπέδου σεισμικής βλάβης κτιρίων ο/σ μετά από έναν ισχυρό σεισμό.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anagnos T, Rojahn C, Kiremidjian AS. NCEER-ATC joint study on fragility of buildings. Technical Report NCEER 95-0003, State Univ. of New York at Buffalo: National Centre for Earthq. Engin. Research; 1995.
2. Ripley BD. Pattern Recognition and Neural Networks. Cambridge University Press; 1996.
3. Lautour OR, Omenzetter P. Prediction of seismic-induced structural damage using artificial neural networks. Eng Struct 2009;31:600–6.
4. Morfidis K, Kostinakis K. Approaches to the rapid seismic damage prediction of r/c buildings using artificial neural networks. Eng Struct 2018;165:120-141.
5. Kappos AJ. Sensitivity of calculated inelastic seismic response to input motion characteristics. 4<sup>th</sup> National Conference on Earthquake Engineering, Palm Springs, California, 1990, Vol. 2, p. 25-34.
6. Cordova PP, Deierlein GG, Mehanny SSF, Cornell CA. Development of a two-parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedure. 2<sup>nd</sup> US-Japan workshop on performance-based earthquake engineering methodology for RC building structures, 2001, p.187-206.
7. Bojorquez E, Iervolino I. Spectral shape proxies and nonlinear structural response. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2011; 31:996-1008.
8. Lin L, Naumoski N, Saatcioglu M, Foo S. Improved intensity measures for probabilistic seismic demand analysis, Part 1: development of improved intensity measures. Canadian Journal of Civil Engineering 2011a; 38:79-88.
9. Yahyaabadi A, Tehranizadeh M. New scalar intensity measure for near-fault ground motions based on the optimal combination of spectral response. Scientia Iranica 2011b; 18(6):1149-58.
10. Theodoridis S, Koutroumbas K. Pattern Recognition. 4<sup>th</sup> ed. Elsevier; 2008.
11. Naeim F. The seismic design handbook. 2nd ed. Boston: Kluwer Academic; 2011.
12. Kramer SL. Geotechnical earthquake engineering. Prentice-Hall; 1996.
13. Beyer K, Bommer JJ. Relationships between median values and between aleatory variabilities for different definitions of the horizontal component of motion. Bull Seismological Society of America 2006; 96(4A):1512–22.
14. Haykin S. Neural networks and learning machines. 3<sup>rd</sup> ed. Prentice Hall; 2009.
15. Μορφίδης Κ., Κωστινάκης Κ. Ταχεία εκτίμηση του επιπέδου σεισμικής βλάβης κτιρίων ο/σ με αλγόριθμο αναγνώρισης προτύπων και χρήση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. 18<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος, TEE, Αθήνα 29-31 Μαρτίου 2018.