



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Ανάπτυξη Μοντέλων Εμπειρικής Εκτίμησης Σεισμικού Κινδύνου της
πόλης της Λευκάδας**

Δήμητρα Γρ. Καλαντώνη

ΑΘΗΝΑ 2016

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ανάπτυξη Μοντέλων Εμπειρικής Εκτίμησης Σεισμικού Κινδύνου της πόλης
της Λευκάδας

Δήμητρα Γρ. Καλαντώνη

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Κωνσταντίνος Μακρόπουλος, Ομότιμος
Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:

Κωνσταντίνος Μακρόπουλος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΚΠΑ

Βασιλική Κουσκούνα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Ιωάννης Κασσάρας, Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Κωνσταντίνος Μακρόπουλος

Ομότιμος Καθηγητής ΕΚΠΑ

Νικόλαος Βούλγαρης

Καθηγητής ΕΚΠΑ

Βασιλική Κουσκούνα

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΚΠΑ

Γεώργιος Μπουκοβάλας

Καθηγητής ΕΜΠ

Ιωάννης Κασσάρας

Επίκουρος Καθηγητής ΕΚΠΑ

Παναγιώτης Παπαδημητρίου

Καθηγητής ΕΚΠΑ

Ελισάβετ Βιντζηλαίου

Καθηγήτρια ΕΜΠ

Ημερομηνία εξέτασης:

27/09/2016

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της διατριβής είναι η ανάπτυξη μοντέλων σεισμικού κινδύνου για μεμονωμένα κτίρια στην παλιά πόλη της Λευκάδας, πρωτεύουσας του νησιού της Λευκάδας, το οποίο ανήκει στα Ιόνια νησιά, σε μια από τις πλέον σεισμικές περιοχές της Ελλάδας και κατ'επέκταση της Μεσογείου. Τα περισσότερα από τα κτίρια του ιστορικού κέντρου της πόλης είναι κατασκευασμένα με παραδοσιακό τρόπο δόμησης και αποτελούν αντιπροσωπευτικές αντισεισμικές κατασκευές, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο Πολιτιστικής Κληρονομιάς.

Το προτεινόμενο μοντέλο προκύπτει από τη συνέλιξη της τρωτότητας των κτιρίων της πόλης της Λευκάδας, σεισμικών πηγών που αντιστοιχούν στο ρήγμα μετασχηματισμού Κεφαλονιάς - Λευκάδας και του τοπικού εδαφικού παράγοντα ενίσχυσης. Η τρωτότητα των κτιρίων εκτιμήθηκε μέσω της Ευρωπαϊκής Μακροσεισμικής Κλίμακας (EMS-98). Η απόκριση των εδαφικών σχηματισμών προσδιορίστηκε από τις μετρήσεις μικροθορύβου και τον υπολογισμό των φασματικών λόγων των οριζόντιων ως προς την κατακόρυφη συνιστώσα (καμπύλες HVSR). Οι μέγιστες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης υπολογίστηκαν μέσω στοχαστικής προσομοίωσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης με χρήση σημειακής πηγής και πεπερασμένου ρήγματος, λαμβάνοντας υπόψη τον παράγοντα ενίσχυσης. Ο τελευταίος προσδιορίστηκε μέσω μετρήσεων μικροθορύβου για 2 σεισμικά σενάρια: α) τον σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου 2003, μεγέθους $M_w=6.2$, σε απόσταση 13 χλμ από το κέντρο της παλιάς πόλης της Λευκάδας και β) μέγιστο αναμενόμενο σεισμό μεγέθους $M_w=7$ στην ίδια απόσταση, σύμφωνα με την πιθανολογική μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας που διεξήχθη στα πλαίσια αυτής της διατριβής. Επιπλέον υπολογίστηκε η μέγιστη πιθανότητα βαθμού βλάβης δια μέσου στατιστικών σχέσεων. Τα κτίρια της παλιάς πόλης της Λευκάδας, βάσει της ανάλυσης που περιγράφεται στην παρούσα διατριβή, ανταποκρίνονται καλά σε σεισμό όμοιο με αυτόν του 2003, κινδυνεύουν όμως να υποστούν σοβαρές βλάβες στην περίπτωση ενός ισχυρότερου σεισμού.

Οι εκτιμώμενες βλάβες για το σενάριο του σεισμού του 2003, $M_w=6.2$, συσχετίζονται πολύ καλά με τις καταγραφείσες βλάβες ενός μεγάλου αριθμού κτιρίων, υποδεικνύοντας την αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ : Τεχνική Σεισμολογία

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: τρωτότητα κατασκευών, επίδραση τοπικών συνθηκών, σεισμικός κίνδυνος, στοχαστική προσομοίωση, παραδοσιακές κατασκευές της Λευκάδας.

ABSTRACT

The scope of this thesis is the development and evaluation of a seismic risk model in a building by building scale within the old town of Lefkada, capital of Lefkada Island, Greece. Lefkada is part of the Ionian Islands, a most seismically active area in Greece that has suffered numerous destructive earthquakes. Most of the buildings of the historical center of the town were built by local practices and have been designated as representative earthquake resistant constructions by the European Council Cultural Heritage Unit. The town is situated on low resistance and rigidity Holocene alluvial and lagoon deposits of 9 to 16 meter thickness. The local amplification of ground motion typically depends on the soil deposits.

The proposed model derived by combining seismic sources, building vulnerability and site effects. Vulnerability was assessed empirically for individual buildings through a field survey using the assumption of EMS-98. Site effects were determined using ambient noise HVSR measurements at selected points in LOT and geotechnical data. Peak ground acceleration was assessed using both the finite fault and the point-source stochastic simulation scheme, taking into account the local amplification factor derived by ambient noise measurements. Seismic risk scenarios were developed through employing two seismic sources: (a) the earthquake of August 14th 2003, $M_w=6.2$ and (b) a future Maximum Credible Earthquake of $M_w=7.0$, expected at the same distance according to the probabilistic seismic hazard analysis elaborated. Moreover, the discrete damage state probability for each building was resolved. The estimated seismic damage scenarios correlate very well to the observed damage for a large number of buildings, thus implying that the proposed model is a reliable one. The buildings of Lefkada old town present satisfactory seismic behavior under the load of an earthquake similar to the one of 2003, but are susceptible to serious damage in case of a stronger earthquake.

SUBJECT AREA: Engineering Seismology

KEYWORDS: structural vulnerability, site effects, seismic risk, stochastic simulation, traditional buildings of Lefkada

*Η διατριβή αυτή είναι αφιερωμένη στην οικογένειά μου, τον Νώντα,
τη Νεφέλη και τη Δανάη, που με στήριξαν τόσο πολύ όλα αυτά τα χρόνια.*

Πρόλογος- Ευχαριστίες

Η μελέτη αυτή δεν θα είχε πραγματοποιηθεί χωρίς την υποστήριξη του επιβλέποντα την διατριβή μου κ. Κ. Μακρόπουλου, Ομότιμου Καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του ΕΚΠΑ. Τον ευχαριστώ θερμά για την ανάθεση του θέματος, τις εποικοδομητικές συμβουλές και την επίβλεψη του καθ' όλη την διάρκεια της έρευνας.

Αισθάνομαι ιδιαίτερη υποχρέωση στον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ι. Κασσάρα για την καθοδήγηση και τις παρεμβάσεις του. Η στήριξή που μου παρείχε όλο αυτό το διάστημα ήταν καθοριστική. Τον ευχαριστώ πολύ για αυτό.

Ευχαριστώ επίσης την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια κ. Β. Κουσκουνά, για τις εποικοδομητικές συζητήσεις μας, παρατηρήσεις και συμβουλές της αλλά και την υποστήριξή της.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω επίσης και τα άλλα μέλη της επταμελούς εξεταστικής Επιτροπής. Την Καθηγήτρια κ. Ελ. Βιντζηλαίου για τις εύστοχες παρατηρήσεις της σε ειδικά θέματα της παρούσας διατριβής, καθώς και τους Καθηγητές κ. Ν. Βούλγαρη, κ. Γ. Μπουκοβάλα και κ. Π. Παπαδημητρίου.

Πολύτιμες ήταν οι συμβουλές σε ειδικά θέματα του κ. Αντ. Πομόνη και της Δρ. Φ. Καράμπαμπα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την Δρ. Κ. Παύλου για την σημαντική της βοήθεια κατά την επί τόπου έρευνα, την Δρ. Σπ. Βασιλοπούλου, τον Δρ. Γ. Καβύρη, Επίκουρο καθηγητή και τον κ. Ν. Σακελλαρίου, υποψήφιο διδάκτορα στον τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας, για την συνεργασία μας και την ενθάρρυνση στην προσπάθειά μου.

Ευχαριστώ την κ. Α. Μιχαλάκη και τους κ.κ. Σ. Μουρλούκο, Σ. Μπιρμπιλόπουλο, Π. Στούμπο για τη συμβολή τους στην ανάλυση δεδομένων μέρους της διατριβής μου στο πλαίσιο της διπλωματικής τους εργασίας, καθώς και την κ. Δ. Καζαντζίδου, Πολιτικό Μηχανικό.

Επίσης ευχαριστώ θερμά την κ. Ι. Σωτήρχου για την φιλολογική επιμέλεια της διατριβής μου και την ευγενική ενθάρρυνσή της.

Κατά τη διάρκεια της συλλογής των στοιχείων και της οργάνωσης της βάσης δεδομένων μου βοήθησαν καθοριστικά η κ. Χρ. Κίτσαντά και ο κ. Κτενάς,

Ανάπτυξη Μοντέλων Εμπειρικής Εκτίμησης Σεισμικού Κινδύνου της πόλης της Λευκάδας

Πολιτικοί Μηχανικοί στον Τομέα Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων Λευκάδος,
και οι κ.κ. Δρ Ν. Μαλακάτας, Ι. Βασιλείου (Κ.Ε.Δ.Ε.).

Σας ευχαριστώ.

Περιεχόμενα

Περίληψη	05
Abstract	07
Πρόλογος	09
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	14
Κεφάλαιο 2 Ανασκόπηση σχετικών ερευνών	22
2.1 Μελέτη επίδρασης τοπικών εδαφικών συνθηκών	24
2.2 Σεισμική επικινδυνότητα	30
2.2.1 Αιτιατικές μέθοδοι	30
2.2.2 Πιθανολογικές μέθοδοι	32
2.3 Σεισμική τρωτότητα κτιρίων.	33
2.3.1 Εμπειρικές μέθοδοι	34
2.3.2 Αναλυτικές μέθοδοι	39
2.3.3 Υβριδικές μέθοδοι	40
Κεφάλαιο 3 Μεθοδολογία	43
3.1 Εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των κτιρίων	43
3.2 Εκτίμηση ισχυρής εδαφικής κίνησης	45
3.2.1 Πιθανολογική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας	47
3.2.2 Εκτίμηση των χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών	48
3.2.3 Στοχαστική προσομοίωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης	50
3.2.3.α Μέθοδος σημειακής πηγής	50
3.2.3.β Μέθοδος πεπερασμένου ρήγματος	51
3.3 Σύνθεση σεναρίων σεισμικού κινδύνου	52
Κεφάλαιο 4 Γεωλογική και Σεισμοτεκτονική ανάλυση	55
4.1 Γεωλογία- Στρωματογραφία	55
4.2 Τεκτονική	58
4.3 Σεισμικότητα της Λευκάδας	60
Κεφάλαιο 5 Χαρακτηριστικά κτιριακού αποθέματος	72
5.1 Ιστορία του δομικού συστήματος της πόλης της Λευκάδας	72
5.2 Απογραφή του δομικού ιστού της πόλης της Λευκάδας	76
5.2.1 Κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα	80
5.2.2 Παραδοσιακά κτίρια	84

5.2.2.1 Πέτρινα (Λιθοδομή)	84
5.2.2.2 Κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης από λιθοδομή με ξυλόπηκτη τοιχοποιία (ποντελάρισμα)	84
5.2.2.3 Ξύλινα Κτίρια	90
5.2.3 Μνημειακά κτίρια	91
5.3 Σύνοψη ταξινόμησης κτιριακού αποθέματος	92
Κεφάλαιο 6 Εκτίμηση σεισμικής τρωτότητας	100
6.1 Εκτίμηση κατηγορίας τρωτότητας	100
6.1.1. Ο αντισεισμικός σχεδιασμός	100
6.1.2. Η κανονικότητα των κτιρίων	101
6.1.3. Η κατάσταση συντήρησης	102
6.1.4. Η ελαστικότητα των κτιρίων	104
6.1.5. Η θέση του κάθε κτιρίου εντός οικοδομικού τετραγώνου, καθώς και σε σχέση με τα γειτονικά του	104
6.2 Εκτίμηση δείκτη τρωτότητας	113
6.3 Εκτίμηση δείκτη τρωτότητας του δομικού ιστού το 2003	120
Κεφάλαιο 7 Ανάλυση βλαβών του σεισμού του 2003	130
Κεφάλαιο 8 Γεωτεχνική ανάλυση και προσδιορισμός ελαστικού μοντέλου του εδάφους θεμελίωσης.	147
8.1 Ανάλυση γεωτεχνικών στοιχείων στην παλιά πόλη της Λευκάδας	147
8.2 Εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών μέσω μετρήσεων μικροθρύβου	158
8.3 Προσδιορισμός ελαστικών παραμέτρων της εδαφικής στήλης	165
8.4 Αποτελέσματα	171
Κεφάλαιο 9 Προσομοίωση Ισχυρής Εδαφικής Κίνησης.	187
9.1 Εισαγωγή	187
9.2 Προσομοίωση του σεισμού του 2003	187
9.2.1 Μέθοδος σημειακής πηγής	187
9.2.2 Μέθοδος πεπερασμένου ρήγματος	194
9.3 Υπολογισμός του μέγιστου μεγέθους σεισμού	198
9.4 Προσομοίωση μέγιστου αναμενόμενου σεισμού	199
9.4.1 Μέθοδος σημειακής πηγής	199
9.4.2 Μέθοδος πεπερασμένου ρήγματος	200

Κεφάλαιο 10 Σύνθεση Σεναρίων Σεισμικού Κινδύνου	203
10.1 Σχέση σεισμικής έντασης - μέγιστης επιτάχυνσης	203
10.2 Ανάλυση σεισμικού σεναρίου για σεισμό μεγέθους M 6.2	204
10.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων προτεινόμενου μοντέλου με	212
πραγματικές βλάβες	
10.4 Ανάλυση σεισμικού σεναρίου για σεισμό μεγέθους M7	215
Κεφάλαιο 11 Σύνοψη Συμπεράσματα	225
11.1 Σύνοψη	225
11.2 Συμπεράσματα	226
Γλωσσάριο	232
Πίνακας Συντμήσεων Αρκτικόλεξων	244
Βιβλιογραφία	245

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Είναι γνωστό ότι τις τελευταίες δεκαετίες πολλές περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση πληθυσμού (Kobe 1995, Τουρκία 1999, Ταϊβάν 2001) έχουν πληγεί από σεισμούς με απώλειες σε ανθρώπινες ζωές αλλά και οικονομικές επιπτώσεις (Dolce, 2003; Coburn and Spence, 2006; Trendafiloski et al., 2011; Wyss et al., 2012). Κατά τη διάρκεια του εικοστού αιώνα, ένα εκατομμύριο εννιακόσιες χιλιάδες άνθρωποι έχασαν τη ζωή τους από καταστροφικούς σεισμούς (Oliveira et al., 2004). Ακόμα και σε ανεπτυγμένες χώρες με εμπειρία σε σεισμούς, οι συνέπειες ήταν ολέθριες, όπως στην Ιαπωνία το 2011 (Mimura et al., 2011; Goda et al., 2012). Το 90% των άμεσων θανάτων από σεισμούς οφείλεται σε κατάρρευση κτιρίων (Latanda et al., 2008).

Ακόμη μεγαλύτερος προβληματισμός δημιουργήθηκε όταν κατά την εκδήλωση σεισμών σε περιοχές, όπως π.χ. στη Λευκάδα το 2003, στην Αϊτή το 2010, στην Κεφαλονιά το 2014 αλλά και στο Νεπάλ το 2015, οι τιμές των μέγιστων σεισμικών παραμέτρων εδαφικής κίνησης ξεπέρασαν τις προβλεπόμενες τιμές από τους ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς καθιστώντας τους μη επαρκείς. Στον Ελλαδικό χώρο, η αύξηση της δόμησης σε σεισμικά ευάλωτες περιοχές τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά και η αύξηση της τρωτότητας των κατασκευών λόγω κακής συντήρησης εξαιτίας της οικονομικής κρίσης (Kassaras and Sotirhos, 2015) έχουν προκαλέσει αύξηση του σεισμικού κινδύνου.

Σεισμικός κίνδυνος (K) (seismic risk) μιας περιοχής ορίζεται ως ο συνδυασμός, η συνέλιξη στη μαθηματική γλώσσα, της **Σεισμικής Επικινδυνότητας** (Σ) (seismic hazard) της περιοχής, δηλαδή η πιθανότητα να γίνει ένας μεγάλος σεισμός στα προσεχή (t) έτη στην περιοχή αυτή, του **Βαθμού Τρωτότητας** (T), (seismic vulnerability) δηλαδή πόσο ευάλωτο είναι το δομημένο περιβάλλον της περιοχής και συνεπώς ο κοινωνικός ιστός σε ενδεχόμενο μεγάλο σεισμό, καθώς και της **Διακινδυνευομένης αξίας** (A), η οποία προσδιορίζεται από το πόσο σημαντικές κατασκευές, από οικονομικής και κοινωνικής πλευράς, υπάρχουν και επομένως βρίσκονται εκτεθειμένες

στον κίνδυνο να υποστούν σοβαρές βλάβες σε πιθανό σεισμό. Με την ευρύτερη έννοια ο όρος αυτός είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να περιγραφούν οι αναμενόμενες υλικές και οικονομικές συνέπειες ενός σεισμού, όπως αποτυπώνεται στο παρακάτω μοντέλο (Wang, 2006; Carreno et al., 2007a; Barbat et al., 2009; Makropoulos, 2010).

$$K=\Sigma T \cdot A \quad (1)$$

Πιο συγκεκριμένα, η σεισμική τρωτότητα μιας κατασκευής εκφράζει την πιθανή βλάβη που αυτή θα υποστεί για συγκεκριμένη εδαφική κίνηση και εξαρτάται κυρίως από τα δομικά και μη δομικά χαρακτηριστικά της κατασκευής (Braga et al., 1982; Grünthal, 1998; Giovinazzi και Lagomarsino, 2004; Calvi et al., 2006; Gálvez et al., 2013). Η διακινδυνευόμενη αξία αποτυπώνει τη σπουδαιότητα του κτιρίου ανάλογα με τη χρήση του και το σύνολο των ατόμων που στεγάζονται σε αυτό, καθώς και το κόστος επισκευής των βλαβών που θα υποστεί μετά από σεισμό. (Lantada et al., 2010).

Η σεισμική επικινδυνότητα εκφράζει την πιθανότητα να συμβεί δεδομένος σεισμός σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο, δηλαδή το επίπεδο της αναμενόμενης ισχυρής εδαφικής κίνησης (Cornell, 1968; McGuire, 1976; Makropoulos, 1978; Makropoulos and Burton, 1985; Krinitzsky, 1995; Romeo and Prestininzi, 2000), λαμβάνοντας υπόψη τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους θεμελίωσης (Seed et al., 1991; Ansal et al., 1993; Makropoulos et al., 1996; Tertulliani, 2000; Bouckovalas et al., 2003). Επομένως γίνεται αντιληπτό ότι η σεισμική επικινδυνότητα μιας περιοχής, δεδομένου ότι αυτή εξαρτάται από τη σεισμικότητα και το τεκτονικό καθεστώς της, δεν μπορεί να μειωθεί.

Η κύρια προσπάθεια των Γεωεπιστημόνων περιορίζεται στην αποτύπωσή της όσο πιο αξιόπιστα γίνεται, ώστε να δοθούν τα απαραίτητα στοιχεία στους μηχανικούς για την ανάπτυξη ενός σωστού αντισεισμικού σχεδιασμού. Επίσης η οικονομική αλλά και κοινωνική αξία των στοιχείων ή υποδομών που εκτίθενται σε κίνδυνο (Διακινδυνευόμενη Αξία), θεωρείται δεδομένη για την κάθε υπό μελέτη περιοχή. Επομένως, ο μόνος εκ των παραγόντων σεισμικού κινδύνου που δύναται να δεχτεί παρέμβαση είναι η τρωτότητα, τόσο όσον αφορά στις υφιστάμενες ανά περίπτωση τεχνικές υποδομές όσο και στον

κοινωνικό ιστό, ώστε να μειωθούν κατά το μέγιστο δυνατό οι απώλειες που οφείλονται στην εκδήλωση σεισμών.

Ο σεισμικός κίνδυνος, η πρόβλεψη των αναμενόμενων ζημιών και ο σχεδιασμός της διαχείρισης έκτακτης ανάγκης μετά από σεισμό, αποτέλεσε αντικείμενο πολλών επιστημονικών μελετών σε παγκόσμιο και σε εθνικό επίπεδο (Bardat et al. 1996; D'Ayala et al., 1997; Dolce et al., 2003; Lantada et al. 2004; RISK-UE project, Milutinovic and Trendafiloski, 2003; ENSerVES project, 2003; Mouroux et al., 2006; Kappos et al., 2008; Pomonis et al., 2012).

Το κύριο μέλημα αυτών των μελετών ήταν αφενός η καταγραφή των τύπων των κτιρίων και η μελέτη της τρωτότητας κάθε τύπου και αφετέρου, ο καθορισμός του μέγιστου αναμενόμενου σεισμού για την περιοχή λαμβάνοντας υπόψη την απόκριση του εδάφους. Στις παραπάνω μελέτες μελετάται η τρωτότητα του δομικού ιστού χωρίζοντας τις κατασκευές σε κατηγορίες με κοινά δομικά και μη δομικά χαρακτηριστικά που την επηρεάζουν, χωρίς να εκτιμάται η τρωτότητα ανά κτίριο.

Σύμφωνα με την εμπειρία από καταστροφικούς σεισμούς, κτίρια που ανήκουν στον ίδιο τύπο και είναι θεμελιωμένα στο ίδιο έδαφος δεν παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά (Gent et al., 2008). Παράγοντες όπως η συντήρηση των κτιρίων, η κανονικότητα του σχήματός τους, η θέση τους στο οικοδομικό τετράγωνο αλλά και παρεμβάσεις στο αρχικό τους σχέδιο μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ευστάθειά τους σε περίπτωση σεισμού (Grünthal, 1998). Έχουν πραγματοποιηθεί μελέτες που λαμβάνουν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε κτιρίου χωριστά χρησιμοποιώντας στοιχεία των απογραφών ή αεροφωτογραφιών (Lantada et al., 2010; Gálvez et al., 2013). Τα κτίρια που περιγράφονται σε αυτές είναι κυρίως πέτρινα ή από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Κατά την επικρατούσα άποψη τα κτίρια που έχουν κατασκευαστεί με σύγχρονα υλικά σύμφωνα με μοντέρνους αντισεισμικούς κανονισμούς είναι λιγότερο τρωτά στο σεισμό. Έχει όμως διαπιστωθεί σε πολλές περιπτώσεις η απροσδόκητα καλή συμπεριφορά κτιρίων κατασκευασμένων με παραδοσιακές μεθόδους προηγούμενων αιώνων (Tobriner, 2008). Σε κάποιες

από τις περιπτώσεις αυτές, η συμπεριφορά τους είναι καλύτερη από εκείνη των κτιρίων από σκυρόδεμα. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η καλύτερη συμπεριφορά τους μπορεί να οφείλεται σε κακοτεχνίες στην κατασκευή σύγχρονων κτιρίων σε σχέση με τα παραδοσιακά (Gülkan and Langenbach, 2004). Κατασκευές με παραδοσιακό τρόπο δόμησης ή σύγχρονες κατασκευές στις οποίες έχουν εφαρμοστεί ιδιαίτερες παραδοσιακές τεχνικές εφαρμόζονται ακόμη σε περιοχές αυξημένης σεισμικής επικινδυνότητας όπως στην Τουρκία, το Πακιστάν και το Μπουτάν (Langenbach et al., 2000; Gülkan and Langenbach, 2004; Langenbach, 2010) αλλά και στην Ελλάδα στην παλιά πόλη της Λευκάδας (Vintzileou et al., 2007; Karababa, 2007; Karababa and Pomonis, 2011). Οι κατασκευές αυτές, χρήζουν ιδιαίτερης μελέτης ώστε να γίνουν κατανοητοί οι παράγοντες που συμβάλλουν στην αντισεισμική συμπεριφορά τους. Παρόλα αυτά μελέτες εκτίμησης σεισμικού κινδύνου σε κλίμακα μεμονωμένου κτιρίου σε περιοχές με τέτοιου τύπου κατασκευές δεν αναφέρονται μέχρι τώρα.

Επίσης όπως έχει ήδη αναφερθεί οι υπάρχοντες αντισεισμικοί κανονισμοί (International Seismic Code, 2000; Uniform Building Code, 1997; Eurocode 8, 2001) δεν ήταν πάντα επαρκείς, μιας και τα εδάφη θεμελίωσης κατατάσσονται σε μεγάλες κατηγορίες χωρίς τον ακριβή προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών τους. Συνεπώς γίνεται αντιληπτό, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τα σφάλματα των εκτιμήσεων όσο και την έως σήμερα προσέγγιση του προβλήματος μελέτης του σεισμικού κινδύνου και των επιπτώσεων αυτού, ότι η δημιουργία μικρής κλίμακας μοντέλων σεισμικού κινδύνου τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη τους παράγοντες που καθορίζουν τη σεισμική τρωτότητα κάθε μεμονωμένου κτιρίου, τον μέγιστο σεισμό σχεδιασμού κοντινού πεδίου και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στη θέση θεμελίωσης του κτιρίου, θα συμβάλει στον περιορισμό του σεισμικού κινδύνου και την ανάπτυξη αποτελεσματικότερων αντισεισμικών σχεδιασμών.

Μια τέτοια προσέγγιση θα συμβάλει στην καλύτερη εκτίμηση του μέγιστου αναμενόμενου βαθμού βλάβης κάθε κτιρίου και στη λήψη μέτρων που θα βελτιώσουν την συμπεριφορά του στο σεισμό. Εάν αυτό συμβεί μπορεί να περιοριστεί σημαντικά η κατάρρευση κτιρίων, η οποία όπως σύμφωνα με προαναφερθείσες μελέτες συνδέεται με το μεγαλύτερο ποσοστό απωλειών

ανθρωπίνων ζωών (Lantada et al., 2008). Επίσης θα μειωθούν οι οικονομικές επιπτώσεις από την απώλεια περιουσιών τόσο για τους πολίτες όσο και για το κράτος όσο και η ψυχολογική επιβάρυνση των ανθρώπων που δεν μπορούν να διαμείνουν στα σπίτια τους ή ακόμη χειρότερα εάν στην οικογένειά τους υπάρχουν ανθρώπινες απώλειες λόγω ενός σεισμού. Οι δευτερεύουσες συνέπειες του σεισμού, όπως φωτιά, πλημμύρα, κατολισθήσεις δεν λαμβάνονται υπόψη στο προτεινόμενο μοντέλο.

Μία καινοτομία της παρούσας έρευνας είναι ότι ο σεισμικός κίνδυνος εκτιμάται σε περιοχή που παρατηρούνται πολλοί δομικοί τύποι κατασκευών (κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, πέτρινα, ξύλινα) με ιδιαίτερη αντισεισμική συμπεριφορά. Για την απόδοση κατηγοριών τρωτότητας προτάθηκαν υποκατηγορίες τρωτότητας στον πίνακα τάξεων τρωτότητας της Ευρωπαϊκής Μακροσεισμικής Κλίμακας (EMS-98).

Στη διατριβή αυτή αναπτύσσεται **μοντέλο εκτίμησης σεισμικού κινδύνου σε κλίμακα μεμονωμένου κτιρίου στην παλιά πόλη της Λευκάδας**. Η περιοχή της Λευκάδας επιλέχθηκε διότι:

- Ανήκει στην υψηλότερη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας του Ελλαδικού χώρου σύμφωνα με το Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό με αναμενόμενη μέγιστη επιτάχυνση $PGA=0.36g$ για 475 έτη (90% πιθανότητα μη υπέρβασης στα επόμενα 50 χρόνια), (NEAK, 2004), τιμή η οποία υπερβλήθηκε τόσο κατά το σεισμό του 1973 (Gazetas et al., 2004), όσο και κατά το σεισμό στις 14 Αυγούστου του 2003 (0.42g) (ΙΤΣΑΚ, 2003).
- Υπάρχουν διαθέσιμες πυκνές μετρήσεις μικροθορύβου (Kassaras et al., 2008).
- Μεγάλο μέρος των κτιρίων της Λευκάδας είναι χτισμένα με ιδιότυπο παραδοσιακό τρόπο δόμησης που παρουσιάζει αντισεισμικό χαρακτήρα (Vintzileou et al., 2007; Karababa, 2007; Karababa and Pomonis 2011).
- Τα διαθέσιμα απογραφικά στοιχεία των κτιρίων της ΕΛΣΤΑΤ του 2001, πολύτιμα για την ανάλυση των δομικών χαρακτηριστικών των κτιρίων πριν το σεισμό του 2003 (ΕΠΑΝΤΥΚ, 2009; Kalantoni et al., 2013).

- Υπάρχουν διαθέσιμα αναλυτικά δεδομένα των βλαβών που υπέστησαν τα κτίρια κατά το σεισμό του 2003, γεγονός που αναμένεται να συμβάλει καθοριστικά στην επιβεβαίωση της ορθότητας ή μη του προτεινόμενου μοντέλου.

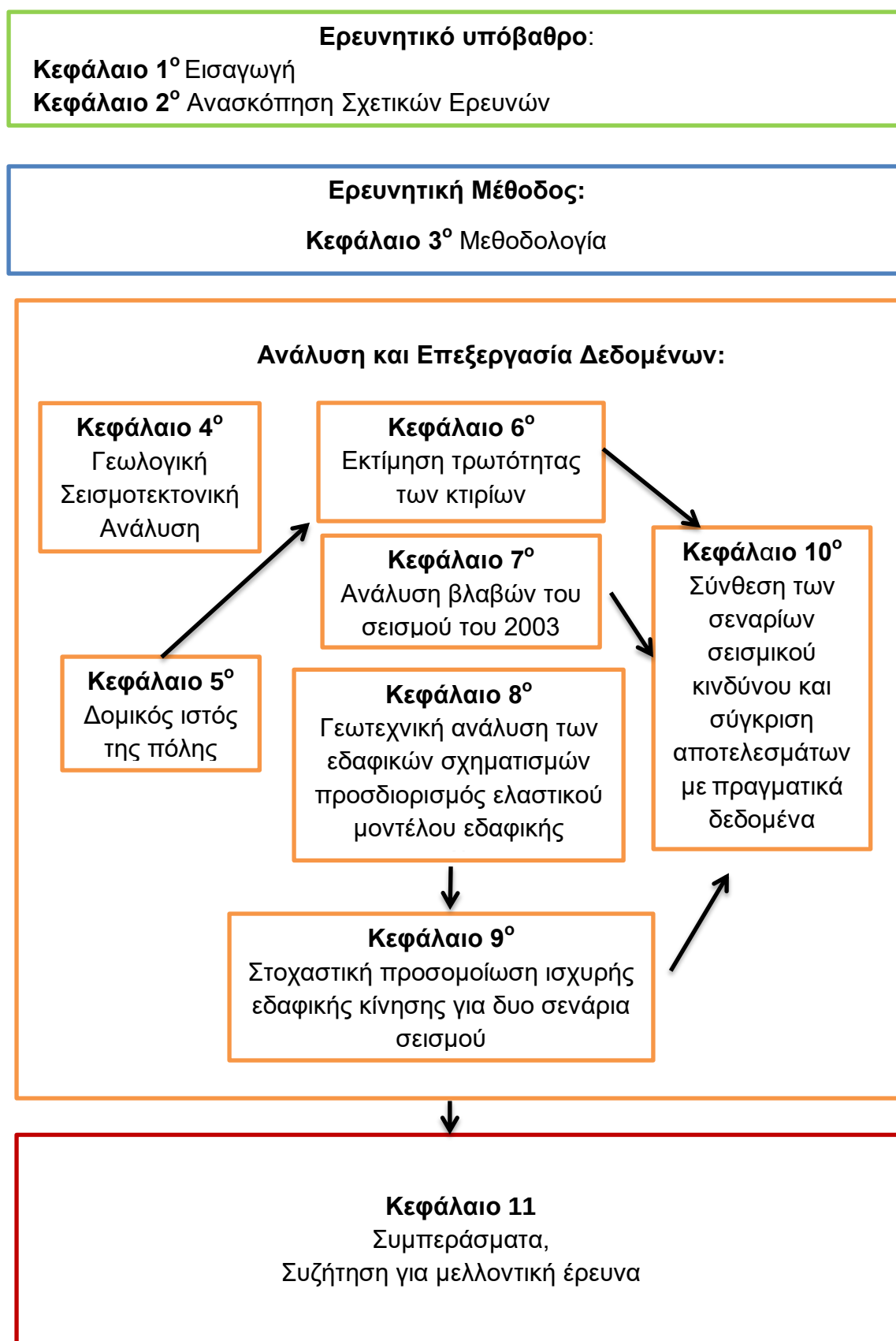
Τα στάδια που ακολουθήθηκαν είναι:

1. Απογραφή στο πεδίο του δομικού ιστού της πόλης και δημιουργία βάσης δεδομένων χρησιμοποιώντας Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.
2. Ανάλυση σεισμικής τρωτότητας κάθε κτιρίου της παλιάς πόλης
3. Ανάλυση των βλαβών που υπέστησαν τα κτίρια κατά το σεισμό του 2003.
4. Εκτίμηση της απόκρισης και των δυναμικών χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών στη θέση θεμελίωσης κάθε κτιρίου χρησιμοποιώντας μετρήσεις μικροθορύβου και γεωτεχνικά δεδομένα.
5. Προσομοίωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης για χαρακτηριστικές για την περιοχή σεισμικές πηγές.
6. Σύνθεση σεναρίων σεισμικού κινδύνου.
7. Σύγκριση αποτελεσμάτων με πραγματικά δεδομένα για την επιβεβαίωση της ορθότητας του μοντέλου.

Η δομή της διατριβής είναι η ακόλουθη (Σχ.1):

- Το παρόν, εισαγωγικό πρώτο κεφάλαιο αναλύει τους λόγους που επιλέχτηκε το αντικείμενο της διατριβής και θέτει τους στόχους της.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται κριτική ανασκόπηση αντίστοιχων μεθόδων που έχουν εφαρμοστεί σύμφωνα με τη βιβλιογραφία.
- Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το γεωλογικό και σεισμοτεκτονικό καθεστώς της Λευκάδας.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται ο δομικός ιστός της παλιάς πόλης.
- Στο έκτο κεφάλαιο αναλύεται ο καθορισμός της τάξης και του δείκτη τρωτότητας κάθε κτιρίου.
- Στο έβδομο κεφάλαιο αναλύονται οι βλάβες των κτιρίων κατά τον σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου 2003.

- Στο όγδοο κεφάλαιο αναπτύσσεται η γεωτεχνική συμπεριφορά των εδαφικών σχηματισμών της πόλης, η εκτίμηση της απόκρισης και των δυναμικών χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών καθώς και ο προσδιορισμός των ελαστικών μοντέλων εδαφικής στήλης.
- Στο ένατο κεφάλαιο αναλύεται η στοχαστική προσομοίωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης στην παλιά πόλη της Λευκάδας για δυο σενάρια σεισμών, το σεισμό του 2003 και τον μέγιστο αναμενόμενο σεισμό σύμφωνα με την πιθανολογική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας.
- Στο δέκατο κεφάλαιο γίνεται σύνθεση των σεναρίων σεισμικού κινδύνου για δυο σενάρια σεισμών. Τα αποτελέσματα για σενάριο σεισμού ίδιου με αυτόν του 2003 συγκρίνονται με τα πραγματικά αποτελέσματα του εν λόγω σεισμού στην πόλη.
- Στο ενδέκατο κεφάλαιο αναπτύσσονται τα συμπεράσματα της έρευνας και σχολιάζονται θέματα μελλοντικής αξιοποίησης της διατριβής.



Σχήμα 1: Δομή της διατριβής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Ανασκόπηση σχετικών ερευνών

Στόχος του Κεφαλαίου αυτού είναι η ανάλυση των μεθόδων που έχουν εφαρμοστεί σε εθνικό και παγκόσμιο επίπεδο για τον καθορισμό του σεισμικού κινδύνου. Όπως προκύπτει από τον ορισμό του σεισμικού κινδύνου, στις μελέτες εκτίμησής του σε μια περιοχή, μελετάται τόσο η σεισμική τρωτότητα του δομικού ιστού όσο και η σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής. Κατά την ανασκόπηση προηγούμενων ερευνών διαπιστώθηκε ότι έχουν πραγματοποιηθεί και μεμονωμένες μελέτες για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας ή της τρωτότητας. Επίσης έχουν εφαρμοστεί μέθοδοι εκτίμησης της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην αναμενόμενη ισχυρή εδαφική κίνηση. Ακολούθως παρουσιάζονται αναλυτικά οι κυριότερες μεθοδολογίες εκτίμησης όλων αυτών των παραμέτρων.

Πολλά ερευνητικά προγράμματα είχαν ως αντικείμενο τη μελέτη του σεισμικού κινδύνου, κυρίως σε μεγάλες πόλεις. Ένα διαδραστικό λογισμικό, το HAZUS, εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση του σεισμικού κινδύνου στις Η.Π.Α από τον Ομοσπονδιακό Οργανισμό Διαχείρισης Εκτάκτων Αναγκών (Federal Emergency Management Agency). Η μέθοδος που εφαρμόζεται μέσω αυτού του λογισμικού αφορά κατασκευές αμερικανικών προδιαγραφών και χρειάζεται τροποποιήσεις για να εφαρμοστεί στην Ευρώπη και αλλού. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε με βάση την εμπειρική έρευνα της συμπεριφοράς των κτιρίων μετά από σεισμούς, σε διάφορες περιοχές και στη μελέτη των πιθανών σεισμών που αναμένονται στο μέλλον. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται σε χάρτες μέσω Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών.

Πέρα από τους επιστημονικούς στόχους, το HAZUS εξυπηρετεί και κοινωνικές ανάγκες συμβάλλοντας στην αντισεισμική ενίσχυση περιοχών που έχουν πληγεί από σεισμούς, καθώς και στην αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών όχι μόνο από σεισμούς, αλλά και από άλλες φυσικές καταστροφές. Παρόμοιο πρόγραμμα ήταν το RADIUS (1990-2000), χρηματοδοτούμενο από την κυβέρνηση της Ιαπωνίας.

Πρόσφατα εφαρμόστηκε μοντέλο αντιμετώπισης σεισμικού κινδύνου με την ονομασία Global Earthquake Model (GEM) (Colombi et al., 2010) από το

ομώνυμο με το μοντέλο ίδρυμα (GEM Foundation). Πρόκειται για μια προσπάθεια επιστημόνων από όλο τον κόσμο όπου στόχο τους έχουν την ανάπτυξη μεθόδων εκτίμησης σεισμικού κινδύνου υψηλού επιστημονικού επιπέδου, τη συγκέντρωση και ανάπτυξη δεδομένων, μέσω της συνεργασίας με εμπειρογνώμονες από όλο τον κόσμο, την αξιολόγηση μοντέλων εκτίμησης σεισμικού κινδύνου διαφορετικών κλιμάκων. Επιπλέον, δημιουργήθηκε μια διαδικτυακή πλατφόρμα στην οποία έχουν ενσωματωθεί δεδομένα σε παγκόσμιο επίπεδο για τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου (Silva et al. 2014a)

Σε Ευρωπαϊκό επίπεδο, υιοθετώντας στοιχεία από το πρόγραμμα HAZUS (HAZUS,1999) ύστερα από απαραίτητες μετατροπές, χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση και εφαρμόστηκε σε ευρωπαϊκές πόλεις το πρόγραμμα RISK-UE (Milutinovic and Trendafiloski, 2003), όπου αναπτύχθηκε η μεθοδολογία δημιουργίας σεναρίων σεισμών σε ευρωπαϊκές πόλεις, λαμβάνοντας υπόψη σύγχρονα και ιστορικά κτίρια και την οργάνωση του αστικού ιστού. Το εν λόγω πρόγραμμα βασίζεται στη στατιστική συσχέτιση της μακροσεισμικής έντασης και των καταγεγραμμένων βλαβών από παρελθόντες σεισμούς αντίστοιχων εντάσεων.

Για την μελέτη των βλαβών πραγματοποιήθηκε κατηγοριοποίηση των κτιρίων λαμβάνοντας υπόψη δομικά και μη δομικά χαρακτηριστικά τους, ώστε να ομαδοποιηθούν σε κατασκευές με παραπλήσια σεισμική τρωτότητα. Στο πρόγραμμα συμμετείχαν 7 χώρες (Γαλλία, Ιταλία, Ρουμανία, Ισπανία, Ελλάδα, ΠΓΔΜ, Βουλγαρία). Το Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο αποτέλεσε την Ελληνική συμμετοχή στο πρόγραμμα, εφαρμόζοντάς το στην πόλη της Θεσσαλονίκης (Mouroux et al., 2003). Επίσης προτάθηκε σχέδιο διαχείρισης κίνδυνου σε κάθε περιοχή που εφαρμόστηκε αυτό το πρόγραμμα. Επιπλέον στο πλαίσιο του προγράμματος RISK-UE, υπολογίστηκε για την πόλη της Βαρκελώνης το οικονομικό κόστος των βλαβών για το χειρότερο πιθανό σεισμικό σενάριο και ο αριθμός των αστέγων (Lantada et al., 2010).

Άλλα παρόμοια προγράμματα ήταν το GEMITIS στη Γαλλία (Mouroux, 2003), καθώς και το ENSeRVES (Dolce et al., 2003), στο οποίο συνεργάστηκαν επιστήμονες διαφορετικών ειδικοτήτων. Αντικείμενο του τελευταίου ήταν να συγκρίνει την σεισμική τρωτότητα των κτιρίων και τις βλάβες από σεισμούς σε

διάφορες περιοχές, να βελτιώσει τη διαδικασία εκτίμησης της τρωτότητας, να αναπτύξει μεθοδολογίες σεναρίων σεισμού και να εξετάσει τα προβλήματα της αντισεισμικής προστασίας στο αστικό περιβάλλον.

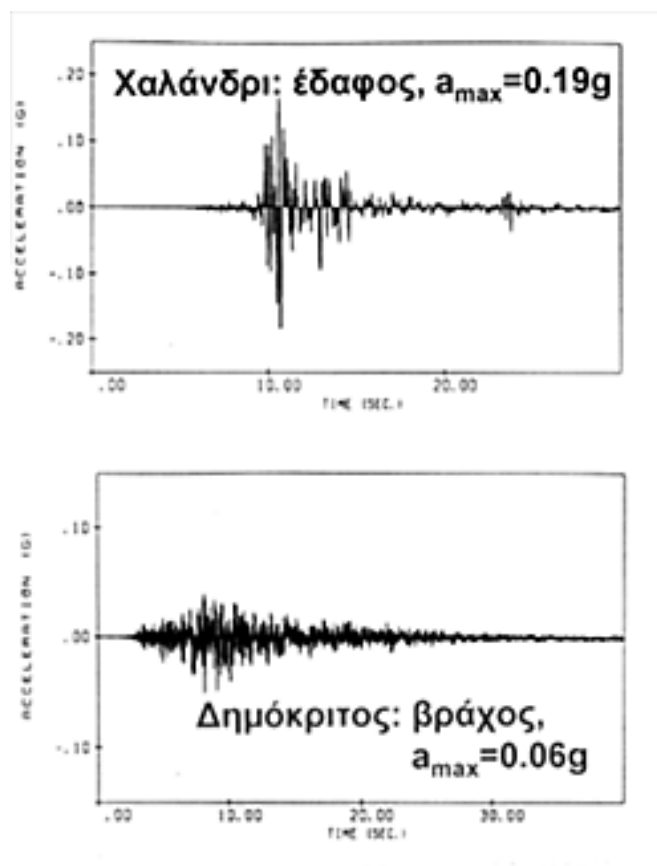
Επιπλέον τα τελευταία χρόνια εφαρμόστηκε στην Ευρώπη το πρόγραμμα eSHARE project (2009-2013), με κύριο στόχο τη δημιουργία ενός ομογενούς μοντέλου σεισμικής επικινδυνότητας, σχεδιάζοντας έναν Ευρωπαϊκό χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας συμβατό με το τεκτονικό καθεστώς του Ευρωπαϊκού χώρου. Παράλληλα εφαρμόστηκε το πρόγραμμα Syner-G (2009–2013) για την αξιολόγηση της τρωτότητας των κτιρίων, των υποδομών, των δικτύων και των κοινωνικο-οικονομικών συνεπειών (Pitilakis et al., 2014). Πρόσφατα στην Ελλάδα εκπονήθηκε πρόγραμμα μελέτης φυσικών κινδύνων, συμπεριλαμβανομένου του σεισμικού κινδύνου, χρησιμοποιώντας διαδικτυακή πλατφόρμα δεδομένων (Greco-Risks, 2013-2015).

2.1 Μελέτη της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών

Η επιστημονική έρευνα έχει αποδείξει ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην κατανομή των βλαβών από δεδομένο σεισμό (Σχ. 2). (Borcherdt and Gibbs, 1976; Iglesias, 1988; Gazetas et al., 1990; Seed et al., 1990; Ansal et al., 1993; Tertulliani, 2000; Bouckovalas et al., 2003). Το έδαφος αποτελεί έναν κυματικό οδηγό που ενισχύει τις συνιστώσες του σεισμικού κύματος με συχνότητες παραπλήσιες με τις δικές του ιδιοσυχνότητες ή απομειώνει τις διαφορετικές. Η ιδιότητα του εδάφους να ενισχύει ή να απομειώνει τη σεισμική κίνηση αποτελεί τη «δυναμική» απόκριση του εδάφους. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι τιμές των παραμέτρων εδαφικής κίνησης, κυρίως η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (PGA) και η μέγιστη εδαφική ταχύτητα (PGV), ενισχύονται στην επιφάνεια του χαλαρού εδαφικού στρώματος (regolith) σε σχέση με το βραχώδες υπόβαθρο (bedrock).

Τέτοια παραδείγματα αποτελούν οι σεισμοί του Σαν Φραντσίσκο (1989) με συντελεστή ενίσχυσης της μέγιστης επιτάχυνσης 2.3, του Μεξικό (1985) με συντελεστή ενίσχυσης 3.7 και της Αθήνας (1999) όπου ο λόγος μέγιστης επιτάχυνσης στο Χαλάνδρι προς τη μέγιστη επιτάχυνση στο βραχώδες

υπόβαθρο υπολογίστηκε 3.2 (Τ.Ε.Ε, 1999; Papadimitriou A. and Bouckonas, 2009). (Σχ. 2)



Σχήμα 2 Παράδειγμα της διαφοράς πλάτους του σεισμικού κύματος σε βραχώδες υπόβαθρο (hard rock) και σε χαλαρό έδαφος (soft soil) (Παπαδημητρίου και Μπουκοβάλας, 2009).

Από την άλλη πλευρά σε κάποιες περιπτώσεις μαλακών εδαφών ή εδαφών που ρευστοποιήθηκαν παρατηρείται μείωση των μέγιστων επιταχύνσεων, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των σεισμών στο San Francisco το 1957 (συντελεστής ενίσχυσης 0.5 – 1) και στο Port Island στο Kobo το 1995 (συντελεστής ενίσχυσης 0.4) (Παπαδημητρίου και Μπουκοβάλας, 2009). Το φαινόμενο της απομείωσης οφείλεται στην έντονη ανελαστική συμπεριφορά του εδάφους εξαιτίας της ρευστοποίησης, στις μεγάλες διατμητικές παραμορφώσεις του εδάφους, καθώς και στην ισχυρή απόσβεση.

Συνήθως σε μικρά έως μέσα επίπεδα εδαφικής επιτάχυνσης στο βράχο (PGA βράχος < 0.2-0.3g) αναμένεται ενίσχυση της PGA σε εδαφικές αποθέσεις σε

σχέση με το βραχύδες υπόβαθρο, ενώ σε ισχυρότερο σεισμικό κραδασμό στο βραχύδες υπόβαθρο (PGA βράχος $> 0.4g$) η ενίσχυση μειώνεται σταδιακά και καταλήγει ακόμη και σε μείωση του μέγιστου πλάτους (Πιπιλάκης, 2010). Εκτός από τον τύπο του εδαφικού σχηματισμού, το πάχος της εδαφικής στήλης επηρεάζει τη διαφορά της εδαφικής κίνησης (Sabhadra et al. 2015)

Οι εδαφικές συνθήκες μπορούν να καθοριστούν μέσω μικροζωνικών μελετών, στόχος των οποίων είναι ο καθορισμός της σεισμικής κίνησης από σεισμό δεδομένου μεγέθους σε συγκεκριμένη θέση. Θα ήταν ιδανικό να μπορούσαμε να δημιουργήσουμε βάση δεδομένων από πυκνά τοποθετημένα δίκτυα επιταχυνσιογράφων που να έχουν καταγράψει σεισμικές κινήσεις σε σταθερές θέσεις σεισμών διαφορετικών μεγεθών από το ίδιο επίκεντρο.

Αυτό όμως σπάνια είναι δυνατό, κατά συνέπεια έχουν αναπτυχθεί μοντέλα που βασίζονται στη θεωρητική γνώση της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων σε διάφορα είδη εδαφών εφαρμόζοντας γεωφυσικές και γεωλογικές μεθόδους (Pitilakis et al., 1999).

Οι **γεωφυσικές μέθοδοι** περιλαμβάνουν διασκοπήσεις ανάκλασης και διάθλασης, φασματική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων και εφαρμογή του ηλεκτρικού και ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Στις γεωφυσικές μεθόδους συμπεριλαμβάνονται μέθοδοι υπολογισμού της ταχύτητας διάδοσης των σεισμικών κυμάτων με cross-hole και down-hole τεχνικές σε γεωτρήσεις (ISSMGE, 1999; Andrus et al., 2003). Στην ανάπτυξη αυτών των μεθόδων έχει συμβάλει η βελτίωση των οργάνων ψηφιακής τεχνολογίας.

Οι **γεωλογικές-γεωτεχνικές** έρευνες εφαρμόζονται με τη βοήθεια διερευνητικών γεωτρήσεων έως το βάθος του βραχύδους υπόβαθρου. Οι φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των εδαφικών στρωμάτων υπολογίζονται από εργαστηριακές και επιτόπου δοκιμές, όπως οι δοκιμές διείσδυσης (Standard Penetration Test – SPT για σκληρά, συνεκτικά εδάφη και Cone Penetration Test – CPT για μαλακά εδάφη) (Mihalic et al., 2011).

Οι συντελεστές ενίσχυσης καθορίζονται σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση του εδάφους και την ένταση του σεισμού. Η κατηγοριοποίηση των εδαφών πραγματοποιείται με τις τιμές της μέσης ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων (S_v), η οποία εκτιμάται για κάθε εδαφικό σχηματισμό με τις

γεωφυσικές μεθόδους που προαναφέρονται ή ως συνάρτηση του αριθμού των κρούσεων κατά τη δοκιμή διείσδυσης SPT εφαρμόζοντας εμπειρικούς τύπους (Kaltentziotis, 1989; Lee, 1990;1992; Βασιλείου, 1992; Athanasopoulos, 1993; Anastasiadis et al., 2001; Mayne 2006).

Γνωρίζοντας την ταχύτητα διάδοσης των S κυμάτων σε κάθε σχηματισμό και το αντίστοιχο πάχος του, υπολογίζεται η μέση ταχύτητα των S κυμάτων στα πρώτα 30 μέτρα από την επιφάνεια του εδάφους (V_{s30}). Η περιγραφή αυτή εισήχθη για πρώτη φορά από τον Borchardt (1994). Το κύριο πλεονέκτημα είναι η απλότητα της μεθόδου με βάση συμβατικές γεωτεχνικές έρευνες οι οποίες σπάνια ξεπερνούν τα 30-40 μέτρα. Η χρήση της V_{s30} δεν είναι πάντα ακριβής για την εκτίμηση της επιρροής των τοπικών συνθηκών (Raptakis et al., 1994). Ωστόσο όσο στον Ευρωκώδικα 8 (prEN1998-1, Draft 4, 2001) όσο και στον διεθνή κώδικα International Building Code 2000 (IBC, 2000) οι συντελεστές ενίσχυσης των εδαφών και τα φάσματα απόκρισης επιλέγονται με τη βοήθεια αυτής της παραμέτρου.

Τόσο οι γεωφυσικές όσο και οι γεωτεχνικές μέθοδοι είναι δαπανηρές και δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν σε πολλές θέσεις μιας περιοχής. Για αυτόν το λόγο έχουν προταθεί φθηνότεροι μέθοδοι εκτίμησης της επίδρασης του χαλαρού υπόβαθρου στην εδαφική κίνηση, που βασίζονται σε καταγραφές από σειсмоγράφους.

Η πιο διαδεδομένη είναι η **μέθοδος του Τυπικού Φασματικού Λόγου (Standard Spectral Ratio - SSR)** που ορίζεται ως ο λόγος του φάσματος πλάτους Fourier μιας καταγραφής σε έδαφος προς το αντίστοιχο μιας καταγραφής κοντινού βράχου από τον ίδιο σεισμό και την ίδια συνιστώσα της κίνησης (Borchardt, 1970). Η μεθοδολογία αυτή απαιτεί δεδομένα από ένα ικανοποιητικό δίκτυο σεισμομέτρων, διαφορετικού μεγέθους σεισμών στις θέσεις ενδιαφέροντος.

Οι Phillips and Aki (1986) πρότειναν μια μέθοδο που η εκτίμηση των εδαφικών συνθηκών βασίζεται στα κύματα ουράς (coda waves) (Sato, 1988; Baskoutas, 1996; Sawazaki et al., 2006). Στις παραπάνω μεθόδους τα βασικά χαρακτηριστικά του εδάφους (παράγοντας ενίσχυσης και δεσπόζουσα

συχνότητα) υπολογίζονται από καταγραφές στη θέση ενδιαφέροντος και σε ένα σταθμό αναφοράς που στην πράξη δεν είναι πάντα διαθέσιμες.

Μικροθόρυβος (εδαφικός σάλος) και τεχνικές ανάλυσης

Η φασματική ανάλυση του μικροθορύβου μπορεί να συμβάλλει στη μελέτη απόκρισης του εδάφους. Με τον όρο μικροθόρυβος (εδαφικός σάλος) εννοούμε χαμηλού πλάτους και υψηλής συχνότητας (με περίοδο μικρότερη των 2 s) ταλαντώσεις του εδάφους από φυσικούς παράγοντες, όπως ο αέρας, η παλίρροια, καθώς και ανθρωπογενείς θορύβους, η κίνηση των οχημάτων, βιομηχανικές και οικιακές μηχανές.

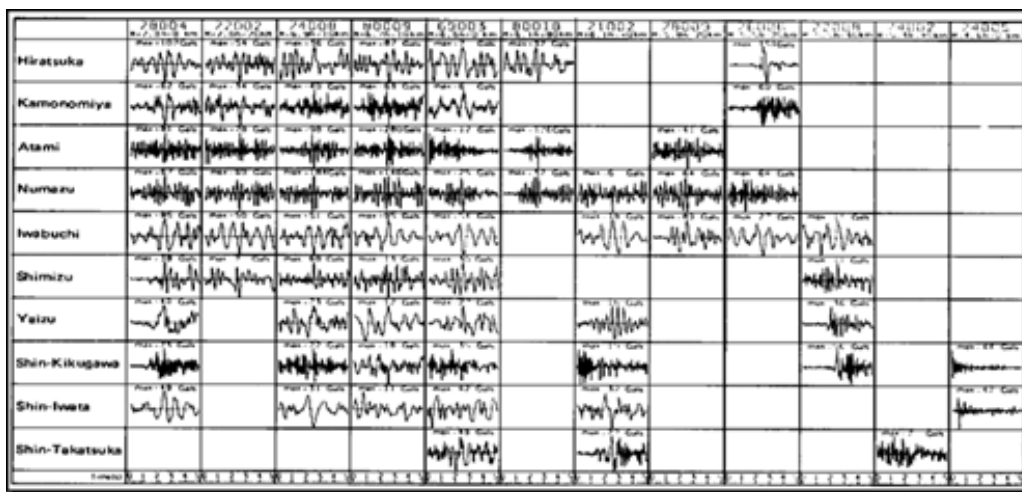
Σύμφωνα με τον Nakamura (1989), ο φασματικός λόγος της οριζόντιας προς την κατακόρυφη συνιστώσα του μικροθορύβου (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio – HVSR), δίνει την ιδιοπερίοδο της υπό μελέτη περιοχής. Η μέθοδος βασίζεται στον υπολογισμό του λόγου των δυο οριζόντιων ως προς την κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης και την εκτίμηση του πλάτους Fourier σε διαφορετικές συχνότητες, από λίγων λεπτών καταγραφή του μικροθορύβου σε μια θέση χρησιμοποιώντας σειсмоγράφους τριών συνιστωσών (Σχ. 3).

Βασική προϋπόθεση της μεθόδου είναι ότι η στρωματογραφία του εδάφους είναι επίπεδη και οριζόντια και ότι η κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης είναι ανεξάρτητη από κάθε είδους επιρροή που σχετίζεται με τις εδαφικές συνθήκες στη θέση καταγραφής. Η σύγκριση μεταξύ των θεμελιωδών συχνοτήτων που λαμβάνονται από το φασματικό λόγο οριζόντιας ως προς την κατακόρυφη συνιστώσα καταγραφών μικροθορύβου, με αυτές που λαμβάνονται από καταγραφές σεισμικών γεγονότων οδηγεί στη διαπίστωση ότι οι πρώτες αντιστοιχούν στις θεμελιώδεις συχνότητες των εδαφικών αποθέσεων (Panou et al., 2005).

Το πάχος των εδαφικών στρωμάτων μπορεί να καθοριστεί από τις παραπάνω συχνότητες (Morales et al., 1992; Woolery et al., 2002). Ο φασματικός λόγος οριζόντιων ως προς την κατακόρυφη συνιστώσα (HVSR) δεν μπορεί πάντα να αποδώσει τον παράγοντα ενίσχυσης του εδάφους καθώς είναι ευαίσθητος σε κάποιες παραμέτρους όπως ο λόγος Poisson (Bonnetfoy-Claudet et al.,

2006). Ένας κύριος περιορισμός της μεθόδου είναι το εύρος συχνοτήτων εφαρμογής της. Εφόσον ο εδαφικός θόρυβος περιέχει μικρότερο εύρος συχνοτήτων σε σχέση με αυτές που δημιουργούνται από ισχυρούς σεισμούς, οι καμπύλες HVSR μπορεί να μην αντικατοπτρίζουν ακριβώς τις συνήθως χαμηλότερες συχνότητες κατά τη διάρκεια ενός σεισμού, λόγω των μη-γραμμικών αποκρίσεων των εδαφών (Hunter and Crow, 2012).

Περαιτέρω, πολλές μελέτες απόδειξαν την καλή σχέση των κορυφών των καμπυλών HVSR με τον παράγοντα ενίσχυσης. (π.χ. Lermo and Chavez-Garcia 1993; Konno et al., 1998; Rodriguez and Midorikawa, 2002; Köhler et al., 2004; Rahimi et al., 2012). Στην Ελλάδα, η μέθοδος Nakamura έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για την εκτίμηση της απόκρισης των επιφανειακών σχηματισμών σε αρκετές περιπτώσεις (Raptakis et al., 2000; Apostolidis, 2002; Makropoulos et al., 2004), δείχνοντας ότι τα αποτελέσματα (κατανομή των θεμελιωδών συχνοτήτων και των παραγόντων ενίσχυσης) συμφωνούν με τα γεωτεχνικά δεδομένα.



Σχήμα 3 Επιταχυνσιογραφήματα από διαφορετικούς σεισμούς και σταθμούς καταγραφής σε διαφορετικές τοποθεσίες (Nakamura, 1989)

Συγκριτική μελέτη των δυο παραπάνω μεθόδων και μιας τρίτης, που βασίζεται σε παραμετρική αντιστροφή της πηγής, της διαδρομής και των επιπτώσεων της τοποθεσίας για εγκάρσια και διαμήκη κύματα, πραγματοποιήθηκε στη Λευκάδα μετά το σεισμό του 2003 (Drouet et al., 2008). Η μέθοδος της αντιστροφής έδειξε αξιόπιστα αποτελέσματα για την πηγή και τους συντελεστές απόσβεσης. Οι τιμές της απόκρισης που υπολογίστηκαν από τα

Σ κύματα συμφωνούν με τα αποτελέσματα προηγούμενων μελετών που είχαν πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο HVSR (Dimitriu et al., 1999; Triantafyllidis et al., 2006).

2.2 Σεισμική επικινδυνότητα

Το αντικείμενο μιας μελέτης σεισμικής επικινδυνότητας είναι η εκτίμηση της μέγιστης αναμενόμενης ισχυρής εδαφικής κίνησης, λαμβάνοντας υπόψη τις τοπικές συνθήκες στη θέση θεμελίωσης μιας κατασκευής (Dravinski et al, 1980). Εδαφικές παράμετροι είναι οι μέγιστες τιμές ταχύτητας, επιτάχυνσης, μετατόπισης, καθώς και οι μέγιστες φασματικές τιμές τους. Οι δυο κύριες κατηγορίες μεθόδων μελέτης σεισμικής επικινδυνότητας είναι η **πιθανολογική** και η **αιτιοκρατική**.

Οι παράμετροι της εδαφικής κίνησης, τόσο στις πιθανολογικές, όσο και στις αιτιοκρατικές μεθόδους, καθορίζονται από τις εμπειρικές συναρτήσεις απόσβεσης σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού, την υποκεντρική απόσταση, τα γεωλογικά στοιχεία και το εδαφικό μοντέλο της περιοχής. Σημαντικός αριθμός σχέσεων απόσβεσης έχουν προταθεί από ερευνητές (Algermissen et al., 1976; Trifunac et al. 1976; Trifunac and Anderson, 1977; 1978; Makropoulos, 1978; Makropoulos and Burton, 1985; Papaioannou, 1984; 1986; Papoulia and Stavrakakis, 1990; Theodulidis, 1991; Douglas, 2001; Margaritis et al., 2001).

2.2.1 Αιτιοκρατικές μέθοδοι

Στις αιτιοκρατικές μεθόδους η μέγιστη αναμενόμενη εδαφική κίνηση σε μια θέση καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη το ευρύτερο γεωλογικό, τεκτονικό και σεισμοτεκτονικό καθεστώς. Υπολογίζονται οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές εδαφικών παραμέτρων, καθώς και οι μέγιστες αναμενόμενες τιμές φασματικών παραμέτρων, δηλαδή μελετώνται τα αποτελέσματα του σεισμού με το μέγιστο μέγεθος και την μικρότερη υποκεντρική απόσταση που μπορεί να συμβεί, χωρίς να εξετάζεται η πιθανότητα που υπάρχει για να συμβεί (Krinitzsky, 1995; Romeo and Prestininzi, 2000). Συγκεκριμένα, ορίζεται μια περιοχή γύρω από τη θέση ενδιαφέροντος και επιλέγεται εκείνη η σεισμική πηγή που αποδίδει τη μεγαλύτερη εδαφική κίνηση στη θέση ενδιαφέροντος.

Οι τύποι σεισμικών πηγών που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι σημειακές και χώρου. Το πιο σημαντικό μέρος μιας αιτιοκρατικής μεθοδολογίας είναι να εκτιμηθεί το μέγιστο μέγεθος, M_{max} , για κάθε σεισμική πηγή. Η αιτιοκρατική μέθοδος που χρησιμοποιείται πιο συχνά για τον υπολογισμό του μέγιστου μεγέθους (M_{max}) βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις παλινδρόμησης μεταξύ του μεγέθους και παραμέτρων των ρηξιγενών δομών, όπως, μήκος και τύπος διάρρηξης (Tocher, 1958; Iida, 1965; Bonila et al., 1970; Mark et al., 1977; Singh et al., 1980; Trifunac, 1993; Wells and Coppersmith, 1994). Η πρόβλεψη του μεγέθους του σεισμού με αυτή τη διαδικασία παρουσιάζει δυσκολία, καθώς θα πρέπει να προβλεφθεί ένα σεισμικό σενάριο.

Το μέγιστο μέγεθος M_{max} σχετίζεται με το ποσοστό απελευθέρωσης σεισμικής ροπής (Smith, 1976; Anderson and Luco, 1983; Παπασταματίου, 1980; Wesnousky, 1986). Μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση της αθροιστικής ροπής όλων των σεισμών για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η σεισμική ροπή προσδιορίζεται από την ολίσθηση του ρήγματος, την συνολική επιφάνεια διάρρηξης και το μέτρο διάτμησης του πετρώματος στο ρήγμα (Gupta, 2002).

Μια άλλη αιτιοκρατική προσέγγιση του μέγιστου μεγέθους είναι οι καμπύλες συχνότητας - μεγέθους από τις καταγραφές ιστορικών σεισμών. Συνήθως η εκτίμηση γίνεται για μια περίοδο επανάληψης 500 έως 1.000 χρόνων. Όταν τα διαθέσιμα στοιχεία δεν είναι επαρκή ώστε να καθορίσουν τη σχέση συχνότητας - μεγέθους για μια σεισμική πηγή, το μέγεθος υπολογίζεται προσθέτοντας 0.5 ή 1 βαθμό στο βαθμό του μεγαλύτερου ιστορικού σεισμού (Gupta, 2002).

Όπως προαναφέρθηκε η εδαφική κίνηση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας εμπειρικές σχέσεις εξασθένισης. Σε περιοχές που είναι καλά καθορισμένες οι ενεργές τεκτονικές δομές αλλά δεν υπάρχουν επαρκείς καταγραφές από σεισμούς, μπορεί να γίνει υπολογισμός υψίσυχων συνθετικών χρονοσειρών με την εφαρμογή στοχαστικών μοντέλων προσομοίωσης ισχυρών εδαφικών κινήσεων, είτε με την προσέγγιση της σεισμικής πηγής είτε του πεπερασμένου ρήγματος (Hadley and Helmberger, 1980; Hartzell, 1982; Boore and Atkinson, 1987; Gupta and Rambabu, 1996; Beresnev and Atkinson, 1998; Boore, 2003; Boore, 2005; Atkinson, 2009).

2.2.2 Πιθανολογικές μέθοδοι

Στις πιθανολογικές μεθόδους μελετώνται τα αποτελέσματα όλων των πιθανών σεισμών που μπορεί να προκληθούν από διαφορετικές πηγές κοντά στην υπό μελέτη περιοχή για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Οι πιθανολογικές μελέτες εξετάζουν τη πιθανότητα να συμβεί σεισμός μεγαλύτερος δεδομένου μεγέθους σε συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Σε αντίθεση με τις αιτιοκρατικές μεθόδους, που επικεντρώνονται στον μεγαλύτερο αναμενόμενο σεισμό, εξετάζονται όλες οι σεισμικές ζώνες, έτσι ώστε να αναλυθεί η πιθανότητα των εδαφικών κινήσεων που θα εκδηλωθούν και που θα έχουν επιπτώσεις στις κατασκευές. Προϋπόθεση μιας πιθανολογικής μελέτης είναι ο καθορισμός των σεισμικών πηγών, του ρυθμού επανάληψης των σεισμών, των σχέσεων εξασθένησης από το υπόκεντρο στη θέση ενδιαφέροντος και της πιθανότητας εμφάνισης της εδαφικής κίνησης (Danciou et al., 2008). Οι χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας, που συνήθως εκφράζουν την μέγιστη εδαφική επιτάχυνση, είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για την πρόβλεψη βλαβών από σεισμό.

Ειδικότερα η πιθανολογική μέθοδος προτάθηκε αρχικά στη σεισμολογία από τον Cornell (1968) βελτιώθηκε από τον Esteva (1970) και εφαρμόστηκε με τη συμβολή υπολογιστικού προγράμματος γραμμένο από τον McGuire (1976). Βασίστηκε είτε στη στατιστική μέθοδο των ακραίων τιμών (Gumbel, 1958) είτε στην παραδοχή ότι τα σεισμικά γεγονότα ακολουθούν κατανομή Poisson και τη σχέση συχνότητας - μεγέθους των Gutenberg-Richter (Epstein and Lomnitz 1966). Άλλες προσεγγίσεις έχουν προταθεί με παραπλήσια αποτελέσματα (Gupta et al., 1988; 1994). Για την εφαρμογή της μεθόδου της κατανομής των ακραίων τιμών χρειάζονται δεδομένα καταγραφών των σεισμών. Αυτό δεν είναι εφικτό για την χρονική περίοδο πριν τη χρήση ενόργανων καταγραφών. Επίσης υπάρχει έλλειψη επαρκών δεδομένων σε περιοχές με χαμηλή σεισμικότητα και αραιό δίκτυο σειсмоγράφων. Έτσι προτάθηκε μεθοδολογία καλύτερης προσέγγισης του μέγιστου μεγέθους σεισμού από τους Kijko and Sellevoll (1989) η οποία βελτιώθηκε από τους Kijko and Graham (1998).

Εφάρμοσαν εκθετική συνάρτηση πιθανολογικής κατανομής για να αποδώσουν το μέγεθος του σεισμού.

Πολλές επιστημονικές εργασίες που έχουν γίνει για την Ελλάδα, αφορούν στην κατανομή μέγιστων αναμενόμενων εντάσεων (Shebalin et al., 1976; Papazachos et al.; 1985), εδαφικής επιτάχυνσης και ταχύτητας (Algermissen et al., 1976; Makropoulos 1978, Drakopoulos and Makropoulos, 1983; Makropoulos and Burton, 1985; Koutrakis et al., 2002; Burton et al., 2003a; Tsapanos et al., 2003; Banitsiotou et al., 2004; Mantyniemi et al., 2004; Kouskouna and Kaviris, 2014).

Πιο αναλυτικά, παρουσιάζονται κάποιες από τις σημαντικότερες. Ο Γαλανόπουλος (1968) υπολόγισε τη σεισμική επικινδυνότητα σε σχέση με το λόγο επανάληψης επιφανειακών σεισμών με μέγεθος μεγαλύτερο από 5.5, 6, 6.5, και 7 για κάθε τετραγωνική μοίρα στην Ελλάδα. Ο Comninakis (1975) όρισε τη σεισμική επικινδυνότητα ως το μέγιστο, πιο πιθανό ετήσιο μέγεθος από την σχέση αθροιστικής συχνότητας – μεγέθους των Gutenberg-Richter για την χρονική περίοδο από 1911 έως 1970.

Για την αξιολόγηση της σεισμικής επικινδυνότητας στην Ελλάδα, από άποψη μεγέθους, οι Makropoulos (1978) και Makropoulos and Burton (1984) εφάρμοσαν δύο μεθόδους, αφενός αυτή που βασίζεται στην τρίτη ασυμπτωτική κατανομή των ακραίων τιμών του Gumbel και αφετέρου, εκείνη που βασίζεται στην απελευθέρωση δυναμικής ενέργειας από σεισμό. Για την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων χρησιμοποιήθηκε ο κατάλογος σεισμών για τον Ελλαδικό χώρο των συγγραφέων (Makropoulos and Burton, 1981). Τα αποτελέσματα ήταν παρεμφερή. Εφαρμόζοντας την πρώτη ασυμπτωτική κατανομή των ακραίων τιμών του Gumbel, οι Makropoulos and Burton (1985) εκτίμησαν τη σεισμική επικινδυνότητα στην Ελλάδα, εκφρασμένη με τιμές μέγιστης επιτάχυνσης, αλλά και την εξασθένηση της μέγιστης επιτάχυνσης σε συνάρτηση με την απόσταση στον ελλαδικό χώρο.

Οι Tselentis and Danciu, 2010, εκτίμησαν τη σεισμική επικινδυνότητα εκφρασμένη με δυο παραμέτρους εδαφικής κίνησης, την ένταση Arias (Arias Intensity), η οποία εξαρτάται και από τη διάρκεια του σεισμού και την απόλυτη αθροιστική ταχύτητα (cumulative absolute velocity).

2.3 Σεισμική τρωτότητα κτιρίων.

Η σεισμική τρωτότητα μιας κατασκευής εκφράζεται από την πιθανότητα να υποστεί αυτή κάποιο βαθμό βλάβης εξαιτίας ενός πιθανού σεισμού. Οι μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής τρωτότητας διακρίνονται σε εμπειρικές, αναλυτικές και υβριδικές.

2.3.1 Εμπειρικές μέθοδοι

Οι εμπειρικές μέθοδοι βασίζονται στη στατιστική ανάλυση των βλαβών που έχουν υποστεί κτίρια σε παρελθοντικούς σεισμούς. Η χρήση των εμπειρικών μεθόδων αναπτύχθηκαν από τις αρχές της δεκαετίας του 1970. Η τρωτότητα τότε εκφραζόταν συναρτήσει της Μακροσεισμικής έντασης. Αργότερα, η τρωτότητα συνδέθηκε με φυσικές παραμέτρους, όπως η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση.

α. Πινάκας Πιθανότητας Βλαβών (Damage Probability Matrix – DPM)

Ο Whiteman (1973) κατάρτισε έναν Πινάκα Πιθανότητας Βλαβών (Damage Probability Matrix - DPM), εδραιώνοντας την παραδοχή ότι κτίρια ίδιου τύπου έχουν την ίδια πιθανότητα να υφίστανται την ίδια στάθμη βλάβης ανά σεισμό. Ένας τέτοιος πινάκας (DPM) εκφράζει την πιθανότητα P να παρατηρηθεί βαθμός βλάβης (j) λόγω εδαφικής κίνησης έντασης (I)

$$P[D=j/I]. \quad (2)$$

Τα δεδομένα του πινάκα προήλθαν από τη μελέτη βλαβών σε 1600 διαφορετικού τύπου κτίρια, μετά το σεισμό του Σαν Φερνάντο το 1971.

Στην Ευρώπη η μέθοδος αυτή εφαρμόστηκε μετά το σεισμό στην Ιρπίνια το 1980. Οι Braga et al. (1982) διαπίστωσαν κατά τη στατιστική ανάλυση βλαβών ότι η διωνυμική κατανομή μπορεί να περιγράψει με καλή προσέγγιση την κατανομή βλαβών ανά κατηγορία κτιρίων και εντάσεων. Οι Corsanegro και Petrini (1990) χώρισαν τα κτίρια σε 3 κατηγορίες και δημιούργησαν έναν πινάκα πιθανότητας βλαβών για κάθε μια κατηγορία, βασισμένο στην κλίμακα εντάσεων MSK (Medvedev and Sponhener, 1969), επιτυγχάνοντας έτσι μια άμεση σχέση μεταξύ τύπου κτιρίου και παρατηρούμενων βλαβών.

Εξέλιξη της κλίμακας MSK αποτελεί η Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα (European Makroseismic Scale – EMS) Grünthal, 1998. Η κλίμακα EMS-98 ορίζει την ποιοτική περιγραφή (λίγα, πολλά, τα περισσότερα) έξι βαθμών βλάβης (0-5), σε επίπεδα έντασης από V έως XII και αντιστοίχως, για έξι κατηγορίες κτιρίων (από A για τα πιο τρωτά έως F για τις πλέον ποιοτικές κατασκευές), με την ίδια σεισμική συμπεριφορά. (Πίνακας 1). Γίνεται αντιληπτό ότι κτίρια με διαφορετικά δομικά στοιχεία μπορεί να ανήκουν στην ίδια κατηγορία, ενώ κτίρια που αποτελούνται από το ίδιο κύριο δομικό υλικό είναι δυνατό να ανήκουν σε διαφορετική κατηγορία εξαιτίας του διαφορετικού τρόπου δόμησης. Στους πίνακες της κλίμακας αυτής περιγράφονται δομικά και μη-δομικά στοιχεία λιθόχτιστων κτιρίων και κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα ξύλινα κτίρια, καθώς και οι μεταλλικές κατασκευές αναφέρονται σαν κατηγορίες, χωρίς όμως την διαφοροποίησή τους από άλλα τεχνικά χαρακτηριστικά.

Οι Dolce et al. (2003) εφάρμοσαν τη μέθοδο των Corsanegro και Petrini για την Ποτέντσα της Ιταλίας, στο πλαίσιο του προγράμματος ENSerVES (European Network on Seismic Risk, Vulnerability and Earthquake Scenarios) που προαναφέρθηκε στις μελέτες σεισμικού κινδύνου. Πρόσθεσαν άλλη μια κατηγορία κτιρίων για τα κτίρια που είχαν κτιστεί έως το 1980 και ήταν χαμηλότερης τρωτότητας. Η σεισμική ένταση εκφράστηκε με την κλίμακα σεισμικής έντασης της EMS-98 (Grünthal, 1998).

Στους πίνακες πιθανότητας βλαβών, οι βαθμοί βλάβης περιγράφονται ποιοτικά και τους αποδίδεται ένας αριθμός. Επίσης οι τάξεις τρωτότητας είναι ποιοτικές παράμετροι. Αυτό αποτελεί μειονέκτημα της μεθοδολογίας κυρίως αν χρειάζεται να συσχετιστεί η τρωτότητα των κτιρίων με αριθμητικά μεγέθη, όπως εκείνα που αφορούν στην εδαφική κίνηση. Συγκεκριμένα, στην EMS τα ποσοστά των κτιρίων που θα υποστούν δεδομένο βαθμό βλάβης για κάθε τάξη τρωτότητας και σεισμικής έντασης, επίσης περιγράφονται ποιοτικά (λίγα, πολλά, τα περισσότερα)

Επίλυση στο πρόβλημα αυτό έδωσαν οι Giovinazzi και Lagomarsino (2004) εφαρμόζοντας τη θεωρία του ασαφούς συνόλου (fuzzy sets theory). Οι τάξεις τρωτότητας εκφράστηκαν σαν συνάρτηση ενός δείκτη τρωτότητας. Η μέθοδος αυτή αναλύεται λεπτομερώς στο επόμενο κεφάλαιο. Έχει εφαρμοστεί για την

εκτίμηση σεισμικής τρωτότητας σε διαφορές περιοχές, όπως στο Faro και Λισσαβώνα (Oliveira et al., 2005) και στη Βαρκελώνη (Lantada et al., 2004). Τα κτίρια ομαδοποιήθηκαν βάσει δομικών χαρακτηριστικών, όπως το υλικό και η περίοδος κατασκευής. Σε νεότερη μελέτη για τη Βαρκελώνη λήφθηκαν υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά κάθε κτιρίου (Lantada et al., 2010).

Πίνακας 1 Κατάταξη τύπων κτιρίων σε τάξεις τρωτότητας σύμφωνα με την EMS-98

ΤΥΠΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ	ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΤΡΩΣΙΜΟΤΗΤΑΣ					
	A	B	C	D	E	F
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΜΕ ΦΕΡΟΥΣΑ ΤΟΙΧΟΠΟΙΑ	Αργιολιθοδομή	○				
	Χαλαρή λιθοδομή	○	—			
	Γλινθοδομή	—	○			
	Απλή λιθοδομή		—	○	—	
	Λιθοδομή με μεγάλους λίθους		—	○	—	
	Άοπλη λιθοδομή/Τσιμεντόλιθος	—	○	—		
	Άοπλη λιθοδομή με πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος		—	○	—	
	Οπλισμένη γλινθοδομή			—	○	—
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (R/C)	Σκελετός χωρίς αντισεισμική σχεδίαση (ΑΣ)	—	○	—		
	Σκελετός με ελλιπή ΑΣ		—	○	—	
	Σκελετός με υψηλό βαθμό ΑΣ			—	○	—
	Τοίχοι χωρίς ΑΣ		—	○	—	
	Τοίχοι με ελλιπή ΑΣ			—	○	—
	Τοίχοι με υψηλό βαθμό ΑΣ				—	○
ΑΤΣΑΛΙΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ				—	○	—
ΞΥΛΙΝΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ		—	○	—		

Έκτος από τους πίνακες πιθανότητας βλάβης από απευθείας ανάλυση σεισμικών βλαβών, έχουν σχεδιαστεί πίνακες που έχουν βασιστεί σε απόψεις εμπειρογνομόνων (Applied Technology Council-ATC, 1985). Οι πίνακες αυτοί προκύπτουν από τον υπολογισμό χαμηλότερης, μέσης και υψηλότερης εκτίμησης του συντελεστή βλάβης, δηλαδή της συνάρτησης κόστους επισκευής προς το κόστος αντικατάστασης (Fahet et al., 2001; Veneziano et al., 2002). Στο πρόγραμμα ATC-13 (ATC-13, 1985) οι υπολογισμοί έγιναν για 36 διαφορετικούς τύπους κτιρίων βάσει της κλίμακας MMI (Modified Mercalli Intensity).

β. Καμπύλες τρωτότητας

Από τα περιεχόμενα των πινάκων πιθανότητας βλάβης σχεδιάστηκαν καμπύλες τρωτότητας των κτιρίων (Rota, 2006), οι οποίες εκφράζουν την πιθανότητα να φτάσει ή να ξεπεράσει ένα κτίριο ένα επίπεδο βλάβης για δεδομένο σεισμό, που μπορεί να εκφραστεί είτε με όρους μακροσεισμικής έντασης (π.χ. MSK), ή εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), ή και φασματικής επιτάχυνσης (S_a) στη θέση θεμελίωσης του κτιρίου. Αρχικά έγινε προσπάθεια κατασκευής συναρτήσεων τρωτότητας των κτιρίων βασισμένη στις βλάβες που είχαν προκληθεί σε αυτά από προηγούμενους σεισμούς. Αυτό παρουσίαζε δυσκολία γιατί η ένταση δεν είναι συνεχής μεταβλητή. Οι Spence et al. (1992) έλυσαν αυτό το πρόβλημα εισάγοντας μια μη παραμετρική κλίμακα έντασης (PSI Parameterless Scale of Intensity) και σχεδιάζοντας καμπύλες τρωτότητας από συνεχείς συναρτήσεις τρωτότητας, βασισμένες σε παρατηρούμενες βλάβες κτιρίων και χρησιμοποιώντας την κλίμακα MSK (Karababa and Pomonis, 2011). Η μέθοδος εφαρμόζεται μέχρι σήμερα (Saner, 2015). Οι πιθανές τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης σε μια θέση υπολογίζονται από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση από το επίκεντρο, τον συντελεστή εξασθένισης και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες.

γ. Δείκτες Τρωτότητας (Vulnerability Indices)

Μια μέθοδος που δίνει έμφαση στην επίδραση των ιδιαίτερων δομικών χαρακτηριστικών ενός κτιρίου, είναι ο υπολογισμός ενός δείκτη τρωτότητας (Vulnerability Index) (Benedetti and Petrini, 1984). Για κάθε κτίριο εξετάζονται 11 παραμέτροι που επηρεάζουν την τρωτότητα, όπως τα δομικά και μη-δομικά χαρακτηριστικά, ο τύπος θεμελίωσης, το είδος και η ποιότητα των υλικών κατασκευής, το ύψος κ.λπ. Κάθε παράμετρος λαμβάνει τέσσερις διαφορετικούς βαθμούς αξιολόγησης. Επίσης, κάθε παράμετρος έχει ένα συντελεστή βαρύτητας (Aranda, 2000; Gent, 2003). Ο δείκτης προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα των γινομένων του βαθμού αξιολόγησης επί του συντελεστή βαρύτητας. Για την κανονικοποίηση του αποτελέσματος διαιρείται η τιμή του δείκτη με τη μέγιστη δυνατή τιμή που μπορεί να πάρει. Επομένως,

οι τιμές του δείκτη κυμαίνονται από 0 για καθόλου τρωτά κτίρια, έως 1 για τα πολύ τρωτά.

Ο ιταλικός οργανισμός CNR-GNDT (Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti - Consiglio Nazionale delle Ricerche) βελτίωσε την παραπάνω μέθοδο δημιουργώντας πίνακες αξιολόγησης των χαρακτηριστικών τόσο κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα, όσο και για αυτά με τοιχοποιία. Τα χαρακτηριστικά αξιολόγησης είναι 11 ή 10 ανάλογα με τον πίνακα επιλογής (Acevedo, 2002; Aguirre, 2002; Gent, 2003). Για τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα οι βαθμοί αξιολόγησης για κάθε κριτήριο είναι τρεις και για τα λιθόχτιστα είναι τέσσερις. Οι πίνακες αυτοί μπορούν να τροποποιηθούν ανάλογα με τα δεδομένα των χαρακτηριστικών των κτιρίων που διαθέτουμε. Η μέθοδος εφαρμόστηκε για τον υπολογισμό του σεισμικού κινδύνου σε πολλές ευρωπαϊκές πόλεις κατά την εφαρμογή του ευρωπαϊκού προγράμματος RISK-UE (Milutinovic and Trendafiloski, 2003) που έχει ήδη αναφερθεί. Για να εφαρμοστεί σωστά η μέθοδος χρειάζεται η γνώση όλων των χαρακτηριστικών που τίθενται ως κριτήρια, πράγμα που δεν είναι πάντα δυνατό. Επίσης, τα κριτήρια που θέτει δεν είναι μοναδικά και μάλλον ούτε τα πιο καθοριστικά για την τρωτότητα των κτιρίων (Calvi et al., 2006).

δ. Ταχεία οπτική εκτίμηση (Rapid Visual Screening - RVS)

Μια μέθοδος γρήγορης αξιολόγησης της τρωτότητας έχει επίσης εφαρμοστεί από το Συμβούλιο Εφαρμοσμένης Τεχνολογίας των Η.Π.Α (ATC) για την αξιολόγηση των υφιστάμενων κατασκευών. (ATC-14, 1987; ATC-40, 1996). Η διαδικασία αυτή έχει ως σκοπό τον προσδιορισμό των κτιρίων με αυξημένη σεισμική τρωτότητα στο σύνολο του δομικού ιστού. Τα κτίρια χωρίζονται σε 15 κατηγορίες που περιλαμβάνουν όλους σχεδόν τους δομικούς τύπους. Η διαδικασία αξιολόγησης πραγματοποιείται από τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του κτιρίου. Συμπληρώνεται ερωτηματολόγιο για κάθε κτίριο. Η θετική απάντηση σε κάθε ερώτημα σημαίνει ότι η δομή είναι επαρκής για το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό. Το κτίριο βαθμολογείται. Όσο πιο κοντά στο μηδέν είναι ο βαθμός τόσο πιο τρωτό είναι το κτίριο. (Federal Emergency Management Agency - FEMA 178, 1992; FEMA 273 1997; Faccioli et al., 1999; Ferreira et al., 2013; Kiranbala Devi and Naorem, 2015). Με τη μέθοδο αυτή αποτυπώνονται εύκολα και γρήγορα τα πολύ τρωτά κτίρια που

κινδυνεύουν άμεσα ειδικά σε περιοχές μεγάλης σεισμικής επικινδυνότητας (Kiranbala Devi and Naorem, 2015).

2.3.2 Αναλυτικές (Μηχανικές) Μέθοδοι

Αυτές οι μέθοδοι παρέχουν μια πιο λεπτομερή εκτίμηση της τρωτότητας με τη βοήθεια αλγόριθμων, οι οποίοι επιτρέπουν την αναλυτική μελέτη της ευαισθησίας των κατασκευών και τη βαθμονόμηση διαφόρων χαρακτηριστικών των κτιρίων. Η κατάρτιση πινάκων πιθανότητας βλάβης και η σχεδίαση καμπυλών τρωτότητας γίνονται με βάση τα αποτελέσματα δοκιμών και υπολογισμών και όχι από διαπιστωμένες βλάβες προηγούμενων σεισμών.

Οι Singhal και Kiremidjian (1996) εφάρμοσαν τη μέθοδο για 3 κατηγορίες κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα. Υπολόγισαν με μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις, ένα σφαιρικό δείκτη βλαβών για διάφορα επίπεδα εδαφικής κίνησης. Οι Rosetto και Elnashai (2005) εφάρμοσαν τη μέθοδο φάσματος ικανότητας (Capacity Spectrum) για τον υπολογισμό της μέγιστης απόδοσης του κτιρίου σαν ένα επίπεδο βλάβης σε μια βαθμονομημένη κλίμακα βλαβών από πειραματικά δεδομένα. Στη μέθοδο αυτή, η απόδοση ενός τύπου κτιρίου κάτω από συγκεκριμένη εδαφική κίνηση απορρέει από τη συσχέτιση ενός φάσματος επιτάχυνσης - μετατόπισης, η οποία αντιπροσωπεύει την κίνηση του εδάφους και το φάσμα ικανοτήτων (καμπύλη pushover), που με τη σειρά τους αντιπροσωπεύουν την οριζόντια μετατόπιση της δομής υπό αυξανόμενο πλευρικό φορτίο. Η διαδικασία επαναλήφθηκε χρησιμοποιώντας φάσματα επιτάχυνσης – μετατόπισης για πολλές καταγραφές εδαφικών κινήσεων, ώστε να μοντελοποιηθεί η ποικιλία των δομικών χαρακτηριστικών των κτιρίων.

Στην περιοχή ενδιαφέροντος (πόλη της Λευκάδας) έχει εφαρμοστεί αναλυτική μέθοδος υπολογισμού της αντοχής σε σεισμικό φορτίο για τα παραδοσιακά κτίρια (Vitzilaiou et al., 2007; Kouris and Karpos, 2013). Σχεδιάστηκαν καμπύλες ευθραυστότητας και αναλύθηκε η συμπεριφορά και των δύο δομικών συστημάτων αυτών των κτιρίων. Σύμφωνα με τις καμπύλες αυτές τα κτίρια μπορεί να υποστούν βλάβες, αλλά αναμένεται να αποφευχθεί η κατάρρευση γεγονός που οφείλεται στην υψηλή ικανότητα μετατόπισής τους.

2.3.3 Υβριδικές Μέθοδοι

Οι υβριδικές μέθοδοι βασίζονται στη δημιουργία μοντέλων που συνδέουν πίνακες πιθανότητας βλαβών και καμπύλες τρωτότητας που έχουν δημιουργηθεί από στατιστικά δεδομένα βλαβών προηγούμενων σεισμών (εμπειρικές μέθοδοι), με στατιστικά στοιχεία βλαβών που έχουν προκύψει από αναλυτικά, μαθηματικά μοντέλα της τυπολογίας των κτιρίων (αναλυτικές μέθοδοι). Τα υβριδικά μοντέλα βοηθούν στη μελέτη περιοχών με ελλιπή στοιχεία από προηγούμενους σεισμούς, άλλα βοηθούν και στην αξιολόγηση και τη βελτίωση των αναλυτικών μοντέλων.

Οι Karros et al. (1995) δημιούργησαν πινάκες πιθανότητας βλαβών μέρος των οποίων προερχόταν από δεδομένα προηγούμενων σεισμών για διάφορα επίπεδα σεισμικής έντασης, ακολουθώντας την μέθοδο του δείκτη τρωτότητας, ενώ επίσης τμήμα τους προερχόταν από αποτελέσματα μη-γραμμικών δυναμικών αναλύσεων μοντέλων προσομοίωσης συμπεριφοράς των τύπων δόμησης. Η σεισμική κίνηση εκφράστηκε ως η μέγιστη επιτάχυνση ενώ, όπου χρειάστηκε, χρησιμοποιήθηκαν εμπειρικές σχέσεις μέγιστης επιτάχυνσης - έντασης. Υπολογίστηκε ο δείκτης βλάβης που δείχνει την απόκριση του κτιρίου, όπως αυτή προκύπτει από τη δυναμική ανάλυση (παράγοντες ολκιμότητας, μετακινήσεις κ.α.) και εκφράζεται με το λόγο κόστους επισκευής - αντικατάστασης. Εφαρμόστηκε σε 120 χαρακτηριστικά, ελληνικά κτίρια σχεδιασμένα από το 1959 και τα αποτελέσματά του συγκρίθηκαν με τις παρατηρηθείσες βλάβες του σεισμού του 1978 της Θεσσαλονίκης. Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού καμπυλών τρωτότητας με αναλυτική και εμπειρική μέθοδο για διάφορους τύπους κτιρίων συγκρίθηκαν με στατιστική ανάλυση στοιχείων βλαβών από σεισμούς στον Ελλαδικό χώρο (Spence et al., 2011).

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω όλες οι μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας προσδιορίζουν την πιθανή βλάβη εκφρασμένη με μια διακριτή κλίμακα βλαβών για δεδομένη παράμετρο εδαφικής κίνησης. Στην εμπειρική προσέγγιση ο πιθανός βαθμός βλάβης προκύπτει από στατιστικά στοιχεία

βλαβών μετά από σεισμό (π.χ. Grünthal, 1998; Dolce et al., 2003; Oliveira et al., 2004; Giovinazzi and Lagomarcimo, 2004; Lantada et al., 2010). Στην αναλυτική, σχετίζεται με τις παραμέτρους που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες των κτιρίων και προσομοιώνονται με τη βοήθεια υπολογιστικών προγραμμάτων (Rosetto and Elnashai, 2005; Kouris and Kappos, 2013). Οι αναλυτικές μέθοδοι δίνουν πιο αξιόπιστα αριθμητικά αποτελέσματα αφού προέρχονται από χρήση αλγορίθμων, κυρίως για σύγχρονα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Συνοψίζοντας, όπως φαίνεται στα περισσότερα προγράμματα εκτίμησης σεισμικού κινδύνου, που έχουν πραγματοποιηθεί τόσο στην Ευρώπη όσο και στον υπόλοιπο κόσμο (HAZUS, 1997; RISK-UE,2003; ENSeRVES,2003; GEM, 2010) η τρωτότητα των κτιρίων έχει μελετηθεί κυρίως με εμπειρικές μεθόδους. Αυτό έχει συμβεί διότι δεν είναι εύκολη η εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων για μεγάλο πλήθος κατασκευών και ιδιαίτερα για παραδοσιακές κατασκευές. Αναλυτικές μέθοδοι μελέτης σεισμικής τρωτότητας έχουν εφαρμοστεί κυρίως για μεμονωμένα σύγχρονα κτίρια (Calvi et al., 2006).

Προκειμένου να καθοριστεί η μέγιστη αναμενόμενη σεισμική κίνηση εφαρμόζονται πιθανολογικές ή αιτιοκρατικές μέθοδοι. Αρχικά, η σεισμική επικινδυνότητα αποδιδόταν με την κατανομή σεισμικών εντάσεων (π.χ Shebalin et al., 1976; Papazachos et al.; 1985). Οι νεότερες μελέτες εκφράζουν τη σεισμική επικινδυνότητα με παραμέτρους εδαφικής κίνησης. (Makropoulos 1978, Drakopoulos and Makropoulos, 1983; Makropoulos and Burton, 1985; Tertuliani et al., 2000; Burton et al., 2003a; Banitsiotou et al., 2004; Mantyniemi et al., 2004; Oliveira et al.,2005; Lantada et al., 2010; Kouskouna and Kaviris, 2014). Η έλλειψη επαρκών καταγραφών από παλαιότερους σεισμούς οδήγησε στην δημιουργία μοντέλων προσομοίωσης της εδαφικής κίνησης, για το μεγαλύτερο αναμενόμενο μέγεθος σεισμού και το κοντινότερο επίκεντρο σε μια περιοχή με γνωστό σεισμοτεκτονικό καθεστώς (Boore and Atkinson, 1987; Gupta and Rambabu, 1996; Beresnev and Atkinson, 1998; Boore, 2003; Boore, 2005; Atkinson, 2009) .

Οι μέθοδοι εκτίμησης της τρωτότητας των κατασκευών και επομένως του σεισμικού κινδύνου συνεχώς βελτιώνονται και εμπλουτίζονται έτσι ώστε

ανάλογα με τα σεισμικά δεδομένα και το είδος των κατασκευών να έχουμε το καλύτερο αποτέλεσμα.

Στην ενότητα που ακολουθεί αναλύεται η επιστημονική μεθοδολογία που επιλέχθηκε και εφαρμόστηκε κατά την εκπόνηση της εν λόγω διατριβής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μεθοδολογία

Η έρευνα έχει σκοπό την προσέγγιση της επιστημονικής αλήθειας με την εφαρμογή εμπειρικών ή αναλυτικών μεθοδολογιών. Τα κριτήρια επιλογής του τύπου της μελέτης είναι μεν επιστημονικά, αλλά μπορεί να εξαρτώνται και από άλλες παραμέτρους, όπως για παράδειγμα η προσβασιμότητα σε βάσεις δεδομένων που διευκολύνουν την μελέτη, η δυνατότητα διεξαγωγής επιτόπιας έρευνας, το είδος και το μέγεθος του δείγματος που θα αναλυθεί και χρηματοοικονομικά κριτήρια. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν στην παρούσα διατριβή μετά από εμπειριστατωμένη βιβλιογραφική μελέτη, λαμβάνοντας υπόψη τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους, αλλά και τους περιορισμούς στην εφαρμογή τους.

Συγκεκριμένα αναλύονται οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν για τον προσδιορισμό της εκτίμησης της τάξης τρωτότητας και του δείκτη τρωτότητας μεμονωμένων κτιρίων στην υπό μελέτη περιοχή, την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας λαμβάνοντας υπόψη την απόκριση και τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών και τέλος, τη σύνθεση σεναρίων σεισμικού κινδύνου συνδυάζοντας τα αποτελέσματα των προηγούμενων μεθοδολογιών.

3.1 Εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των κτιρίων

Το πρόβλημα της αποτίμησης της τρωτότητας του συνόλου των κτιρίων μιας πόλης διαφέρει από τον προσδιορισμό τρωτότητας μεμονωμένου κτιρίου. Η αναλυτική μελέτη μεμονωμένων κτιρίων για το σύνολο των κτιρίων της υπό μελέτη περιοχής θα απαιτούσε μεγάλη δαπάνη χρόνου και χρημάτων ενώ τα αποτελέσματα θα ήταν αβέβαια, αφού κάποια από τα δομικά χαρακτηριστικά, όπως ο τρόπος θεμελίωσης και ο βαθμός συντήρησης, παρότι παίζουν σημαντικό ρόλο, δεν μπορούν με ακρίβεια να προσδιοριστούν. Η μέθοδος που εφαρμόστηκε βασίζεται στη στατιστική συσχέτιση της μακροσεισμικής έντασης και των καταγεγραμμένων (παρατηρημένων) βλαβών από σεισμούς του παρελθόντος αντίστοιχων εντάσεων. Βασίζεται στο μοντέλο τρωτότητας

(με εμπειρικούς πίνακες βλαβών), όπως αυτό συμπεριλήφθηκε στην Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα (EMS-98 - European Macroseismic Scale EMS, Grünthal, 1998). Η αντιστοιχία μεταξύ της κατηγορίας τρωτότητας και της κατηγορίας κτιρίου είναι πιθανοτική, καθώς κάθε κατηγορία κτιρίου χαρακτηρίζεται από μια κύρια (πιο πιθανή) κατηγορία τρωτότητας, με εύρος μεγαλύτερης ή μικρότερης πιθανότητας. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, η εν λόγω μέθοδος είναι από τις πιο πρόσφατες και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε πολλές αστικές περιοχές, κυρίως στη Ευρώπη, για την εκτίμηση της έντασης των σεισμών, αλλά και της τρωτότητας των κτιρίων κατά τη πρόβλεψη του σεισμικού κινδύνου.

Ένα μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι η απλουστευμένη κατάταξη σε τάξεις τρωτότητας δεν μπορεί να αντιπροσωπεύσει ιδιαίτερα δομικά χαρακτηριστικά τα οποία εντοπίζονται σε πλήθος περιπτώσεων. Εφαρμόστηκε μέθοδος μετατροπής της αλφαριθμητικής τάξης τρωτότητας της EMS-98 σε αριθμητικό δείκτη τρωτότητας λαμβάνοντας επιπλέον υπόψη και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά (Giovinazzi and Lagomarsino, 2004).

Ο δείκτης τρωτότητας (vulnerability index **VI**) κάθε κτιρίου μπορεί να καθοριστεί από το αλγεβρικό άθροισμα ενός δείκτη αντιπροσωπευτικού (VI^*) της πιθανότερης τάξης τρωτότητας στην οποία ανήκει το κτίριο, και ενός τροποποιητικού συντελεστή που προκύπτει από δομικά και άλλα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την τρωτότητα, όπως έχει προκύψει από παρατηρηθείσες βλάβες σε πλήθος φύλλων καταγραφών ζημιών από σεισμούς.

Σύμφωνα με την *θεωρία του ασαφούς συνόλου* (fuzzy set theory) είναι δυνατόν να αντικαταστήσουμε την απόφαση για το αν ένα στοιχείο ανήκει ή όχι σε ένα σύνολο, με την εκτίμηση του βαθμού που αυτό μπορεί να ανήκει σε ένα σύνολο, βάσει του μέτρου διατεταγμένης κλίμακας, γνωστό ως *βαθμός συμμετοχής* (degree of membership). Ο ποσοτικός προσδιορισμός του αντιπροσωπευτικού δείκτη τρωτότητας VI^* υπολογίζεται από μια εξίσωση συμμετοχής (Dubois, 1980), που καθορίζει αν η τιμή μιας συγκεκριμένης παραμέτρου α ανήκει σε ένα ειδικό σύνολο. Για την πιο πιθανή κατηγορία, ο συντελεστής α ορίζεται 1 ($\alpha=1$), για κατηγορίες μικρότερης πιθανότητας

($\alpha=0.6$) και για εξαιρετικές, λιγότερο πιθανές περιπτώσεις ($\alpha=0.2$). Για κάθε τύπο κτιρίου υπολογίζονται 5 αντιπροσωπευτικοί δείκτες, σαν γραμμικός συνδυασμός των υφιστάμενων τάξεων τρωτότητας πολλαπλασιάζοντας κάθε μια με συντελεστή εξαρτώμενο από το βαθμό στον οποίο ανήκει. **Ο κεντρικός δείκτης της συνάρτησης αποτελεί τον αντιπροσωπευτικό δείκτη VI* για τον τύπο του κτιρίου (πίνακας 2).**

Πίνακας 2 Πίνακας σύνδεσης των τάξεων τρωτότητας με τους βασικούς-κύριους δείκτες τρωτότητας (Giovinezzi and Lagomarsino, 2004).

	VI min	VI ^{c-}	VI*	VI ^{c+}	VI max
A	1.02	0.94	0.9	0.86	0.78
B	0.86	0.78	0.74	0.7	0.62
C	0.7	0.62	0.58	0.54	0.46
D	0.54	0.46	0.42	0.38	0.3
E	0.38	0.3	0.26	0.22	0.14
F	0.22	0.14	0.1	0.06	-1.02

Οι κύριοι αυτοί δείκτες θεωρηθήκαν δεδομένοι για κάθε τυπολογία κτιρίου. Οι τροποποιητικοί δείκτες της σεισμικής συμπεριφοράς του κτιρίου λόγω δομικών ιδιοτεροτήτων των Giovinezzi και Lagomarsino (2004) προσαρμόστηκαν στα δεδομένα των κτιρίων της περιοχής ενδιαφέροντος.

3.2 Εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας

Οι παράμετροι της σεισμικής κίνησης σε δεδομένη περιοχή καθορίζονται από τις παραμέτρους της σεισμικής εστίας, από την διαδρομή διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες.

Οι ιδιότητες της σεισμικής εστίας καθορίζονται από το μέγεθος του σεισμού, τη σεισμική ροπή, την πτώση τάσης, η οποία συνδέεται με τη μέση μετάθεση στο σειсмоγόνο ρήγμα, το μηχανισμό γένεσης και το φάσμα της σεισμικής κίνησης στην εστία του σεισμού.

Η διαδρομή διάδοσης του κύματος από την εστία στη θέση ενδιαφέροντος επηρεάζει το πλάτος της μετακίνησης. Συγκεκριμένα κατά την γεωμετρική διασπορά των κυμάτων χώρου, η σεισμική ενέργεια που περνάει ανά μονάδα χρόνου και μονάδα επιφάνειας είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης. Η ενέργεια του κύματος είναι ανάλογη του τετραγώνου του πλάτους της μετάθεσης, επομένως το πλάτος μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα της απόστασης από την εστία.

Η γνώση του εδαφικού στρώματος, στο οποίο θεμελιώνονται οι κατασκευές, είναι σημαντική διότι επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τη σεισμική συμπεριφορά τους.

Στην παρούσα διατριβή εφαρμόστηκαν οι πιθανολογική και αιτιοκρατική μέθοδοι εκτίμησης της σεισμικής επικινδυνότητας. Η εκτίμηση του μέγιστου αναμενόμενου μεγέθους σεισμού πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο πιθανολογικής ανάλυσης σεισμικής επικινδυνότητας. Η αιτιοκρατική μέθοδος εφαρμόστηκε για την εκτίμηση των παραμέτρων εδαφικής κίνησης, μέσω στοχαστικής προσομοίωσης με χρήση μοντέλων σημειακής πηγής και πεπερασμένης επιφάνειας ρήγματος δύο σεισμικών σεναρίων, αφενός του σεισμού στις 14-8-2003 $M_w=6.2$ και αφετέρου, του μέγιστου αναμενόμενου σεισμού που υπέδειξε η πιθανολογική μελέτη. Η απόκριση των εδαφικών σχηματισμών καθορίστηκε μέσω των φασματικών λόγων οριζόντιων ως προς την κατακόρυφη συνιστώσα (καμπύλες HVSR), που προέκυψαν από μετρήσεις μικροθορύβου στην περιοχή (Kassaras et al., 2008).

Προσδιορίστηκαν τα δυναμικά χαρακτηριστικά των εδαφικών σχηματισμών με αντιστροφή των καμπύλων φασματικών λόγων οριζόντιων προς κατακόρυφη συνιστώσα (καμπύλες HVSR) χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Monte-Carlo. Το αρχικό ελαστικό μοντέλο για τη διαδικασία αντιστροφής προέκυψε από την ανάλυση διαθέσιμων στοιχείων γεωτεχνικών γεωτρήσεων στην περιοχή μελέτης.

3.2.1 Πιθανολογική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας

Τα αποτελέσματα των πιθανολογικών αναλύσεων αποτελούν σημαντικό εργαλείο στην πρόληψη και αντιμετώπιση καταστροφών από σεισμούς από ιδιωτικούς αλλά και κυβερνητικούς φορείς. Η εφαρμογή της θεωρίας των ακραίων τιμών που εισηγήθηκε αρχικά από τον Gumbel (1958) και έχει εφαρμοστεί με επιτυχία και σε άλλες περιοχές του ελλαδικού χώρου (Makropoulos and Burton, 1984), είναι μια αξιόπιστη μέθοδος που επιλέχτηκε στη συγκεκριμένη διατριβή. Οι υπολογισμοί έγιναν με το πρόγραμμα HAZAN (Makropoulos and Burton, 1986).

Οι προϋποθέσεις για την εφαρμογή της μεθοδολογίας είναι η επιλογή καταλόγου σεισμών και συναρτήσεων απόσβεσης για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης και της μετατόπισης. Επιλέχτηκε κατάλογος σεισμών από το 1900 (Markopoulos et al., 2012). Οι σχέσεις απόσβεσης παρέχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης της εδαφικής κίνησης σε μια θέση, λαμβάνοντας υπόψη το μέγεθος του σεισμού (M) και την απόσταση μεταξύ υπόκεντρου και θέσης μελέτης (R) σε χιλιόμετρα. Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης (A) είναι (Makropoulos, 1978):

$$A = 2164 e^{0.7M} (R+20)^{-1.8} \text{ (σε cm / s}^2 \text{)} \quad (3)$$

η οποία έχει σε μεγάλο βαθμό εφαρμοστεί στην Ελλάδα (Makropoulos and Burton, 1985b; Pavlou et al., 2013; Makropoulos et al., 2013; Kouskouna and Kaviris, 2014) και σύμφωνα με τους Papaioannou et al. (2008), οι τιμές των υπολογιζόμενων επιταχύνσεων από αυτή τη σχέση αποτελούν περίπου το μέσο όρο των αντίστοιχων τιμών που έχουν υπολογιστεί από τις προτεινόμενες σχέσεις των Theodulidis and Papazachos (1992) και Margaris et al. (2001).

Οι σχέσεις υπολογισμού της ταχύτητας V και της μετατόπισης D που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι προτεινόμενες από τους (Orphal and Lahoud, 1974):

$$V = 7.26 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{0.52M} R^{-1.39} \text{ (σε cm/sec)} \quad (4)$$

$$D = 4.71 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{0.57M} R^{-1.18} \text{ (σε cm)} \quad (5)$$

Οι παράμετροι των μέγιστων εδαφικών κινήσεων επιτάχυνσης PGA, ταχύτητας PGV και μετατόπισης PGD καθορίζονται από την εφαρμογή της μεθόδου των ακραίων τιμών και της πρώτης ασυμπτωτικής κατανομής του Gumbel, η οποία είναι:

$$G'(x) = \exp(-\exp(-a(x-u))), a > 0 \quad (6)$$

Το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος σεισμού υπολογίζεται με τη μέθοδο των ακραίων τιμών και την τρίτη ασυμπτωτική κατανομή του Gumbel:

$$G'''(x) = \exp(-((\omega-x)/(\omega-u))^k), k > 0, x \leq \omega, u < \omega \quad (7)$$

όπου $G(x)$ αντιπροσωπεύει την πιθανότητα η μεταβλητή x να είναι μια ετήσια ακραία τιμή, δηλαδή $G(x)$ είναι η ετήσια πιθανότητα το x να μην υπερβεί μια τιμή. Η παράμετρος u είναι μια χαρακτηριστική τιμή της μεταβλητής x με την πιθανότητα $G(u) = 1/e$ να είναι μια ετήσια ακραία τιμή. Η παράμετρος (k) αντιπροσωπεύει την καμπυλότητα της κατανομής. Η παράμετρος (ω) αποτελεί το ανώτερο όριο του μεγέθους σεισμού για την υπό μελέτη περιοχή.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αφορούν περίοδο επανάληψης 950 χρόνων (90% πιθανότητα μη υπέρβασης στα 100 χρόνια), περίοδο επανάληψης 475 χρόνων (90% πιθανότητα μη υπέρβασης στα 50 χρόνια), περίοδο επανάληψης 98 χρόνων (60% πιθανότητα μη υπέρβασης στα 50 χρόνια) και περίοδο επανάληψης 49 χρόνων (60% πιθανότητα μη υπέρβασης στα 25 χρόνια).

3.2.2 Εκτίμηση των χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών

Η μελέτη των ιδιοτήτων των εδαφικών σχηματισμών που βρίσκονται πάνω από το βραχώδες υπόβαθρο είναι αναγκαία για την εκτίμηση της εδαφικής κίνησης σε συγκεκριμένη θέση μετά από δεδομένο σεισμό.

Έχοντας σαν στόχο την μελέτη του σεισμικού κινδύνου ανά κτίριο, πρέπει να ξέρουμε τα ακριβή γεωτεχνικά στοιχεία σε κάθε θέση θεμελίωσης. Δεν ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν γεωτρήσεις λόγω οικονομικών λόγων.

Με δεδομένες τις καμπύλες φασματικού λόγου οριζόντιων ως προς την κατακόρυφη συνιστώσα (Horizontal to Vertical Spectral Ratio – HVSR) στην υπό μελέτη περιοχή (Kassaras et al., 2008), προσδιορίστηκαν οι δυναμικές

ιδιότητες της εδαφικής στήλης για κάθε θέση. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε μεθοδολογία που βασίζεται σε επαναλαμβανομένη και διαδοχική τυχαία αντιστροφή ελαστικών μοντέλων εδάφους, έτσι ώστε να επιτευχθεί η βέλτιστη σύγκλιση με τα πειραματικά δεδομένα, δηλ. τις καμπύλες HVS_R. Χρησιμοποιήθηκε το υπολογιστικό πρόγραμμα ModelHVS_R (Herak, 2007) που αποτελείται από ρουτίνες γραμμένες σε κώδικα MatLab. Η διαδικασία δεν αποδίδει μοναδικό αποτέλεσμα εκτός και αν κάποιες από τις ελαστικές παραμέτρους είναι γνωστές από ανεξάρτητες μετρήσεις. Η μέθοδος θεωρείται αξιόπιστη όταν το αρχικό μοντέλο θεωρηθεί με βάση διαθέσιμα γεωφυσικά και γεωτεχνικά στοιχεία.

Η παραμετροποίηση της διαδικασίας γίνεται με ένα αρχικό ελαστικό μοντέλο, την οριοθέτηση των ελαστικών σταθερών και τον αριθμό των επαναλήψεων. Οι καμπύλες HVS_R που έχουν υπολογιστεί σε διάφορες θέσεις συγκρίνονται με θεωρητικά φάσματα ενίσχυσης των κυμάτων χώρου P και S και με το λόγο τους, έτσι ώστε να υπολογιστεί το καλύτερο γεωτεχνικό μοντέλο.

Υπολογίζονται οι δυναμικές ιδιότητες της εδαφικής στήλης που υπέρκειται του βραχώδους υποβάθρου και συγκεκριμένα, ένα μονοδιάστατο ελαστικό μοντέλο στρωμάτων συναρτήσει του βάθους. Για κάθε στρώμα καθορίζεται το πάχος του, η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων χώρου (P και S) σε αυτό, η πυκνότητά του και το πάχος του. Στη μέθοδο, ο μικροθόρυβος θεωρείται ότι αποτελείται από κύματα χώρου, τα οποία διαδίδονται κατακόρυφα, ενώ η διαστρωμάτωση των εδαφικών σχηματισμών θεωρείται οριζόντια.

Οι θεωρητικές καμπύλες (HVS_R_{THE}), όπου η κάθε μια αντιστοιχεί σε διαφορετικό θεωρητικό γεωτεχνικό μοντέλο συγκρίνονται με την πραγματική (HVS_R_{OBS}) έτσι ώστε η συνάρτηση διαφοροποίησης των φασματικών πλατών να ελαχιστοποιείται

$$m = \sum \{ [HVS_{R_{OBS}}(f_i) - HVS_{R_{THE}}(f_i)] W_i \}^2 \quad (8)$$

όπου η παράμετρος W_i καθορίζεται από τη σχέση

$$W_i = [HVS_{R_{OBS}}(f_i)]^E, E > 0$$

Για τιμή $E > 0$, μεγαλύτερο βάρος δίνεται στα δεδομένα κοντά στα μέγιστα των HVS_R_{OBS} (παρατηρηθείσα HVS_R). Η τιμή HVS_R_{THE} είναι η θεωρητική

καμπύλη HVSR για το συγκεκριμένο μοντέλο. Η επιλογή της τιμής του Ε καθορίζεται από τον χρήστη.

3.2.3 Στοχαστική προσομοίωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης

Έχοντας υπολογίσει τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους σε διάφορες θέσεις μέσω της διαδικασίας αντιστροφής των καμπυλών HVSR και τον μέγιστο αναμενόμενο σεισμό εγγύς πεδίου μέσω της πιθανολογικής ανάλυσης της σεισμικής επικινδυνότητας, είναι εφικτή η κατασκευή ρεαλιστικών συνθετικών επιταχυνσιογραφημάτων για την περιοχή ενδιαφέροντος.

Τα μοντέλα στοχαστικής προσομοίωσης της εδαφικής κίνησης βασίζονται στην παραδοχή ότι το πλάτος της εδαφικής κίνησης σε μια θέση μπορεί να καθοριστεί, με αιτιοκρατικό τρόπο, από το μέγεθος του σεισμού και την υποκεντρική απόσταση. Οι μέθοδοι είναι πολύ χρήσιμες όταν προσομοιώνονται εδαφικές κινήσεις υψηλών συχνοτήτων και εφαρμόζονται σε περιοχές που δεν υπάρχουν επαρκείς πραγματικές καταγραφές (Boore, 2005).

Για την προσομοίωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης για μεγάλους σεισμούς εγγύς πεδίου εφαρμόστηκαν δυο μοντέλα: της σημειακής πηγής (point-source) (Boore, 1983) και του πεπερασμένου ρήγματος (finite-fault) (Beresnev and Atkinson, 1997; 1998; 1999).

3.2.3α. Μέθοδος σημειακής πηγής (point source model)

Στο μοντέλο της σημειακής πηγής, η ενέργεια από ένα ρήγμα κατανέμεται τυχαία σε δεδομένο χρόνο, όπου η διάρκεια σχετίζεται με το μέγεθος της πηγής (διάρρηξης) και της απόστασης της πηγής από τη θέση ενδιαφέροντος (Hanks, 1979; McGuire and Hanks, 1980; Boore, 1983). Σημαντικό στοιχείο της μεθόδου είναι ότι μετατρέπει όλα όσα γνωρίζουμε για τους παράγοντες που επηρεάζουν τη σεισμική εδαφική κίνηση, σε απλές συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης. Το μοντέλο που υιοθετήθηκε έχει προταθεί από τον Boore (2005). Έχει εφαρμοστεί από την υπηρεσία Γεωλογικών Ερευνών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής

(USGS) και είναι πολύ χρήσιμο στην πρόβλεψη της εδαφικής κίνησης περιοχών για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμες καταγραφές καταστροφικών σεισμών.

Η εδαφική κίνηση καθορίζεται από την πηγή, την διαδρομή των σεισμικών κυμάτων και τις εδαφικές συνθήκες στη θέση ενδιαφέροντος. Καμία πληροφορία σχετικά με τη γεωμετρία του ρήγματος δεν χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς. Ο αλγόριθμος είναι σε γλώσσα Fortran και περιλαμβάνει σειρά από υπορουτίνες, οι οποίες μπορούν να υπολογίσουν χρονοσειρές ταχύτητας, επιτάχυνσης, μετατόπισης και τις αντίστοιχες μέγιστες τιμές τους, ένταση Arias, φάσματα απόκρισης για ένα ευρύ φάσμα περιόδων ταλαντωτή, αλλά και φάσματα Fourier. Υπορουτίνα του προγράμματος λαμβάνει υπόψη τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στην προσομοίωση των ισχυρών εδαφικών κινήσεων.

3.2.3β. Μέθοδος πεπερασμένου ρήγματος (finite fault model)

Στη στοχαστική προσέγγιση πεπερασμένου ρήγματος το παραλληλόγραμμο ρήγμα διαιρείται σε μικρότερα υπορήγματα και κάθε ένα από αυτά θεωρείται ως σημειακή πηγή η οποία χαρακτηρίζεται από ένα φάσμα τύπου ω^2 (Brune, 1970; Boore, 1983). Η διάρρηξη ξεκινά στο ορισθέν υπόκεντρο και διαδίδεται μέχρι να ενεργοποιηθεί κάθε υπορήγμα (Hartzell, 1978). Το μέτωπο της διάρρηξης που εξαπλώνεται ακτινικά από το υπόκεντρο ενεργοποιεί τα υπορήγματα όταν φτάσει στα κέντρα τους. Το φάσμα της επιτάχυνσης για κάθε υπορήγμα εκφράζεται ως αποτέλεσμα συνέλιξης πηγής, διαδρομής και εδαφικών συνθηκών. Η συμβολή όλων των υπορηγμάτων αθροίζεται σε θέσεις παρατήρησης στην επιφάνεια, για καθένα από τα οποία υπολογίζεται ένα τυχαίο συνθετικό οριζόντιο επιταχυνσιογράφημα. (Beresnev and Atkinson, 1998).

3.3 Σύνθεση σεναρίων σεισμικού κινδύνου

Έχοντας εκτιμήσει την τρωτότητα και τις παραμέτρους της αναμενόμενης εδαφικής κίνησης, επόμενος στόχος της διατριβής είναι η εκτίμηση της πιθανότητας βλάβης για κάθε κτίριο.

Για τον υπολογισμό της πιθανοτικής κατανομής του βαθμού βλάβης εφαρμόσαμε την αθροιστική συνάρτηση της κατανομής βήτα (beta cumulative density function_CDF)

$$CDF : P_{\beta}(x) = \int_a^x p_{\beta}(\varepsilon) d\varepsilon \quad (9)$$

Η συνάρτηση της πιθανότητας (Probability Density Function PDF) έχει τη μορφή:

$$PDF : p_{\beta}(x) = \frac{\Gamma(t)}{\Gamma(r)\Gamma(t-r)} \frac{(x-a)^{r-1}(b-x)^{t-r-1}}{b-a} \quad a \leq x \leq b \quad (10)$$

Η μέση τιμή της συνεχούς μεταβλητής δίνεται από τη σχέση:

$$\mu_{\chi} = a + r/t (b-a) \quad (11)$$

Όπου a, b, r, t είναι οι παράμετροι της κατανομής. Η μ_{χ} , παίρνει τιμές μεταξύ των a και b.

Είναι απαραίτητο να αναφέρουμε ότι ο βαθμός βλάβης είναι μια διακριτή μεταβλητή που παίρνει τιμές από 0-5 σύμφωνα με την κλίμακα της EMS, συμπεριλαμβανομένης της περίπτωσης όπου το κτίριο δεν έχει πάθει βλάβη (6 πιθανές τιμές), άρα η παράμετρος a παίρνει την τιμή 0 και η παράμετρος b την τιμή 6.

Η μέση τιμή βλάβης μπορεί επίσης να περιγραφεί από την εξίσωση μέσης τιμής της διακριτής μεταβλητής

$$\mu_D = \sum_{k=0}^5 k \cdot p_k \quad (12)$$

Ακολουθώντας τον ορισμό της πιθανότητας βλάβης, η μέση τιμή της διακριτής μεταβλητής και η μέση τιμή της βήτα κατανομής μπορούν να συνδεθούν με πολυώνυμο τρίτου βαθμού

$$\mu_{\chi} = 0.042\mu_D^3 - 0.315\mu_D^2 + 1.725\mu_D \quad (13)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει τρίτου βαθμού πολυώνυμο που συνδέει τις παραμέτρους r και t της βήτα κατανομής με τη μέση τιμή βαθμού βλάβης μ_D

$$r = t (0.007\mu_D^3 - 0.0525 \mu_D^2 + 0.2875 \mu_D) \quad (14)$$

εάν $t=8$ η βήτα κατανομή παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με την διωνυμική κατανομή).

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, υπολογίζουμε την πιθανότητα να συμβεί βαθμός βλάβης k (όπου $k=0-5$) από τη σχέση

$$p_k = P_\beta(k + 1) - P_\beta(k) \quad (15)$$

Έχοντας επιλύσει το πρόβλημα της απουσίας πιθανότητας βλάβης για κάποιες τάξεις τρωτότητας σε σχέση με κάποιες τιμές έντασης, παραμένει το πρόβλημα του αριθμητικού προσδιορισμού των κτιρίων που θα υποστούν κάποιο βαθμό βλάβης στη θέση των περιγραφικών προσδιορισμών (λίγα, μερικά, τα περισσότερα) της EMS98.

Η θεωρία του ασαφούς συνόλου δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα, οδηγώντας στην εύρεση ανώτερου και κατώτερου ορίου αναμενόμενης βλάβης (Bernadini 1999). Για κάθε τάξη τρωτότητας και για τις διαφορετικές τιμές έντασης, υπολογίζονται τα σχεδόν βέβαια και τα πιθανά όρια της μέσης τιμής βλάβης, καθώς και καμπύλες που δείχνουν την σχεδόν βέβαια αλλά και την πιθανή περιοχή της μέσης πιθανής βλάβης κάθε τάξης τρωτότητας που συσχετίζεται με την Ένταση. Από την παρεμβολή των καμπύλων προκύπτει συνάρτηση που εκφράζει τη μέση τιμή βλάβης σε σχέση με τον δείκτη τρωτότητας του κτιρίου (VI) και την σεισμική Ένταση (I).

$$\mu_D = 2.5 \{1 + \tanh[(I + 6.25VI - 13.1)/2.3]\} \quad (16)$$

Το μοντέλο προσομοίωσης εδαφικής κίνησης που περιγράφεται σε προηγούμενη παράγραφο, δίνει τη δυνατότητα να υπολογιστούν σε κάθε θέση μέγιστες και φασματικές τιμές εδαφικής κίνησης. Η σχέση που δίνει το μέσο βαθμό βλάβης εκφράζεται σαν συνάρτηση της σεισμικής έντασης. Η σεισμική ένταση μπορεί να συνδεθεί με τις εδαφικές παραμέτρους, όπως προκύπτει από πολλές μελέτες διαφορετικών περιοχών κατά την ανάλυση

αποτελεσμάτων παλαιότερων σεισμών. Για τον υπολογισμό της σεισμικής έντασης επιλέχθηκαν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\log(\text{PGA}) = 0.358 + 0.258 I_{\text{MSK}} \quad (\text{Margottini et al., 1992}) \quad (17)$$

$$I = 3.66 \log(\text{PGA}) - 1.66 \quad (\text{Wald et al., 1999}) \quad (18)$$

$$I = 3.563 \log(\text{PGA}) - 0.946 \quad (\text{Tselentis and Danciu, 2008}) \quad (19)$$

Μετά τη μετατροπή της επιτάχυνσης σε ένταση και έχοντας υπολογίσει το δείκτη τρωτότητας για κάθε κτίριο, μπορεί να εκτιμηθεί ο πιθανότερος βαθμός βλάβης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Γεωλογική και Σεισμοτεκτονική ανάλυση

4.1 Γεωλογία - Στρωματογραφία

Η σεισμική επικινδυνότητα μιας περιοχής εξαρτάται από το γεωτεκτονικό καθεστώς που επικρατεί στην ευρύτερη περιοχή. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή της γεωλογικής ιστορίας και του τεκτονισμού της νήσου της Λευκάδας που επιδρά στη σεισμικότητα της πόλης της Λευκάδας.

Στη γεωλογική δομή του νησιού της Λευκάδας συμμετέχουν αλπικοί, μολασσικοί και μεταλπικοί σχηματισμοί. Οι αλπικοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν ανθρακικά και κλαστικά ιζήματα που ανήκουν στις δύο εξωτερικές γεωτεκτονικές ενότητες του τόξου των Ελληνίδων, την ενότητα των Παξών και την Ιόνιο ενότητα, με ηλικίες Τριαδικού έως Τορτόνιο και Τριαδικού έως Ακουιτάνιο, αντίστοιχα (Μπορνόβας, 1964). Οι μολασσικοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν κλαστικά κυρίως, θαλάσσια ιζήματα (μάργες, βιοκλαστικούς, υφαλογενείς ασβεστόλιθους, λατυποπαγή, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες), με ηλικία Κατώτερου προς Μέσο Μειόκαινο, τα οποία υπέρκεινται επικλυσίγενώς των πτυχωμένων σχηματισμών της Ιονίου ενότητας και βάσει των οποίων έχει δομηθεί ο κύριος όγκος του νησιού. Αντίθετα, στο δυτικό τμήμα (χερσόνησος Αθανίου), όπου αναπτύσσεται η ενότητα των Παξών, τα ιζήματα της ίδιας περιόδου με τα μολασσικά αποτελούν τα κατώτερα τμήματα του φλύσχη (Μπορνόβας, 1964).

Τέλος, οι μεταλπικοί σχηματισμοί περιλαμβάνουν Νεογενή κλαστικά ιζήματα του με λιμνοχερσαίους ή χερσαίους χαρακτήρες, καθώς και τεταρτογενείς αποθέσεις, παράκτιες, χερσαίες ή λιμνοθαλάσσιες.

Πιο συγκεκριμένα, η ζώνη των Παξών στρωματογραφικά αποτελείται από επιφανειακούς μαργαϊκούς σχηματισμούς, συχνά ψαμμούχους, εναλλασσόμενους με λατυποπαγείς ασβεστόλιθους. Η Ιόνια Ζώνη αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος του νησιού και περιλαμβάνει ιζήματα ηλικίας Αν. Τριαδικού και Ολοκαίνου. Στην πλειοψηφία τους είναι μικροκρυσταλικοί ασβεστόλιθοι μεγάλου πάχους που σε μερικές περιπτώσεις φτάνει τα 600 μέτρα (Bornovas and Rontoyanni-Tsiambaou, 1983; Koukis et al., 1990). Τα νεογενή ιζήματα

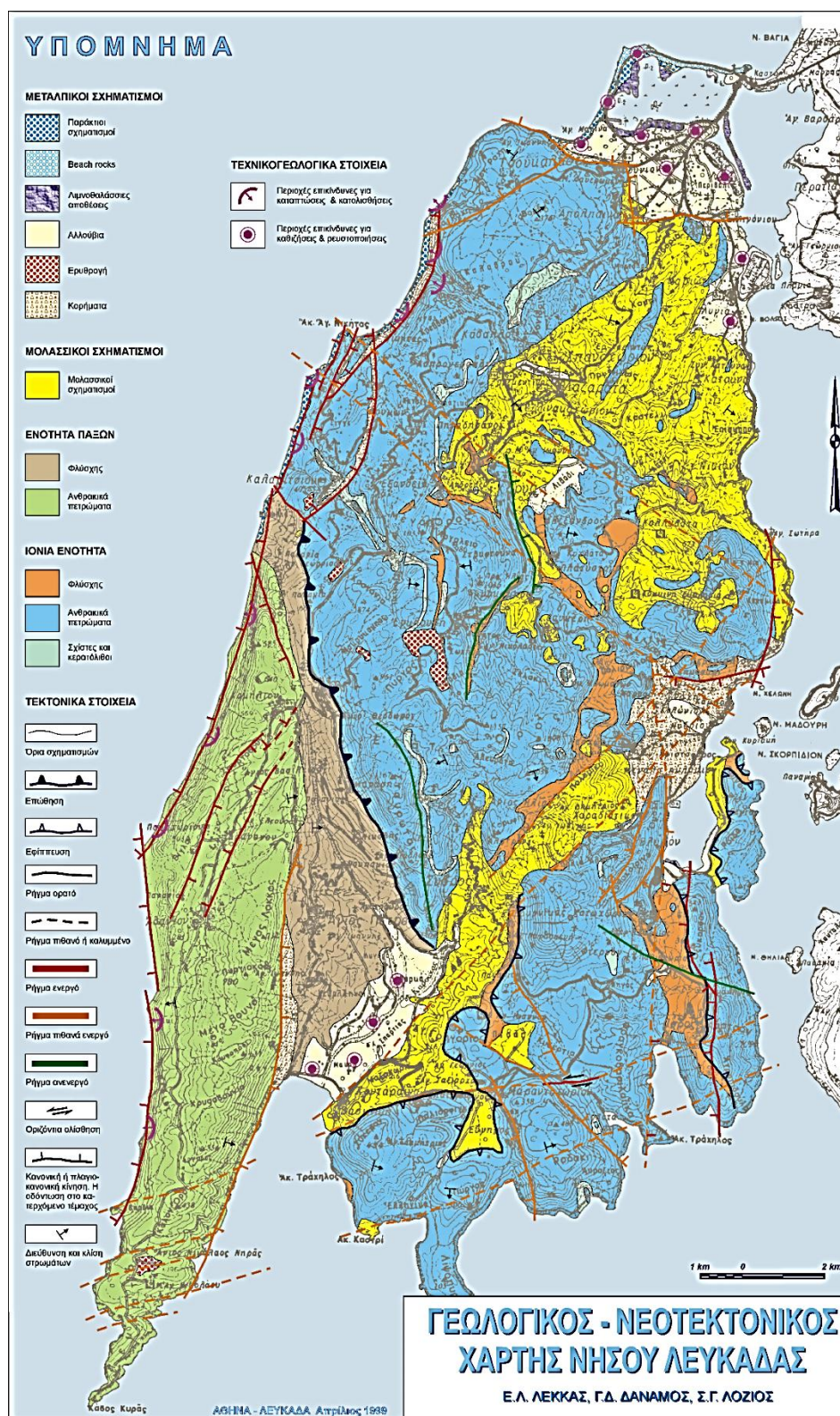
συναντώνται κυρίως στην περιοχή της πόλης της Λευκάδας, καθώς και στις περιοχές Νυδρί και Βασιλική (Lekkas et al., 2001)

Στα πλαίσια του αλπικού τεκτονισμού του νησιού είναι σαφέστατη η διάκριση ανάμεσα στις δύο τεκτονικές, παραμορφωτικές φάσεις, που ουσιαστικά δημιούργησαν το γεωλογικό αλπικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο επικάθονται οι σχετικά νεώτεροι σχηματισμοί (Cushing, 1985). Η πρώτη φάση αλπικού τεκτονισμού τεκμηριώνεται με βάση την επικλυσιογενή απόθεση των μολασσικών σχηματισμών πάνω στα παραμορφωμένα ιζήματα της Ιόνιας Ζώνης, τα οποία και έχει επηρεάσει. Τα ιζήματα της ενότητας Παξών έμειναν κατά την περίοδο αυτή ανεπηρέαστα από τις τεκτονικές κινήσεις.

Κατά τη διάρκεια της πρώτης τεκτονικής φάσης αναδύθηκε το μεγαλύτερο τμήμα της νήσου (κεντρικό και ανατολικό), ενώ το νοτιοδυτικό τμήμα, που ουσιαστικά αντιστοιχεί στη χερσόνησο Αθανίου, παρέμεινε υπό τη θάλασσα. Παράλληλα δημιουργήθηκαν ημιανεστραμμένες ή κατακεκλιμένες πτυχές, ανάστροφα ρήγματα και εφιππεύσεις μέσα στην Ιόνιο Ενότητα.

Η δεύτερη φάση αλπικού τεκτονισμού τεκμηριώνεται από τη δημιουργία της επιφάνειας επώθησης, όπου εξαιτίας της τεκτονικής εφαπτομενικής κίνησης προς τα δυτικά, τα ιζήματα της Ιονίου Ενότητας τοποθετούνται πάνω σε αυτά των Παξών (Cushing, 1985). Κατά τη διάρκειά της ολοκληρώθηκε η ανάδυση της νήσου. Κατά την δεύτερη αυτή φάση παραμορφώθηκαν αμυδρά και τα ιζήματα της επικλυσιογενούς, μολασσικής σειράς, τα οποία χαρακτηρίζονται από πτυχές καμπυλότητας μεγάλης ακτίνας (Decourt et al., 1986).

Η πόλη της Λευκάδας αποτελεί πεδινή περιοχή με υψόμετρο περίπου ένα μέτρο. Βόρεια της πόλης σχηματίζεται λιμνοθάλασσα μεταξύ του βορειοανατολικού άκρου του νησιού και στενής λωρίδας ξηράς προς δυτικά και βόρεια και των ακτών της Ακαρνανίας προς ανατολικά. Η πόλη είναι θεμελιωμένη σε έναν ολοκαινικό γεωλογικό σχηματισμό, αποτελούμενο από σύγχρονες αλλουβιακές προσχώσεις, παράκτιους, αμμώδεις σχηματισμούς και λιμνοθαλάσσιες ιλυώδεις αποθέσεις, που επικάθονται στο μαργαϊκό υπόβαθρο. Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί απεικονίζονται στο Γεωλογικό χάρτη της Λευκάδας (Lekkas et al., 2001) (Σχ. 4).

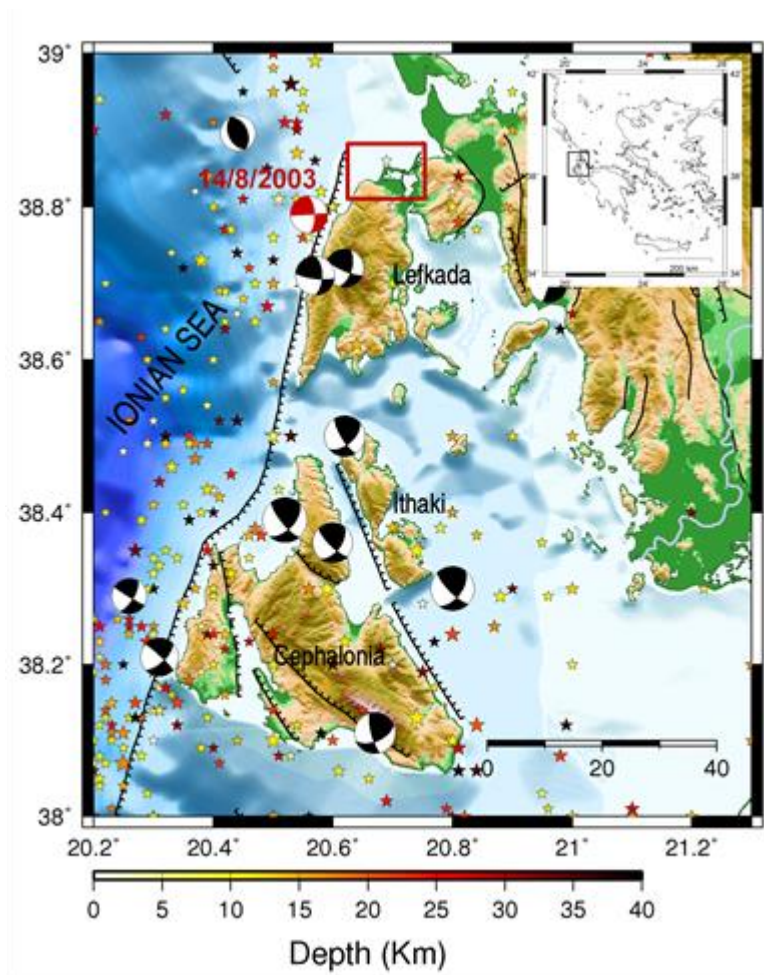


Σχήμα 4 Γεωλογικός χάρτης Λευκάδας

4.2 Τεκτονική

Το νησί της Λευκάδας είναι το τέταρτο σε έκταση ανάμεσα στα νησιά του Ιονίου Πελάγους. Βρίσκεται κοντά στις δυτικές ακτές της ηπειρωτικής Ελλάδας και απέχει ελάχιστα από αυτές. Συνδέεται με την κοντινότερη ακτή με πλωτή γέφυρα. Από τεκτονικής άποψης βρίσκεται στο νοτιοδυτικό μέρος του Ελληνικού Τόξου, όπου παρουσιάζεται σύγκλιση μεταξύ της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής πλάκας. Συγκεκριμένα, το γεωτεκτονικό καθεστώς της περιοχής καθορίζεται από δυο τεκτονικές κινήσεις, αφενός στα νότια του νησιού, όπου ο ωκεάνιος φλοιός της ανατολικής μεσογείου καταβυθίζεται κάτω από τον ηπειρωτικό φλοιό της μικροπλάκας του Αιγαίου και αφετέρου στα βόρεια, από την σύγκλιση δυο ηπειρωτικών πλακών, αυτών της Απουλίας και της Ευρασίας (Clement et al., 2000). Αυτή η σύγκρουση έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία πτυχώσεων και ρηξιγενών ζωνών με διεύθυνση ΒΒΔ-ΝΝΑ. Η περιοχή του Ιονίου αποτελεί μια από τις περιοχές με τα μεγαλύτερα ποσοστά παραμόρφωσης ηπειρωτικού φλοιού και σεισμικής δραστηριότητας (Haslinger et al., 1999).

Σημαντικότερο από όλα τα ρήγματα της περιοχής είναι το ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης που ξεκινά νότια της Κεφαλονιάς και φτάνει στη βόρεια Λευκάδα (Cephalonia transform fault zone, CTFZ) (Papazachos and Kiratzi, 1995) (Σχ.5). Συνδέει δυο τεκτονικές επαφές πλακών, την καταβύθιση του ωκεάνιου φλοιού και την συγκόλληση των δυο ηπειρωτικών και έγκειται από δυο τμήματα. Το βόρειο τμήμα του ρήγματος αυτού ονομάστηκε κλάδος της Λευκάδας (Lefkada segment, LS) και το νότιο κλάδος της Κεφαλονιάς (Cephalonia segment, CS). Το ρήγμα αυτό διαχωρίζει το κινηματικό πεδίο του Ιονίου. Η κίνηση του βορειοδυτικού τμήματος είναι αντίθετη με εκείνη του νοτιοανατολικού. Επίσης η διεύθυνση της κίνησης του δυτικού τμήματος της Λευκάδας εκτιμάται δυτικότερη σε σχέση με του ανατολικού τμήματος (Chouliaras et al., 2013). Το εκτιμώμενο μήκος και βάθος για τον κλάδο της Λευκάδας είναι 40km και 15km ενώ για τον κλάδο της Κεφαλονιάς είναι 85km και 20km αντίστοιχα, με εκτιμώμενα μεγέθη σεισμών με βάση το μήκος των κλάδων 6.8 και 7.4 αντίστοιχα (Louvari et al., 1999; Papazachos and Papazachou, 2003).

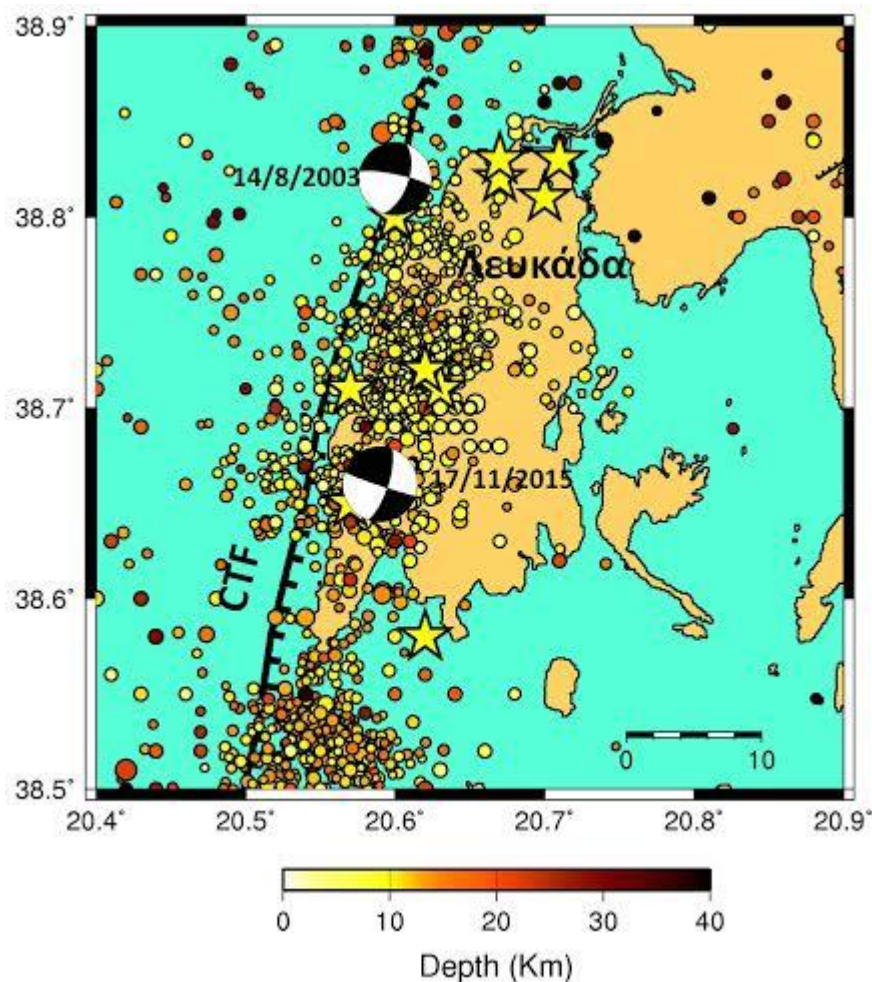


Σχήμα 5 Σεισμοτεκτονικός χάρτης της περιοχής (Kassaras et al., 2014)

Η κατανομή των επικέντρων των σεισμών στη Λευκάδα (Σχ. 6) αποδεικνύει ότι το ρήγμα αυτό είναι υπεύθυνο για την υψηλή σεισμικότητα της περιοχής. Οι διαθέσιμοι μηχανισμοί γένεσης μεγάλων σεισμών δείχνουν ότι το τμήμα της Λευκάδας έχει διεύθυνση BBA –NNΔ και βύθιση προς A-NA, συνδυάζοντας δεξιόστροφη κίνηση (Kassaras et al., 1993) με οριζόντια ολίσθηση (Papadimitriou et al., 2012).

Η γεωμετρία του έχει επιβεβαιωθεί από λεπτομερείς μικροσεισμικές μελέτες (Hatzfeld et al., 1995) και μελέτες μετασεισμικών ακολουθιών βασισμένες σε ανάλυση τοπικών καταγραφών (Makropoulos et al., 1996; Karakostas et al., 2004; Karakostas and Papadimitriou, 2010). Η διεύθυνση της συμπίεσης έχει προσδιοριστεί ΔΝΔ-ΑΒΑ (Le Pichon and Angelier, 1979). Τα εστιακά βάθη

διαπιστώνονται μέχρι το βάθος των 12 km, με σχεδόν κατακόρυφη κατανομή (Makropoulos et al.,1996;)



Σχήμα 6 Χάρτης σεισμικότητας της Λευκάδας για το χρονικό διάστημα 2008-2016, $M \geq 2$ (bbnet.gein.noa.gr)

4.3 Σεισμικότητα της Λευκάδας

Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο τα σεισμικά γεγονότα συσχετίζονται με το βόρειο τμήμα του ρήγματος μετασχηματισμού (CTFZ) ή τον κλάδο της Λευκάδας (Lefkada Segment, LS) και επιβεβαιώνουν τις τεκτονικές παρατηρήσεις της περιοχής (Stucchi, 2013; Hatzfeld et al.,1995; Kassaras et al., 2012). Οι περισσότεροι καταστροφικοί σεισμοί έχουν πλήξει το βορειοδυτικό και το κεντρικό δυτικό τμήμα του νησιού (Kouskouna et al.,1993; Makropoulos and Kouskouna, 1994)

Οι πρώτες αναφορές σεισμών στα Ιόνια νησιά είναι από το 968, ενώ τα πρώτα στοιχεία που έχουμε για ιστορικούς σεισμούς με επίκεντρο τη Λευκάδα ξεκινούν από το 1577 (Σπυρόπουλος, 1997). Τα δεδομένα για την μην-ενόργανη περίοδο προέρχονται από κείμενα της εποχής, όπως έγγραφα και σύντομα χρονικά των μοναστηριών, προσωπικά ημερολόγια, ημερολόγια πλοίων που έτυχε να βρεθούν στην θαλάσσια περιοχή του νησιού κατά την διάρκεια του σεισμού και σημειώσεις περιηγητών (Kouskouna et al., 1993; Kouskouna and Makropoulos, 2004). Σύμφωνα με τον Ambraseys, 2009 εντοπίζονται διαφορές στις ημερομηνίες που οφείλονται στη διαφορά παλαιού και νέου ημερολογίου. Οι ημερομηνίες που παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία είναι διασταυρωμένες.

Από το 1684 που η Λευκάδα περνά από τους Τούρκους στους Ενετούς, η οργάνωση του κράτους αλλάζει και έτσι υπάρχουν στοιχεία από επίσημα έγγραφα και επιστολές των διοικητών του νησιού προς την Βενετία (κεντρική διοίκηση) (Kouskouna et al., 1993; Ambraseys, 2009). Περιγράφονται καταστροφές σε ολόκληρο το νησί για διαφορετικούς σεισμούς. Το μέγιστο μέγεθος σεισμού που έχει αναφερθεί για τη Λευκάδα είναι ίσο με 6.7, ενώ η μέγιστη μακροσεισμική ένταση ίση με 10.

Κατά μέσο όρο εκδηλώνονται 4 με 5 σεισμοί μεγέθους άνω του 6.2 ανά αιώνα, δηλαδή ένας ισχυρός σεισμός κάθε 20 με 25 έτη (Gazetas et al., 2004). Η πόλη της Λευκάδας έχει υποστεί όπως είναι φυσικό τις περισσότερες βλάβες αφού συγκεντρώνει το μεγαλύτερο πλήθος κτιρίων. Υπήρχαν κάποιοι σεισμοί που δεν την επηρέασαν, όπως αυτοί του 1722, 1783 και 1948 (22/4), ενώ ο μετασεισμός στις 30/6/1948 προκάλεσε ζημιές. Εκτός από τις άμεσες από το σεισμό καταστροφές κτιρίων (σπιτιών, εκκλησιών) έχουν παρατηρηθεί και ζημιές από κατολισθήσεις (1783, 2003, 2015), καθιζήσεις (1820, 1911, 1948, 2003), ρευστοποιήσεις του εδάφους (2003). Κατά τους σεισμούς το 2003 και το 2015 κατολισθήσεις σε πολλές θέσεις προκάλεσαν ζημιές στο οδικό δίκτυο του δυτικού τμήματος του νησιού. (Σχ.7)



(A)



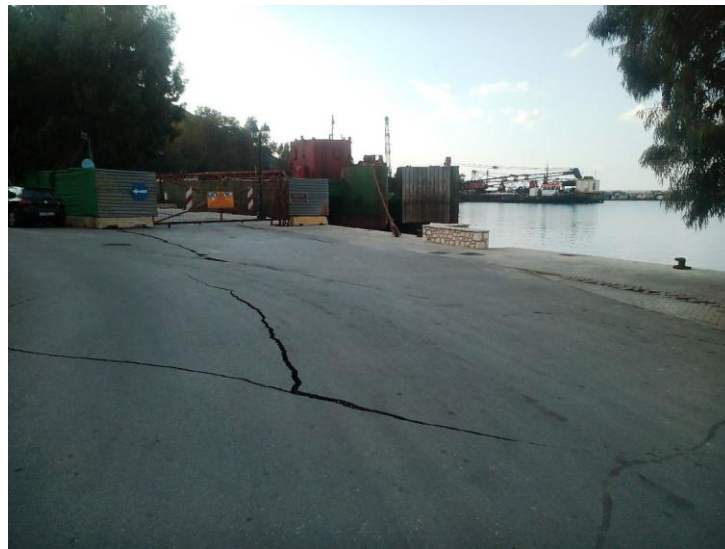
(B)

Σχήμα 7 Κατολισθήσεις: (A) στο επαρχιακό οδικό δίκτυο της Λευκάδας μετά το σεισμό της 14^{ης} Αυγούστου 2003 (ΙΤΣΑΚ, 2004), (B) κοντά στο χωριό Αγ. Νικήτας μετά το σεισμό της 17^{ης} Νοεμβρίου 2015. (Ganas et al., 2015)

Στο σεισμό του 2003 σημειώθηκαν καθιζήσεις του εδάφους (Σχ. 8Α) κυρίως στην πόλη της Λευκάδας, προκαλώντας βλάβες στην προκυμαία. Παρόμοιο φαινόμενο συνέβη στο σεισμό του 2015 στην Βασιλική. (Σχ. 8Β)



(Α)



(Β)

Σχήμα 8 (Α) Βυθίσεις επίχωσης λόγω καθιζήσεων στην πόλη της Λευκάδας κατά το σεισμό του 2003. (ΙΤΣΑΚ, 2004), (Β) Ρωγμές στην άσφαλτο της προκυμαίας στην Βασιλική κατά το σεισμό του 2015. (Ganas et al., 2015)

Επίσης κατά το σεισμό του 2003 παρατηρήθηκε ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού λόγω ρευστοποίησης στην πόλη της Λευκάδας.



**Σχήμα 9 Ρευστοποίηση εδάφους με ανάδυση λεπτόκοκκου υλικού.
(ΙΤΣΑΚ, 2004)**

Κατά το σεισμό του 2015 δεν παρατηρήθηκαν εκτεταμένα φαινόμενα ρευστοποίησης.

Στον πίνακα (Πίνακας 3) που ακολουθεί παρουσιάζονται όλοι οι μεγάλοι σεισμοί που έπληξαν το νησί. Δεκατρείς καταστροφικοί σεισμοί έλαβαν χώρα από τον 17^ο ως τον 19^ο αιώνα (Σταματέλος, 1879; Tsiknakis et al., 1990; Kouskouna et al., 1993; Makropoulos and Kouskouna, 1994; Kouskouna and Makropoulos, 2004).

Ο σεισμός του 1869 ήταν από τους πιο καταστροφικούς για την πόλη της Λευκάδας, μετατρέποντάς την σε σωρό ερειπίων (Parazachos and Parazachou, 2003). Ο επόμενος ισχυρός σεισμός έλαβε χώρα το 1914 προξενώντας σημαντικές βλάβες κυρίως στο δυτικό τμήμα της νήσου. Στην πόλη προξένησε ζημιές κυρίως στην παραλία (Ambraseys, 2009). Για τα επόμενα 45 περίπου έτη ακολούθησε μία περίοδος ύφεσης της σεισμικής δραστηριότητας, αλλά τον Απρίλιο του 1948 ισχυρός σεισμός έπληξε το νοτιοδυτικό τμήμα του νησιού. Ο σεισμός αυτός δεν έπληξε την πόλη, αντίθετα τον Ιούνιο του ίδιου έτους νέος σεισμός κατέστρεψε κυρίως την πόλη της Λευκάδας, όπου εκτός από καταρρεύσεις κτιρίων παρατηρήθηκαν σοβαρές βλάβες στην προκυμαία της πόλης (Gazetas et al., 2004).

Πίνακας 3 Οι σημαντικότεροι σεισμοί που έπληξαν το νησί (Papazachos and Papazachou, 2003; Ambraseys, 2009; Makropoulos et al., 2012)

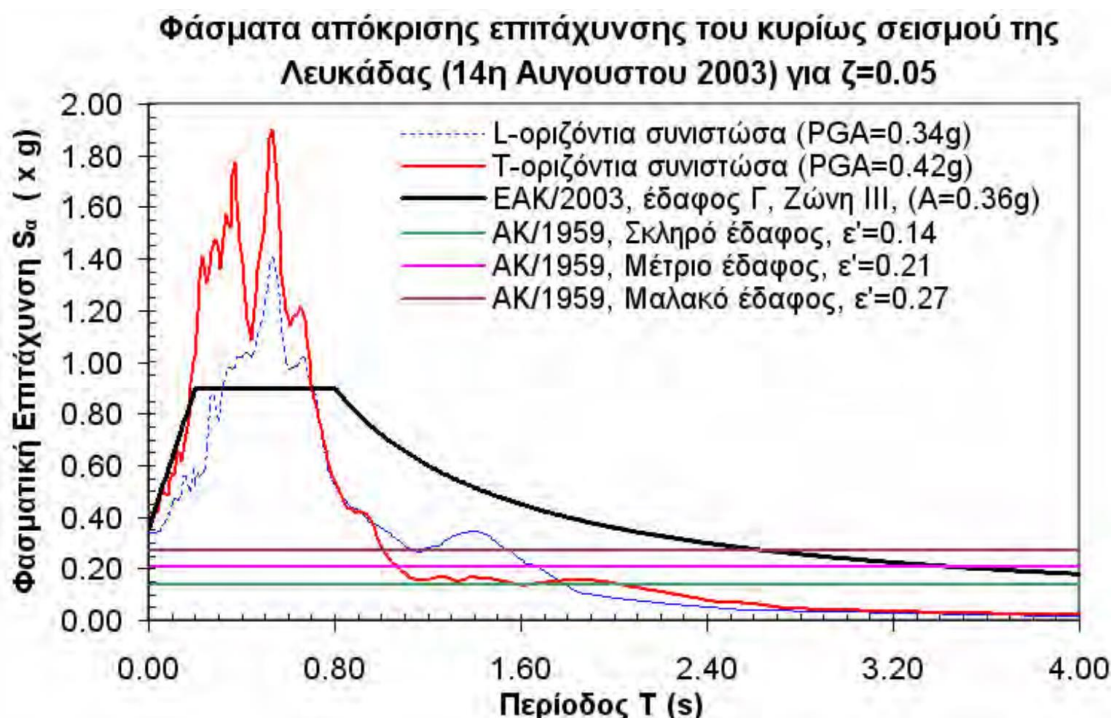
Ημερομηνία	Γεωγραφικό πλάτος (N)	Γεωγραφικό μήκος (E)	I _{max}	M	Περιγραφή βλαβών
1557	38.8	20.8	8	6.2	
26/5/1612	38.8	20.8	8	6.5	1ος καταστροφικός σεισμός
12/10/1613	38.8	20.8	8	6.4	2ος καταστροφικός σεισμός κατάρρευση μιναρέδων, παλατιών και καμάρων
28/6/1625	38.8	20.7	9	6.6	3ος καταστροφικός σεισμός κατάρρευση καμάρων και σπιτιών στο κέντρο της πόλης
2/7/1630	38.8	20.8	9	6.7	4ος καταστροφικός σεισμός καταστροφές σπιτιών ρωγμές στο έδαφος - πολλοί νεκροί
22/11/1704	38.8	20.7	9	6.3	5ος καταστροφικός σεισμός γκρεμίστηκαν σπίτια, εκκλησίες 34 νεκροί
5/6/1722	38.7	20.6	8	6.4	6ος καταστροφικός σεισμός καταστροφές σπιτιών σε πόλη Λευκάδας και χωριά
2/2/1723	38.6	20.65	8	6.7	7ος καταστροφικός σεισμός καταστροφές σπιτιών -εκκλησιών σε πόλη Λευκάδας
11/7/1767	ΚΕΦΑΛΟΝΙΑ				8ος καταστροφικός σεισμός Λευκάδας
12/10/1769	38.8	20.6	9	6.7	9ος καταστροφικός σεισμός κατάρρευση 497 σπιτιών και 10 εκκλησιών 34 νεκροί
2223/3/1783	38.71	20.61	10	6.7	10ος καταστροφικός σεισμός κατάρρευση 855 σπιτιών και 7 εκκλησιών
1815	38.8	20.7	8	6.3	κατάρρευση σπιτιών μεγάλες ζημιές - αρκετοί νεκροί

Πίνακας 3 (συνέχεια) Οι σημαντικότεροι σεισμοί που έπληξαν το νησί (Parazachos and Parazachou, 2003; Ambraseys, 2009; Makropoulos et al., 2012)

Ημερομηνία	Γεωγραφικό πλάτος (N)	Γεωγραφικό μήκος (E)	I _{max}	M	Περιγραφή βλαβών
31/1/1820 28/3/1820	- 38.8	20.6	9	6.4	11ος καταστροφικός σεισμός κατάρρευση όλων των πέτρινων σπιτιών και εκκλησιών
19/1/1825	38.7	20.6	10	6.7	12ος καταστροφικός σεισμός διάρκεια-13sec κατολισθήσεις καταστροφές κτιρίων
28/12/1869	38.8	20.7	10	6.6	13ος καταστροφικός σεισμός κατάρρευση σπιτιών και εκκλησιών - 16 νεκροί
27/11/1914	38.8	20.6	9	6.3	Βλάβες στη δυτική Λευκάδα, στην πόλη κυρίως στην παραλία 16 νεκροί και πολλοί τραυματίες
22/4/1948	38.7	20.5	9	6.5	Ζημιές στα ΝΔ του νησιού. καταστράφηκαν 1209 σπίτια έπαθαν βλάβες 1869 σπίτια, 7 νεκροί
30/6/1948				6.4	Μετασεισμός- έπληξε την παλιά πόλη
1973			7/8	5.8	Σημαντικές βλάβες σε δευτερεύοντα στοιχεία κτιρίων
14/8/2003	38.76	20.60		6.2	Ρευστοποιήσεις, βλάβες στα λιμάνια, μεγάλης εκτάσεως κατολισθήσεις. Περιορισμένες βλάβες σε κτίρια, 50 τραυματίες χωρίς νεκρούς.
17/11/2015	38.67	20.60°		6.4	Κατολισθήσεις, βλάβες σε κτίρια κυρίως σε χωριά στο νότιο τμήμα του νησιού, 2 νεκροί.

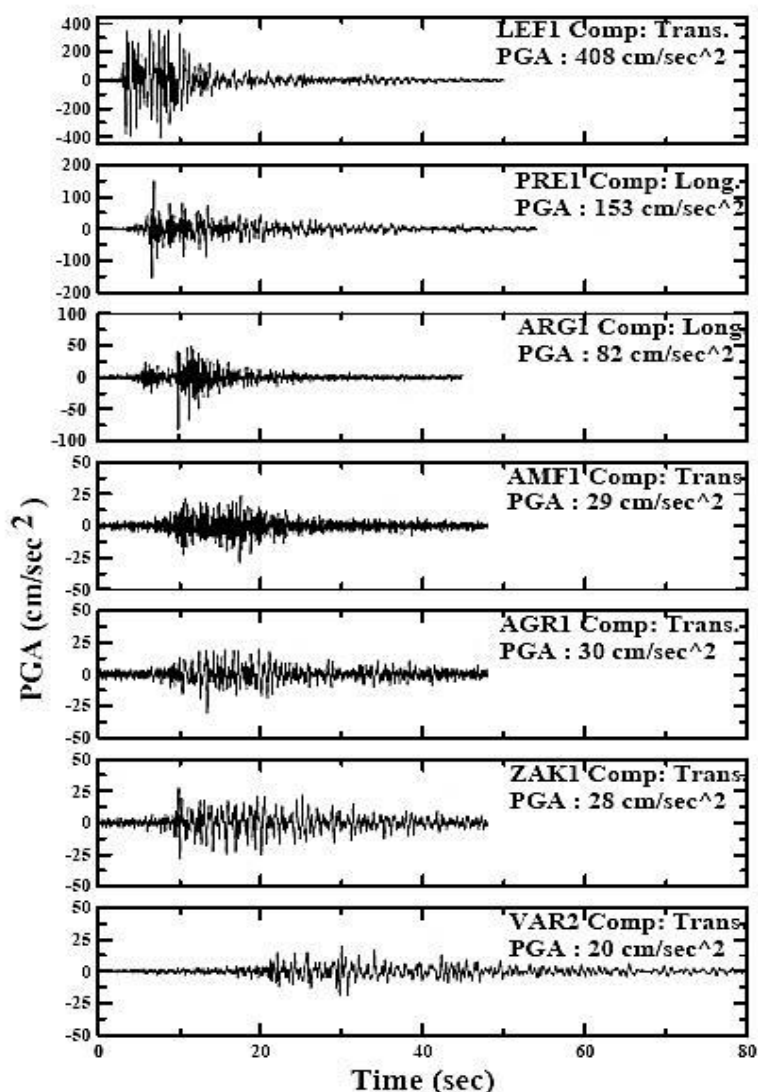
Το 1973 σημειώθηκε ισχυρός σεισμός κατά τον οποίο υπήρξε και η πρώτη καταγραφή επιταχυνσιογραφήματος στον Ελλαδικό χώρο (Gazetas et al., 2004). Το επίκεντρο ήταν 15 km βορειοδυτικά της πόλης και η εδαφική επιτάχυνση στην πόλη της Λευκάδας μετρήθηκε 0.54 g.

Στις 14 Αυγούστου 2003 έλαβε χώρα σεισμός με μέγεθος $M_w = 6.2$. Το επίκεντρο ήταν σε απόσταση περίπου 13 km από τη παλιά πόλη της Λευκάδας (Benetatos et al., 2005; Zahradnik et al., 2005; Papadimitriou P. et al., 2006; Benetatos et al., 2007). Τραυματίστηκαν περίπου 50 άνθρωποι αλλά δεν υπήρχαν νεκροί (Margaris et al. 2003). Η εδαφική κίνηση καταγράφηκε από σταθερό επιταχυνσιογράφο εγκατεστημένο στο δημόσιο νοσοκομείο της πόλης. Η μέγιστη επιτάχυνση μετρήθηκε 0.42g μεγαλύτερη από την αναμενόμενη από τον ΕΑΚ (Σχ.10) και η φασματική επιτάχυνση $S_a > 0.9g$ για περίοδο μεταξύ 0.2 και 0.7 s με δύο μέγιστες τιμές 1.7 στα 0.36 και 0.55 s σημαντικά ψηλότερες από τις τιμές που προβλέπονται στον ισχύοντα Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (Σχ. 10).



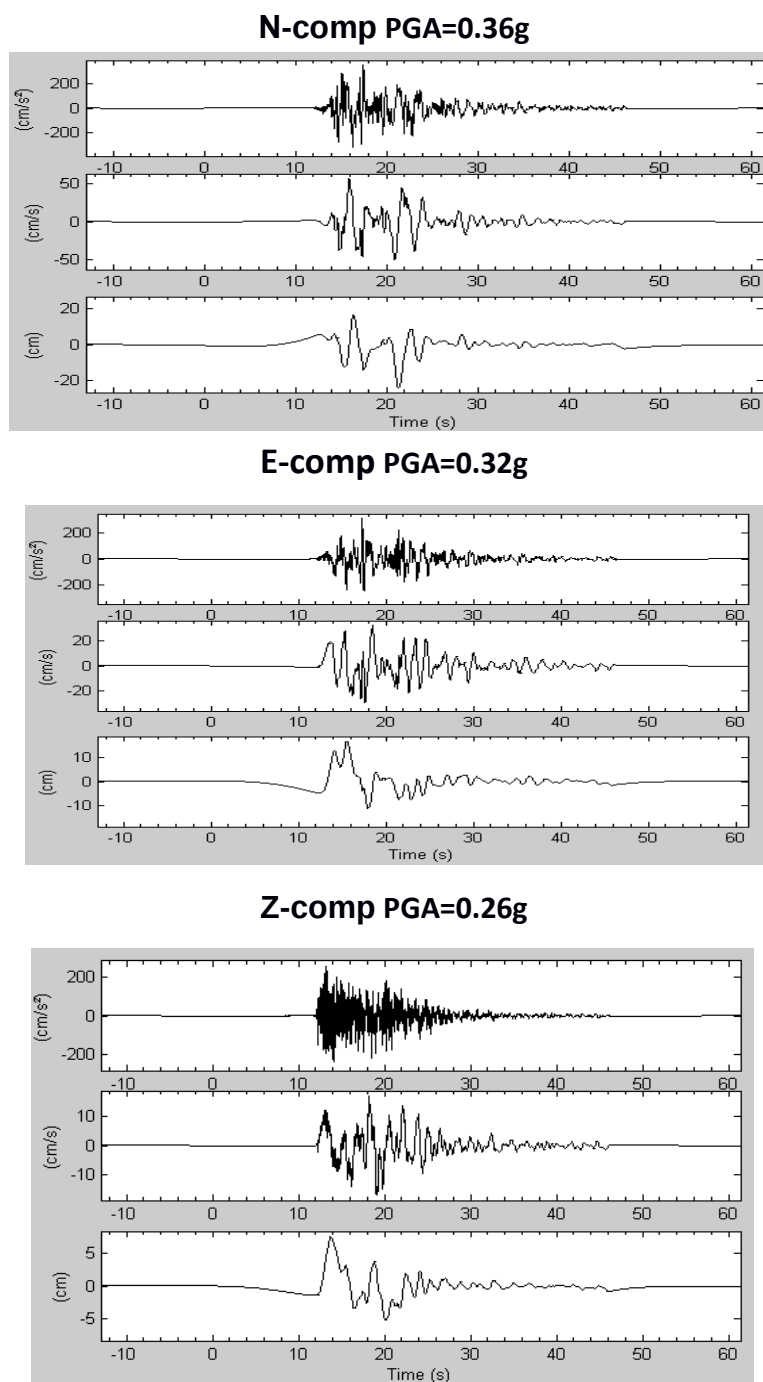
**Σχήμα 10 Φασματική επιτάχυνση στην πόλη της Λευκάδας κατά το
σεισμό του 2003 εν συγκρίσει με την μέγιστη επιτάχυνση που
καθορίζεται από τον αντισεισμικό κανονισμό για την συγκεκριμένη
κατηγορία εδάφους(ΙΤΣΑΚ, 2004)**

Στο σχήμα 11 δίνονται οι διορθωμένες συνιστώσες των κορυφαίων εδαφικών επιταχύνσεων των καταγραφών ισχυρής κίνησης του κύριου σεισμού σε διαφορετικές θέσεις: Λευκάδα (LEF1), Πρέβεζα (PRE1), Αμφιλοχία (AML1), Αγρίνιο (AGR1), Αργοστόλι (ARG1), Ζάκυνθο (ZAK1) και Βαρθολομιό (VAR2). Χαρακτηριστικό των καταγραφών είναι η μεγάλη διάρκεια της ισχυρής κίνησης του σεισμού.



Σχήμα 11 Οριζόντιες συνιστώσες των καταγραφών ισχυρής κίνησης του κύριου σεισμού της Λευκάδας στις 14 Αυγούστου 2003, σε διαφορετικούς σταθμούς, όπου εμφανίζεται η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση (Margaris et al. 2003)

Στις 17 Νοεμβρίου 2015 έλαβε χώρα σεισμός μεγέθους Mw 6.4 με επίκεντρο 20 km νότια της πόλης της Λευκάδας (Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών) πάνω στο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης Κεφαλονιάς-Λευκάδας με διεύθυνση N20±5°E (CTF, Σχήμα 6). Η μέγιστη επιτάχυνση μετρήθηκε 0,36g σε απόσταση 8 km από το επίκεντρο, στην Βασιλική (Σχ. 12)

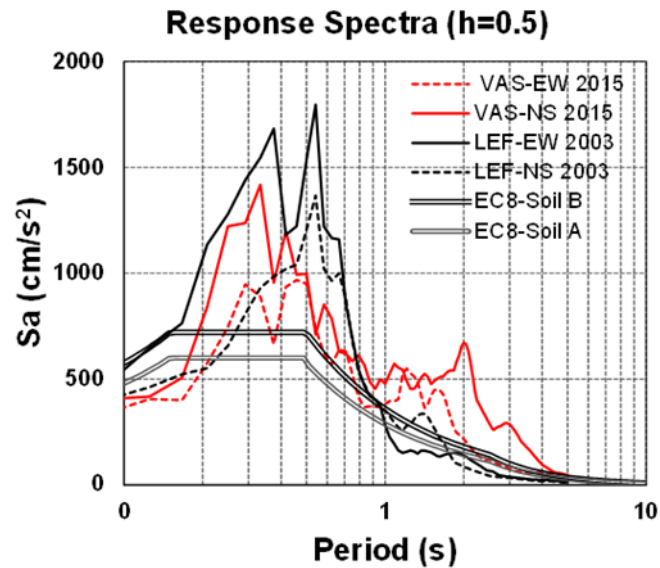


Σχήμα 12 Καταγραφές χρονοιστοριών (επιτάχυνση, ταχύτητα, μετατόπιση) του σεισμού της 17ης Νοεμβρίου 2015, από το σταθμό της Βασιλικής με επικεντρική απόσταση 8 km (ΙΤΣΑΚ, 2015)

Μελέτη της σεισμικότητας και των γεωδαιτικών δεδομένων υποδηλώνει ότι η επιφάνεια του ρήγματος βυθίζεται προς τα ανατολικά με μια γωνία περίπου 70° (Ganas et al., 2015). Το εστιακό βάθος προσδιορίστηκε στα 10 km. Μεγάλος αριθμός κατολισθήσεων και πτώσεις βράχων έλαβαν χώρα, κατά τη διάρκεια του κύριου σεισμού αλλά και της μετασεισμικής ακολουθίας, όπως ήδη αναφέρθηκε. Οι περιοχές που κυρίως επλήγησαν από αυτά τα φαινόμενα ήταν, στα ανατολικά τα χωριά Κομίλιο, Δράγανο και Αθάνι και στα δυτικά οι παραλιακές περιοχές από το Πόρτο Κασίκι έως τον Άγιο Νικήτα. Δύο άνθρωποι σκοτώθηκαν. Οι βλάβες σε κτίρια παρατηρούνται κυρίως σε χωριά στο νότιο τμήμα του νησιού.

Η τιμή της μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης στην πόλη της Λευκάδας (επικεντρική απόσταση 18 km) έφτασε περίπου 0.250g. Η πόλη δεν υπέστη ιδιαίτερες βλάβες. Περισσότερο αισθητός από τους κατοίκους της πόλης της Λευκάδας έγινε ο μετασεισμός που έλαβε χώρα στις 18 Νοεμβρίου (38.8N 20.6 E, M4.9, M_w 5) με μέγιστη εδαφική επιτάχυνση 0.3 g.

Συγκρίνοντας τις τιμές μέγιστης επιτάχυνσης του σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου 2003 στην πόλη της Λευκάδας και του σεισμού της 17^{ης} Νοεμβρίου 2015 στην Βασιλική διαπιστώνουμε ότι παρά το συγκριτικά μικρότερο μέγεθος και τη μεγαλύτερη επικεντρική απόσταση, η μέγιστη επιτάχυνση στην πόλη της Λευκάδας ήταν μεγαλύτερη (Σχ. 13), γεγονός που εξηγείται από την επίδραση της απόκρισης του εδάφους στην ισχυρή εδαφική κίνηση.



Σχήμα 13 Φασματική επιτάχυνση του σεισμού της 17^{ης} Νοεμβρίου 2015 (Σταθμός Βασιλικής- μαύρη γραμμή) εν συγκρίσει με τη φασματική επιτάχυνση του σεισμού της 14^{ης} Αυγούστου 2003. (Σταθμός Λευκάδα- κόκκινη γραμμή. (ΙΤΣΑΚ, 2015)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Χαρακτηριστικά κτιριακού αποθέματος

Η εκτίμηση της τρωτότητας των κτιρίων αποτελεί σημαντικό παράγοντα ενός σεισμικού μοντέλου. Για την εκτίμησή της είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τα χαρακτηριστικά των κτιρίων της περιοχής (δομικά, ιστορικά και άλλα). Σύμφωνα με έρευνες του Ευρωπαϊκού Κέντρου για την Πολιτιστική Κληρονομιά, η σεισμική επικινδυνότητα κάποιων περιοχών έχει διαμορφώσει τοπικές πρακτικές τρόπων δόμησης (Ferrigni et al., 1993). Τέτοια περίπτωση αποτελεί και η παλιά πόλη της Λευκάδας, όπου έμπειροι τεχνίτες έχουν εφαρμόσει αποτελεσματικές αντισεισμικές μεθόδους (Vintzileou et al., 2007). Η ιστορία του νησιού και η σεισμικότητά του συνετέλεσαν στην ανάπτυξη και εξέλιξη του δομικού συστήματος των κτιρίων της πόλης, η οποία έχει πληγεί περισσότερο από το υπόλοιπο νησί. Παρακάτω παρατίθεται σύντομη ιστορική αναδρομή της ιστορίας της πόλης και του παραδοσιακού τρόπου δόμησης των κτιρίων της.

5.1 Ιστορία του δομικού συστήματος της πόλης της Λευκάδας

Η ιστορία του νησιού της Λευκάδας και οι αλληπάλληλες σεισμικές καταστροφές έχουν συμβάλει στην εξέλιξη του μοναδικού στον Ελλαδικό χώρο δομικού συστήματός της, περίφημο στοιχείο της πολιτιστικής της κληρονομιάς. Πριν την άλωση της Πόλης η Λευκάδα ανήκε στο Δεσποτάτο της Ηπείρου και το 1300 περιήλθε στην Κομητεία Κεφαλληνίας και Ζακύνθου (Ροντογιάννης, 1995).

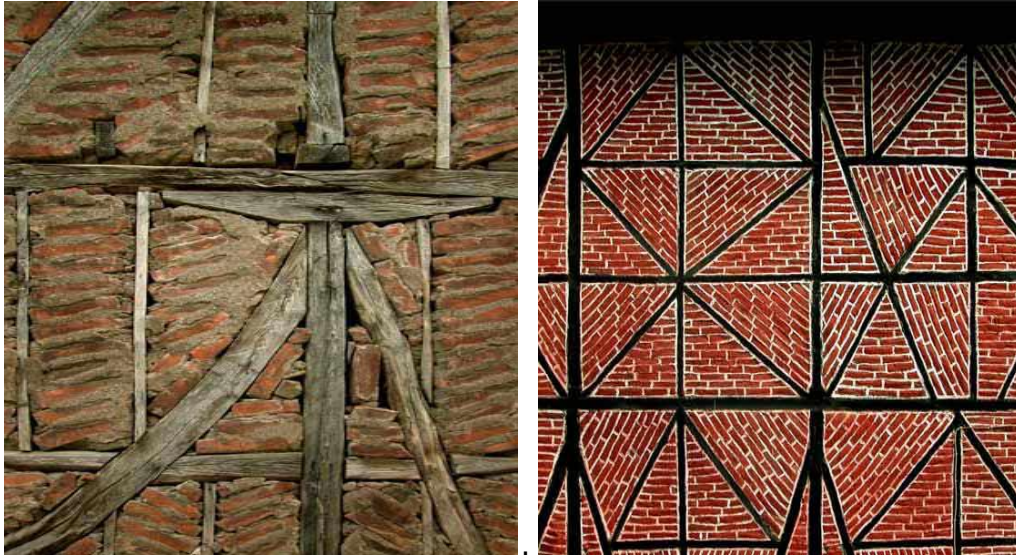
Το 1479 καταλαμβάνεται από τους Τούρκους. Ο πληθυσμός του νησιού μειώνεται δραματικά κατά τους επόμενους δυο αιώνες, γεγονός οφειλόμενο στη κακοδιοίκηση, τους σεισμούς, την πανώλη του 1644-1646 και τις πειρατικές επιδρομές. Το 1684 το νησί καταλαμβάνεται από τους Ενετούς παραμένοντας περίπου έναν αιώνα υπό την κατοχή τους. Κατά την περίοδο αυτή μεταφέρεται η πρωτεύουσα από το κάστρο της Αγίας Μαύρας, στη σημερινή της θέση (Κ. Μαχαιράς 1957). Το 1815, τα Ιόνια νησιά

καταλαμβάνονται από τους Άγγλους και τίθενται «υπό την προστασία» του βασιλιά της Αγγλίας έως το 1864, οπότε ενώνονται με την Ελλάδα.

Οι διαφορετικές επιδράσεις των κατακτητών στην τοπική αρχιτεκτονική της πόλης της Λευκάδας, καθώς και η σεισμική επικινδυνότητά της οδήγησαν στη δημιουργία αυτού του ιδιαίτερου τρόπου δόμησης. Το δομικό σύστημα της Λευκάδας έχει προκαλέσει το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας «Μηχανικοί της Ευρώπης». Το 1991, στο Πανεπιστημιακό Κέντρο για την Πολιτιστική Κληρονομιά του Συμβουλίου της Ευρώπης παρουσιάστηκε σεμινάριο με τίτλο «Les Cultures Seismiques Locales (Τοπικές Αντισεισμικές Τεχνικές)», όπου προβλήθηκε η αντιπροσωπευτική αντισεισμική τεχνοτροπία της πόλης (Vintzileou and Toulaitos, 2004).

Οι πρώτες αναφορές βλαβών ανάγονται στο 17ο αιώνα μετά το σεισμό του 1613. Σε προσωπικό του ημερολόγιο, ο παπάς Ζαμπέλιος αναφέρεται στο σεισμό του Οκτώβριου του 1613 γράφοντας: «Όσα σπίτια ήταν φτιαγμένα από ξύλο, τους έπεσαν τα κεραμίδια, αλλά εκείνα που ήταν φτιαγμένα από πέτρα, ρηγματώθηκαν από πάνω μέχρι κάτω» (Εθνικό Αρχείο, 1467-1957). Είχαν επομένως, από την εποχή της Τουρκοκρατίας, παρατηρήσει την καλύτερη σεισμική συμπεριφορά των ξύλινων σπιτιών. Οι Τούρκοι είχαν επίσης εμπειρία σεισμών. Υπάρχουν ξύλινα κτίρια εκείνης της περιόδου στην Τουρκία (Σχ.14) που θυμίζουν τα κτίρια της Λευκάδας (Karababa, 2007; Gülkan and Langenbach, 2004). Επίσης παρόμοια παραδοσιακά κτίρια έχουν παρατηρηθεί και στην περιοχή των Ιμαλαΐων (Langenbach, 2010) (Σχ.15).

Οι Ενετοί συνέχισαν τα κτίσματα με ξυλοδεσιά, τεχνική που υπήρχε άλλωστε και στη δική τους παράδοση (Makropoulos and Kouskouna, 1994). Σύμφωνα με τον Tobrinen (2008), μετά το σεισμό στην Καλαβρία το 1783, θεσπίστηκε στην περιοχή δομικό σύστημα που αποτελείται από ξύλινο σκελετό (Casa Baraccata: η λέξη Baraccata σημαίνει στρατώνας) (Σχ.16, 17). Όπως φαίνεται στα σχήματα 16 και 17 ο ξύλινος σκελετός έχει σχήμα Χ στην τοιχοποιία και πληρώνεται με άλλο υλικό. Ο τρόπος κατασκευής παρουσιάζει μεγάλη ομοιότητα με τα κτίρια της Λευκάδας.



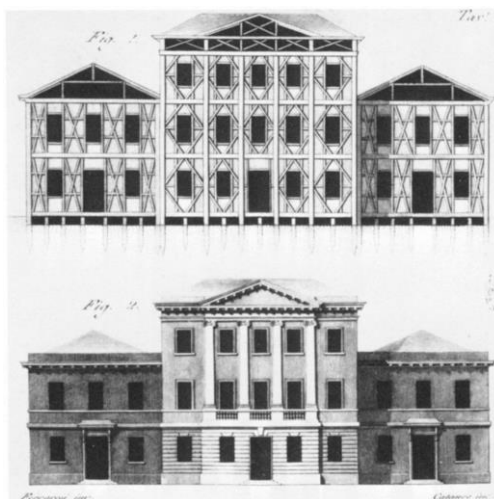
Σχήμα 14 Τμήμα από παραδοσιακές κατασκευές (Himisi) στην Τουρκία, οι οποίες αποκρίθηκαν καλά στο σεισμό του Düzce το 1999. Οι φωτογραφίες προέρχονται από άρθρο των Gülkan and Langenbach 2004.



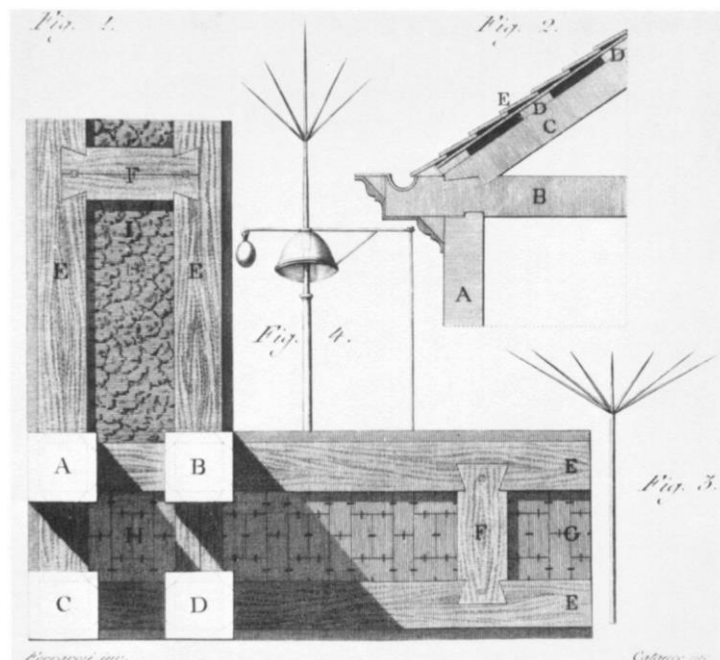
Σχήμα 15 Δείγμα μεικτών κατασκευών στο Κασμίρ. Κατά το σεισμό στις 21 Σεπτεμβρίου 2009 στο Μπουτάν έδειξαν καλύτερη σεισμική συμπεριφορά από τα σύγχρονα κτίρια (Langenbach, 2010)

Μετά το σεισμό του 1825, κατά τον οποίο καταστράφηκαν πολλά από τα λίθινα σπίτια, οι Άγγλοι κατακτητές πιθανόν διαπίστωσαν ότι κάποια σπίτια κτισμένα με τοπική τεχνική δόμησης παρουσίασαν καλύτερη αντισεισμική συμπεριφορά. Έτσι οργάνωσαν και συμπλήρωσαν αυτή την τεχνική και την συστηματοποίησαν σε κανονισμό. Θέσπισαν ένα σύστημα αντισεισμικής κατασκευής που λέγεται ποντελάρισμα. Πρόκειται για έναν εσωτερικό ξύλινο σκελετό, ο οποίος στηρίζει τους επάνω ορόφους (εφόσον υπάρχουν) και τη στέγη. Οι φέροντες τοίχοι του ισογείου είναι από λιθοδομή, ενώ οι τοίχοι των πάνω οροφών αποτελούνται από ξύλινο σκελετό που πληρούται με συμπαγή τούβλα και κονίαμα, ή λιθοδομή. Ο σκελετός εφάπτεται στους τοίχους, στατικά όμως είναι τελείως ανεξάρτητος (Αργυρού, 1971).

Σύμφωνα με τον Λεμπέση, Λευκαδίτη αρχιτέκτονα (Βιντζηλαίου et al., 2007), μετά το σεισμό του 1825, οι λιθοδομές που δεν κατέρρευσαν, επισκευάστηκαν μαζί με τις στέγες και αποδόθηκαν άμεσα για προσωρινή στέγαση. Στη συνέχεια προστέθηκε εσωτερικά των λιθοδομών ανεξάρτητος διώροφος και τριώροφος φέρων οργανισμός κατακόρυφων και οριζόντιων ξύλινων υποστυλωμάτων. Οι περιμετρικοί και εσωτερικοί τοίχοι των πρόσθετων ορόφων ήταν επίσης ξύλινοι. Το σύστημα αυτό εφαρμόστηκε μόνο στην πόλη της Λευκάδας. Σήμερα, σημαντικό ποσοστό των κτιρίων της πόλης είναι κτισμένα με αυτή τη μέθοδο.



Σχήμα 16 Σχέδιο κτιρίων στην κάτω Ιταλία του 18^ο αιώνα (Tobrinen, 1983).



Σχήμα 17 Λεπτομέρειες στην κατασκευή των παραπάνω κτιρίων (Tobrinen, 1983).

5.2 Απογραφή του δομικού ιστού της πόλης της Λευκάδας

Για την εκτίμηση της τρωτότητας των κτιρίων είναι απαραίτητη η λεπτομερής απογραφή του δομικού ιστού της υπό μελέτη περιοχής. Η απογραφή κτιρίων, που είχε πραγματοποιηθεί το 2001 από την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία και η χωρική τους αποτύπωση στα πλαίσια του ερευνητικού Έργου ΕΠΑΝΤΥΚ (2009), αποτέλεσαν τη βάση δεδομένων του δομικού αποθέματος της παλιάς πόλης.

Η παλιά πόλη της Λευκάδας γεωγραφικά διαχωρίζεται από την νέα πόλη στα δυτικά και βορειοδυτικά, από την οδό 8ης Μεραρχίας και νότια, από την οδό Ηρώων Πολυτεχνείου (πρώην Δημ. Γολέμη) (Σχ. 20). Με βάση την απογραφή των κτιρίων του 2001, τα κτίρια εκτός αυτών των ορίων είναι σχεδόν όλα κτισμένα μετά το 1946 και τα περισσότερα από αυτά μετά το 1961, σε αντίθεση με τα κτίρια στην παλιά πόλη, που τα περισσότερα έχουν κτιστεί από το 1945 έως το 1961 και λίγα ακόμη και πριν το 1919 (Karababa, 2007; ΕΠΑΝΤΥΚ, 2009). Η απογραφή των κτιρίων του 2001 ήταν πολύτιμη για την μελέτη του δομικού ιστού της πόλης πριν το σεισμό του 2003. Τα

περισσότερα κτίρια εκτός ορίων της παλιάς πόλης είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και απουσιάζουν από αυτά οι παραδοσιακοί τρόποι δόμησης.

Η παλιά πόλη της Λευκάδας αναπτύσσεται κατά μήκος ενός κεντρικού δρόμου, ο οποίος διασχίζει το εμπορικό κέντρο της πόλης. Οι περισσότεροι από τους υπόλοιπους δρόμους είναι κάθετοι σε αυτόν, με κατεύθυνση προς τη θάλασσα. Με αυτή τη ρυμοτομία, η υγρασία, τα βρόχινα νερά και τα λύματα αποχετεύονται στη θάλασσα. Επίσης οι επικρατούντες βόρειοι - βορειοδυτικοί άνεμοι διατρέχουν τους παράλληλους προς τη διεύθυνσή τους στενούς δρόμους, συμβάλλοντας στη μείωση της υγρασίας, καθοριστικό παράγοντα για τη συντήρηση των ξύλινων τμημάτων των κατασκευών.

Τα κτίρια της Λευκάδας είναι μέχρι τετραώροφα λόγω του ισχύοντος αντισεισμικού κανονισμού. Οι τύποι κτιρίων, με κριτήριο το δομικό υλικό τους, ποικίλουν. Τα κτίρια διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

1. Κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα,
2. Παραδοσιακά κτίρια, στα οποία συγκαταλέγονται:
 - A. Πέτρινα
 - B. Κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης, από λιθοδομή και με ξυλόπηκτη τοιχοποιία
 - Γ. Κτίρια ξύλινου σκελετού με πλήρωση οπτόπλινθων ή κονιάματος

3. Μνημειακά κτίρια

Για κάθε κτίριο της παλιάς πόλης καταγράφονται το υλικό κατασκευής (κτιρίου και στέγης), ο αριθμός των ορόφων, η περίοδος κατασκευής, η χρήση (κύρια ή δευτερεύουσα), η ύπαρξη ασταθούς ορόφου, αν εφάπτεται με τα γειτονικά κτίρια. Δεν αναφέρεται στην απογραφή η κατάσταση συντήρησης, απαραίτητη πληροφορία για την εκτίμηση της τρωτότητας. Επιπλέον, το μεγαλύτερο μειονέκτημα των διαθέσιμων δεδομένων είναι η έλλειψη σύνδεσης της θέσης κάθε κτιρίου με τα απογραφικά δεδομένα του. Έτσι μπορεί να προσδιοριστεί μόνο η μέση τρωτότητα κάθε οικοδομικού τετραγώνου, αλλά όχι του κάθε μεμονωμένου κτιρίου, γεγονός που απέχει από το στόχο της διατριβής. Επομένως, κρίθηκε απαραίτητη η ταυτοποίηση των μεμονωμένων κτιρίων

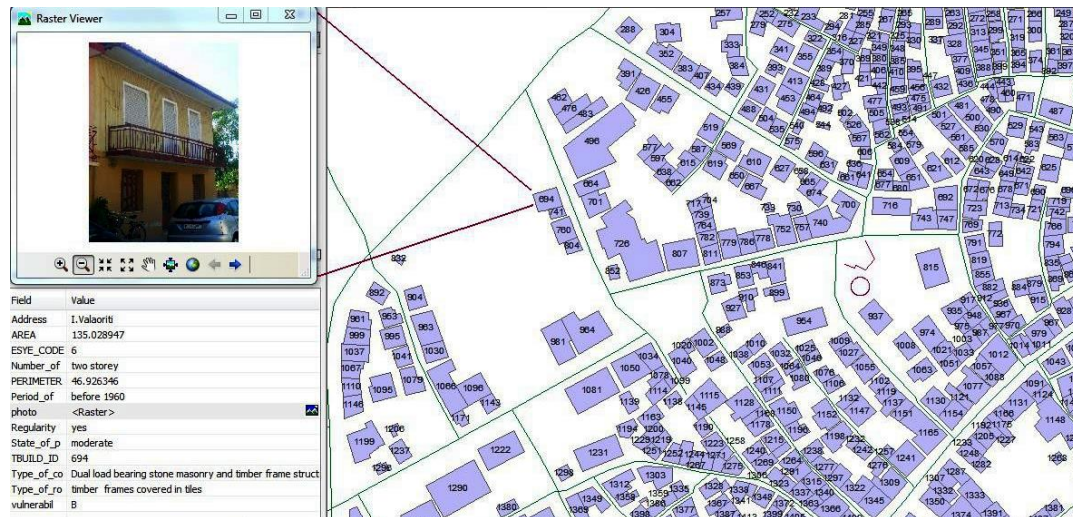
εντός του οικοδομικού ιστού αφενός, και η εκτίμηση της κατάστασης συντήρησης, αφετέρου.

Για την ταυτοποίηση της θέσης των κτιρίων χρησιμοποιήθηκαν αεροφωτογραφίες του Εθνικού Κτηματολογίου, όπου διακρίνονταν το είδος της οροφής και σε κάποιες περιπτώσεις το υλικό κατασκευής και η διαφορά ύψους μεταξύ κτιρίων. Αυτή η μέθοδος συνέβαλε στην ταυτοποίηση ικανού αριθμού κατασκευών, όχι όμως όλων. Η ταυτοποίηση ολοκληρώθηκε και η κατάσταση συντήρησης εκτιμήθηκε μέσω απογραφής των κτιρίων της παλιάς πόλης που πραγματοποιήσαμε τον Ιούλιο του 2012.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας στο πεδίο, καταγράφηκαν όλα τα κτίρια και επανελέγχθηκαν τα στοιχεία της αρχικής απογραφής. Κάθε κτίριο φωτογραφήθηκε και συνδέθηκε μέσω κωδικού αριθμού με τον ψηφιακό χάρτη της πόλης. Κατασκευάστηκε ψηφιακή πλατφόρμα GIS, όπου καταχωρήθηκαν τα δομικά και άλλα χαρακτηριστικά κάθε κτιρίου (Σχ.18), όπως και οι αντίστοιχες φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης (Σχ. 19). Αναλύθηκαν 1420 κτίρια

Shape *	AREA	PERIM	ESYE C	MUN N	id b	N phot	Address	Type of	Period of	Soft	Req	Type	Number	State	use	vulnerabi	phot
Polygon	107,22	41,850	22	ΛΕΥΚΑ	58	107502	M.Sikelia	Reinforc	1961-1994	yes	no	timbe	two store	high	private	C-D	<R
Polygon	97,767	39,917	22	ΛΕΥΚΑ	59	107531-	S.Panad	Reinforc	after 1995	yes	no	timbe	two store	high	private	D-E	<R
Polygon	41,644	26,265	24	ΛΕΥΚΑ	60	107554	P. & Stef	Dual load	1961-1994		yes	timbe	three stor	high	private	B-C	<R
Polygon	58,996	33,763	20	ΛΕΥΚΑ	61	107452	N.Kourti	Dual load	before 196	yes	no	timbe	two store	modera	private	A-B	<R
Polygon	55,061	31,662	19	ΛΕΥΚΑ	62	107450-	S.Flogait	Reinforc	1961-1994		yes	timbe	ground fl	modera	private	D	<R
Polygon	72,082	34,016	25	ΛΕΥΚΑ	63	107595-	Stefanit	Timber fr	1961-1994		yes	timbe	three stor	high	private	D	<R
Polygon	53,166	29,182	25	ΛΕΥΚΑ	64	107597-	Kontari	Dual load	before 196		yes	timbe	three stor	high	private	B-C	<R
Polygon	105,96	44,143	26	ΛΕΥΚΑ	65		Kontari	Dual load	before 196		yes	timbe	two store	low	private	A	<R
Polygon	93,768	39,237	26	ΛΕΥΚΑ	66		Sappho	Dual load	before 196		no	timbe	two store	high	private	B	<R
Polygon	64,950	32,337	27	ΛΕΥΚΑ	67		Penelop	Dual load	before 196		no	timbe	two store	high	private	B	<R
Polygon	94,828	39,704	17	ΛΕΥΚΑ	68	107413-	Efst.Kog	Dual load	before 196		yes	timbe	two store	modera	private	B	<R
Polygon	58,130	33,074	28	ΛΕΥΚΑ	69		Penelop	Dual load	before 196		yes	timbe	two store	modera	private	B	<R
Polygon	193,87	57,064	29	ΛΕΥΚΑ	70		A.Sikelia	Reinforc	1961-1994		yes	timbe	two store	modera	private	D	<R
Polygon	35,844	24,074	24	ΛΕΥΚΑ	71		P. Stefa	Timber fr	before 196		yes	timbe	ground fl	modera	private	C-D	<R
Polygon	79,666	46,142	29	ΛΕΥΚΑ	72		A.Sikelia	Dual load	1961-1994	yes	no	timbe	two store	high	private	B	<R
Polygon	159,86	52,995	16	ΛΕΥΚΑ	74	107384-	Soumila	Dual load	before 196		yes	timbe	three stor	modera	private	B	<R
Polygon	144,78	48,737	14	ΛΕΥΚΑ	75	107332-	Efst.Filip	Reinforc	1961-1994	yes	no	timbe	four store	high	private	C-D	<R
Polygon	455,50	86,559	29	ΛΕΥΚΑ	76		A.Sikelia	Reinforc	1961-1994	yes	no	conc	two store	high	private	C-D	<R
Polygon	94,789	40,123	13	ΛΕΥΚΑ	77	101110	26.Amaxi	Reinforc	after 1995		yes	timbe	three stor	high	private	E	<R
Polygon	57,261	35,325	22	ΛΕΥΚΑ	78	107503	M.Sikelia	Reinforc	before 196		yes	timbe	two store	modera	private	C	<R
Polygon	106,66	42,046	20	ΛΕΥΚΑ	79	107454-	AG.PAR	Dual load	before 196		yes	timbe	two store	modera	private	B	<R
Polygon	20,724	20,990	19	ΛΕΥΚΑ	81	107449	S.Flogait	Timber fr	before 196		yes	timbe	ground fl	low	private	A	<R
Polygon	51,409	28,931	21	ΛΕΥΚΑ	82	107499	St. Para	Reinforc	1961-1994		no	timbe	two store	modera	private	C-D	<R
Polygon	58,165	32,947	23	ΛΕΥΚΑ	83	107533-	Ang.Sik	Dual load	before 196		yes	timbe	two store	modera	private	B	<R
Polygon	79,538	35,746	25	ΛΕΥΚΑ	84	107590	P. Stefa	Dual load	before 196		yes	timbe	two store	modera	private	B	<R
Polygon	89,895	39,085	27	ΛΕΥΚΑ	85		Sappho	Timber fr	1961-1994		no	timbe	three stor	high	private	C-D	<R
Polygon	62,877	31,812	27	ΛΕΥΚΑ	86		Penelop	Reinforc	1961-1994	yes	no	timbe	two store	high	private	C-D	<R
Polygon	152,34	49,467	11	ΛΕΥΚΑ	89	101102	25.Ama	Timber fr	1961-1994		yes	timbe	three stor	modera	private	C-D	<R
Polygon	16,426	16,544	11	ΛΕΥΚΑ	90	101103	Ang.Sik	Dual load	1961-1994		yes	timbe	two store	high	private	B-C	<R
Polygon	88,388	37,536	11	ΛΕΥΚΑ	92	10182	Ang.Sik	Load- be	1961-1994		yes	timbe	ground fl	high	private	B	<R
Polygon	81,945	36,290	22	ΛΕΥΚΑ	93	107505-	M.Sikelia	Reinforc	1961-1994		yes	conc	ground fl	modera	private	D	<R

Σχήμα 18 Τμήμα του πίνακα απογραφής των κτιρίων



Σχήμα 19 Απόκομμα χάρτη και παράδειγμα απεικόνισης της πλατφόρμας πληροφόρησης των κτηρίων της πόλης



Σχήμα 20 Πολεοδομικός χάρτης της Λευκάδας

Συμπληρωματικά της απογραφής του 2012, τον Σεπτέμβριο του 2014 έλαβε χώρα δεύτερη επιτόπια έρευνα κατά την οποία επιβεβαιώθηκαν οι θέσεις των

κτιρίων που υπέστησαν βλάβη κατά το σεισμό του 2003, αποτυπώθηκαν κάποια κτίρια των οποίων τα στοιχεία ήταν ανεπαρκή και αποκτήθηκαν τα αναλυτικά στοιχεία βλαβών κατά το σεισμό του 2003 από την Υπηρεσία Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων (ΥΑΣ). Τα τελικά αποτελέσματα της απογραφής του κτηριακού αποθέματος της παλιάς πόλης παρουσιάζονται στη συνέχεια.

5.2.1 Κτήρια από οπλισμένο σκυρόδεμα

Τα κτήρια της πρώτης κατηγορίας αποτελούνται από κολόνες και πλάκες από οπλισμένο σκυρόδεμα, όπου οι τοίχοι έχουν πληρωθεί με τούβλα (Karababa and Pomonis, 2011). Ανάλογα με την περίοδο κατασκευής, μπορεί να εμφανίζουν δομικές διαφορές εξαιτίας των πολλαπλών αναθεωρήσεων του σεισμικού κώδικα. Οι στέγες σε κάποια κτίρια είναι κατασκευασμένες από ξύλινο σκελετό καλυμμένο από κεραμίδια (Σχ.21, 23), αλλά συνήθως είναι πλάκες από σκυρόδεμα (Σχ.22, 24).

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν 543 από τα 1420 κτίρια της παλιάς πόλης, ποσοστό που κυμαίνεται περίπου στο 38% των κτισμάτων. Τα περισσότερα έχουν κατασκευαστεί την χρονική περίοδο 1961-1985, λίγα έχουν κατασκευαστεί πριν το 1960 ενώ υπάρχουν και κτίρια κατασκευασμένα μετά το σεισμό του 2003. Τα κτίρια είναι στην πλειοψηφία τους διώροφα (62,8%) με αριθμητικά λιγότερα τα τετραώροφα. Στην πόλη της Λευκάδας σπάνια συναντάμε κτίρια με πυλωτή (ανοιχτό χώρο στάθμευσης), πρακτική που είναι πολύ συνηθισμένη στην υπόλοιπη Ελλάδα.

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν και κτίρια που, ενώ το ισόγειο και σε μερικές περιπτώσεις και ο πρώτος όροφος είναι κατασκευασμένα από σκυρόδεμα, ο επάνω όροφος (ή όροφοι), είναι κατασκευασμένος από ξυλόπηκτη τοιχοποιία. Η ξυλόπηκτη τοιχοποιία έχει τα χαρακτηριστικά του παραδοσιακού τρόπου δόμησης, αποτελείται δηλαδή από ξύλινο σκελετό και τα κενά ανάμεσα στα ξύλα γεμίζουν με συμπαγή τούβλα και κονίαμα ή λιθοδομή. Σε κάποιες περιπτώσεις οι τοίχοι είναι μόνο από ξύλο. Η εσωτερική πλευρά επιχρίεται πλήρως, ενώ στην εξωτερική επιχρίονται μόνο τα τούβλινα μέρη, ώστε ν' «αναπνέουν» τα ξύλα αποδιώχνοντας την μεγάλη υγρασία του νησιού.



Σχήμα 21 Ισόγειο κτήριο από σκυρόδεμα με κεραμοσκεπή. (Καλαντώνη και Παύλου 14-7-2012)



Σχήμα 22 Διώροφο κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα με οροφή πλάκα από σκυρόδεμα. (Καλαντώνη και Παύλου 14-7-2012)



Σχήμα 23 Νεόκτιστο κτίριο (μετά το 2003) από οπλισμένο σκυρόδεμα με στέγη από κεραμίδια. (Καλαντώνη και Παύλου 14-7-2012)



Σχήμα 24 Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα κτισμένο πριν το 1960 (Καλαντώνη και Παύλου 12-7-2012)

Για λόγους προστασίας των ξύλινων στοιχείων από την υγρασία, οι ανώτεροι όροφοι είναι καλυμμένοι με σανίδες (Σχ. 25), εκτός των περιπτώσεων που, αφού από τον χρόνο και την υγρασία αυτές καταστράφηκαν, αντικαταστάθηκαν στην πορεία με επίπεδες ή κυματοειδείς λαμαρίνες. Καταμετρήθηκαν 126 κτίρια από τα 543 να ανήκουν στη συγκεκριμένη

υποκατηγορία. Το μεγαλύτερο ποσοστό έχει κτιστεί κατά την περίοδο 1960 - 1985, ενώ διαπιστώθηκε κατά την επιτόπια έρευνα, ότι και σήμερα κατασκευάζονται συμπληρωματικοί όροφοι στα υπάρχοντα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα (Σχ. 26). Οι όροφοι αυτοί δεν επιβαρύνουν στατικά το κτίριο όσο ένας επιπλέον όροφος από οπλισμένο σκυρόδεμα.



Σχήμα 25 Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα με όροφο από ξυλόπηκτη τοιχοποιία (Καλαντώνη και Παύλου 15-7-2012)



Σχήμα 26 Κατασκευή συμπληρωματικών ορόφων από ξυλόπηκτη τοιχοποιία. (Καλαντώνη 9-9-2014)

5.2.2 Παραδοσιακά κτίρια

Αποτελούν την πλειοψηφία των κτιρίων της παλιάς πόλης και χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

5.2.2.1 Πέτρινα (Λιθοδομή)

Η φέρουσα τοιχοποιία είναι από λιθοδομή. Αποτελούν το 7.4% των κτισμάτων, ήτοι 105 κτίρια. Έχουν ύψος περίπου 3 m και πάχος που ποικίλει από 60 cm έως 1 m. Η εξωτερική παρειά αποτελείται από μεγάλες πελεκητές πέτρες, συνήθως ασβεστολιθικές, ενώ για την εσωτερική παρειά χρησιμοποιούνται απελέκητες πέτρες. Το κενό μεταξύ εσωτερικής και εξωτερικής παρειάς γεμίζεται με σπασμένα κεραμίδια, μικρές πέτρες, κομμάτια από τούβλα και κονίαμα (Παπαδάτου Γιαννοπούλου, 1999) (Σχ. 27). Την εποχή των Ενετών το κονίαμα ήταν η επονομαζόμενη «πορτοσολάνα», η αντοχή της οποίας ήταν μεγάλη. Αργότερα χρησιμοποιήθηκε ασβεστοκονίαμα και σε φτηνότερες κατασκευές πηλοκονίαμα (Τουλιάτος και Γαντέ, 1995).

Τα πατώματα και οι στέγες είναι από ξύλο, οι τελευταίες επικαλύπτονται από κεραμίδια. Τα κτίρια από λιθοδομή είναι κυρίως ισόγεια κτίσματα μέσα στην πόλη, μικρού μεγέθους και με κανονικό σχήμα, ανθεκτικά, εξαιτίας αυτών των γνωρισμάτων τους, στους σεισμούς. Τα περισσότερα έχουν κτιστεί πριν το 1960 (Σχ. 28), ενώ λιγότερα από το ένα τέταρτο των κτιρίων έχουν κτιστεί μεταξύ 1961 και 1994. Η συντήρηση των κτιρίων είναι σημαντικός παράγοντας για την εκτίμηση της τρωτότητάς τους. Σημειωτέον ότι, όσα κτίσματα έχουν κατασκευαστεί πριν το 1948, έχουν υποστεί το μεγάλο σεισμό του εν λόγω έτους.

5.2.2.2 Κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης από λιθοδομή με ξυλόπηκτη τοιχοποιία (ποντελάρισμα)

Το σύστημα αυτό ονομάζεται στην τοπική διάλεκτο «ποντέλο». Πρόκειται, όπως έχει αναφερθεί, για μοναδικό τρόπο δόμησης. Αποτελούν το 44.35% των κτιρίων της παλιάς πόλης (629 κτίρια). Τα περισσότερα (78.53%), έχουν

κτιστεί πριν το 1960 και όλα σχεδόν τα υπόλοιπα κατά τη χρονική περίοδο 1961-1993, ενώ η τεχνική αυτή εφαρμόζεται και σήμερα (Σχ. 29).



Σχήμα 27 Πέτρινα μονώροφα κτίρια, καλά συντηρημένα. (Καλαντώνη και Παύλου 9-7-2012)



Σχήμα 28 Πέτρινο μονώροφο κτίριο, κτισμένο πριν το 1960 με κακή συντήρηση (Καλαντώνη και Παύλου 11-7-2012)

Στο ισόγειο η φέρουσα τοιχοποιία είναι λιθοδομή. Ο ξύλινος σκελετός των υπερκείμενων ορόφων στηρίζεται στους τοίχους μέσω ξύλινων στρωτήρων, οι οποίοι κτίζονται μέσα στον τοίχο και περιτρέχουν το περίγραμμα των λίθων (ΟΑΣΠ, 2007). Ένας βοηθητικός, φέρων οργανισμός από αραιά διατεταγμένα ξύλινα υποστυλώματα βρίσκεται ακριβώς πίσω από την εξωτερική λιθοδομή και παράλληλα με αυτή. Υποβαστάζει μαζί με την λιθοδομή τους υπερκείμενους ορόφους. Οι περιβάλλοντες τοίχοι του ορόφου κατασκευάζονται πάνω στα δοκάρια του πατώματος. Κατασκευάζεται δηλαδή ένα ξύλινο πλέγμα, όπου τα κενά ανάμεσα στα ξύλα πληρώνονται με συμπαγή τούβλα και κονίαμα ή λιθοδομή. Στα περισσότερα κτίρια η επένδυση των εξωτερικών όψεων αποτελείται από φύλλα λαμαρίνας και σπάνια επιχρίεται σε αντίθεση με την εσωτερική πλευρά.

Η θεμελίωση των κτιρίων δεν είναι εύκολο να διαπιστωθεί, παρόλο που φυσικά παίζει σημαντικό ρόλο στην σεισμική συμπεριφορά τους. Από τις περιγραφές των κατοίκων μόνο γνωρίζουμε ότι πρόκειται για ένα σύστημα σχάρας, το οποίο αποτελείται από κορμούς δέντρων τοποθετημένων σε επάλληλες στρώσεις πάχους 0.7 έως 1 μέτρου. Τα κενά ανάμεσα στα ξύλα γεμίζονται με άμμο, απελέκητες πέτρες και 'πορτσολάνα'. Τα πατώματα και οι στέγες είναι ξύλινα, ενώ οι τελευταίες έχουν επιστρωθεί με κεραμίδια (Σχ. 30).



**Σχήμα 29 Κτίριο με διπλό τρόπο δόμησης που κτιζόταν το 2012.
(Καλαντώνη και Παύλου 14-7-2012)**



**Σχήμα 30 Διώροφο κτίριο με ποντελάρισμα. Φαίνεται καθαρά ο ξύλινος
σκελετός. (Καλαντώνη και Παύλου 10-7-2012)**

Κυρίως χρησιμοποιούνται σαν κατοικίες. Σε κάποια από αυτά, τα ισόγεια έχουν μετατραπεί σε καταστήματα, με διεύρυνση των ανοιγμάτων των εξωτερικών τοίχων και γκρέμισμα των εσωτερικών (Σχ. 31, 32). Η συντήρησή τους ποικίλει. Αφορά κυρίως τα ξύλινα στοιχεία που είναι πιο ευάλωτα στα αυξημένα ποσοστά υγρασίας της πόλης (Σχ. 33).



Σχήμα 31 Κτίριο από ποντελάρισμα που το ισόγειο έχει μετατραπεί σε κατάστημα (Καλαντώνη και Παύλου 9-7-2012)

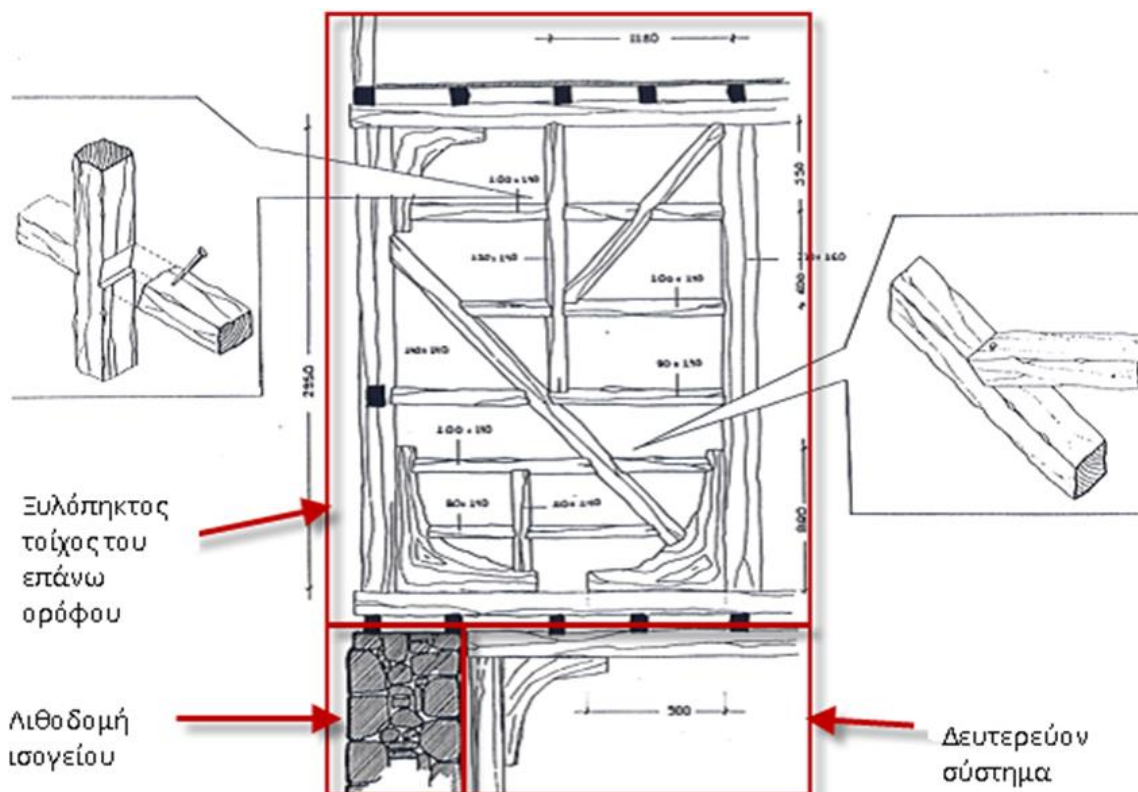


Σχήμα 32. Κτίριο με διπλό τρόπο δόμησης με καλή συντήρηση (Καλαντώνη και Παύλου 9-7-2012)



**Σχήμα 33 Κτίριο με διπλό τρόπο δόμησης με κακή συντήρηση
(Καλαντώνη και Παύλου 13-7-2012)**

Στο σχήμα 34 φαίνεται σε τομή αυτό το διπλό σύστημα (Κουρής – Κάππος, 2013)



Σχήμα 34 Τυπικό πλέξιμο των ξύλινων στοιχείων σε εξωτερικό φέροντα ξυλόπηκτο τοίχο (Κουρής-Κάππος, 2013)

5.2.2.3 Ξύλινα Κτίρια

Αποτελούν το 10% των κτιρίων της παλιάς πόλης. Τα κτίρια αποτελούνται από ξύλινο σκελετό. Τα βασικά μέρη του κτιρίου κατασκευάζονται από δρυ. Για τις γωνιακές συνδέσεις είναι προτιμότερο το ξύλο από ελιές λόγω της φυσικής ευκαμψίας τους. Τα ξύλα προέρχονται κυρίως από τη Σκανδιναβία, Ρωσία και τις Βαλκανικές χώρες. Τα κενά μεταξύ των ξύλων πληρώνονται με οπτόπλινθους ή κονίαμα (Καραμπίνης et al., 2006). Εξωτερικά οι τοίχοι καλύπτονται από φύλλα λαμαρίνας, ώστε να προφυλάσσονται τα ξύλα από την υγρασία. Οι σκεπές αποτελούνται από ξύλινο σκελετό με κεραμίδια ή άλλα φύλλα επικάλυψης. Στην πλειοψηφία τους είναι κτισμένα πριν το 1960. Πρόκειται για κτίρια καλά συντηρημένα (Σχ.35) ενώ υπάρχουν και κάποια ερειπωμένα (Σχ.36).



Σχήμα 35 Ξύλινο κτίρια ισόγειο με καλή συντήρηση (Καλαντώνη και Παύλου 11-7-2012)



Σχήμα 36 Ξύλινο κτίριο με κακή συντήρηση. (Καλαντώνη και Παύλου 11-7-2012)

5.2.3 Μνημειακά κτίρια

Τα μνημειακά κτίρια της παλιάς πόλης της Λευκάδας είναι οι εκκλησίες της. Είναι σημαντικά ιστορικά κτίρια και η ιστορία της κατασκευής τους είναι συνδεδεμένη με αυτήν της πόλης. Μέχρι το 1684 η μόνη εκκλησία ήταν αυτή των Αγίων Τιμοθέου και Μαύρας, στο φρούριο της Αγ. Μαύρας, το οποίο οι Τούρκοι μετέτρεψαν σε τζαμί. Όταν το 1684 το νησί περιήλθε στα χέρια των Ενετών, δόθηκαν οι πρώτες άδειες σε ορθόδοξες αδελφότητες να κτίσουν εκκλησίες.

Οι πρώτες εκκλησίες είχαν μικρή αντισεισμική συμπεριφορά και ισοπεδώθηκαν με τον πρώτο σεισμό μετά το χτίσιμό τους, αλλά ξαναχτίστηκαν αμέσως μετά. Από συμβόλαιο - συμφωνητικό μεταξύ των επιτρόπων της εκκλησίας του Αγ. Χαραλάμπους και των μαστόρων που ανέλαβαν την επισκευή της το 1818, βρίσκουμε στοιχεία για τον τρόπο και τα υλικά κατασκευής (Argyrou et al. 1971). Η εκκλησία κτίζεται από τα θεμέλια με βάσεις από κυβικούς λίθους (τζόκολον), σύμφωνα με αποδεδειγμένο σχέδιο.

Οι ναοί που συναντάμε σήμερα έχουν ανοικοδομηθεί από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα (Μαχαίρας, 1957). Στην πλειοψηφία τους είναι βασιλικού ρυθμού, δηλαδή παραλληλόγραμμα κτίρια (ορθογωνική κάτοψη) από λιθόκτιστη, περιμετρική τοιχοποιία, με ξύλινη στέγη, η οποία καταλήγει ανατολικά σε ημικύκλιο που καλείται «κόγχη». Το άνοιγμα της κόγχης είναι περίπου ίσο με αυτό της εισόδου στη δυτική όψη. Το σχήμα των ναών (παραλληλόγραμμα με ίσα ανοίγματα στην ανατολική και τη δυτική όψη) (Σχ. 37) προδιαγράφει σχεδόν απόλυτη συμμετρία στην κάτοψη, με αποτέλεσμα τον περιορισμό της ανάπτυξης στροφικής ταλάντωσης. Αυτό βοηθά στον περιορισμό των βλαβών. Από στοιχεία της Υπηρεσίας Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων Λευκάδας για το σεισμό του 2003 προκύπτει ότι οι περισσότερες από τις εκκλησίες υπέστησαν σοβαρές ζημιές, ταξινομήθηκαν με το χαρακτηρισμό «κίτρινες» και τέθηκαν εκτός λειτουργίας μέχρι να επισκευαστούν (Σχ.38). Οι σοβαρότερες βλάβες παρατηρήθηκαν στους πλευρικούς τοίχους και στις γωνίες συμβολής δυο εγκάρσιων τοίχων, όπως και στο σεισμό του 1948 (M=6.5). (Σχ. 39). Μερικοί χρειάστηκαν άμεση τοπική υποστήριξη για την αποφυγή κατάρρευσης.

5.3 Σύνοψη ταξινόμησης κτιριακού αποθέματος

Συνοψίζοντας, τα περισσότερα κτίρια έχουν ανεγερθεί βάσει του παραδοσιακού τρόπου δόμησης και ειδικότερα, με το «διπλό τρόπο» (ποντελάρισμα) (Σχ. 40). Τα κτίρια αυτά καθώς και τα πέτρινα και τα ξύλινα έχουν κατασκευαστεί κυρίως πριν το 1960, ενώ τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα κατά τη περίοδο 1961-1994 (Σχ. 41). Στην πλειοψηφία τους τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα (Σχ. 42) και ποντελάρισμα είναι διώροφα, όπως δεν υπάρχουν κτίρια με περισσότερους από 4 ορόφους (Σχ. 43). Τα πέτρινα κτίρια είναι κυρίως ισόγεια ενώ τα ξύλινα είναι ισόγεια ή διώροφα και σπανιότερα τριώροφα. Είναι κυρίως κατοικίες, με λίγες εξαιρέσεις δημοσίων κτιρίων και εκκλησιών (Σχ. 45).



Σχήμα 37 Κατανομή των εκκλησιών στην παλιά πόλη.



Σχήμα 38 Εκκλησία του Αγ. Γεωργίου, η οποία έχει υποστεί βλάβη κατά το σεισμό του 2003 και δεν έχει επισκευασθεί



(A)

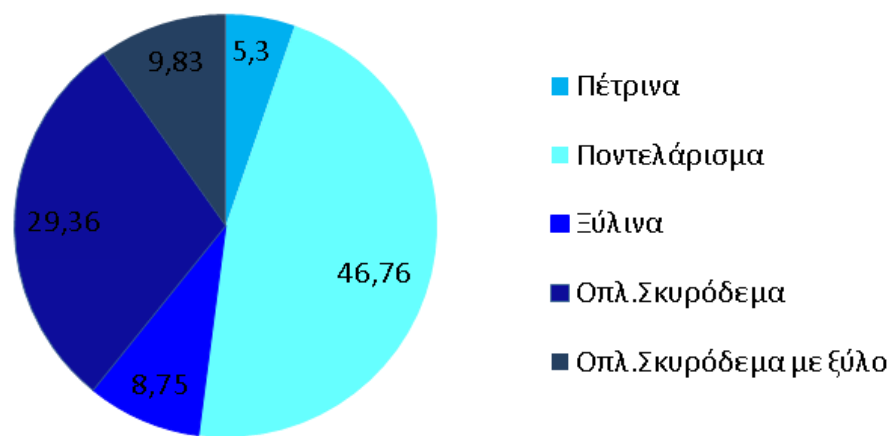


(B)

Σχήμα 39 Η εκκλησία της Παναγίας των Ξένων (A) κατά την απογραφή του 2012 (Καλαντώνη και Παύλου 9-7-2012) (B) μετά το σεισμό του 1948. (Αρχείο της Ιεράς Μητρόπολης Λευκάδας και Ιθάκης-προσωπικό αρχείο του μακαριστού Μητροπολίτη Λευκάδος και Ιθάκης Δωρόθεου)

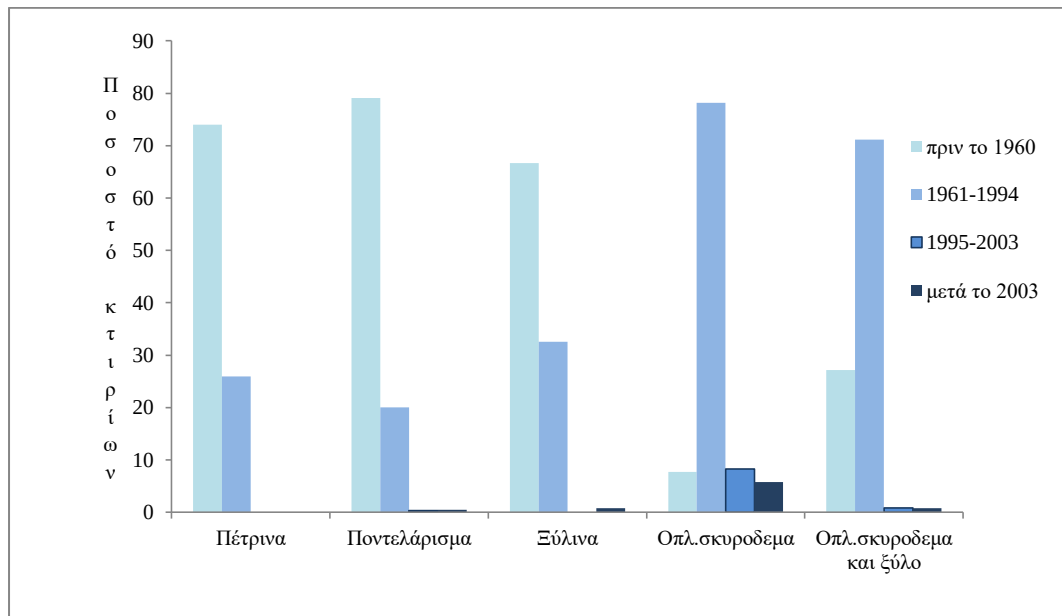


(A)

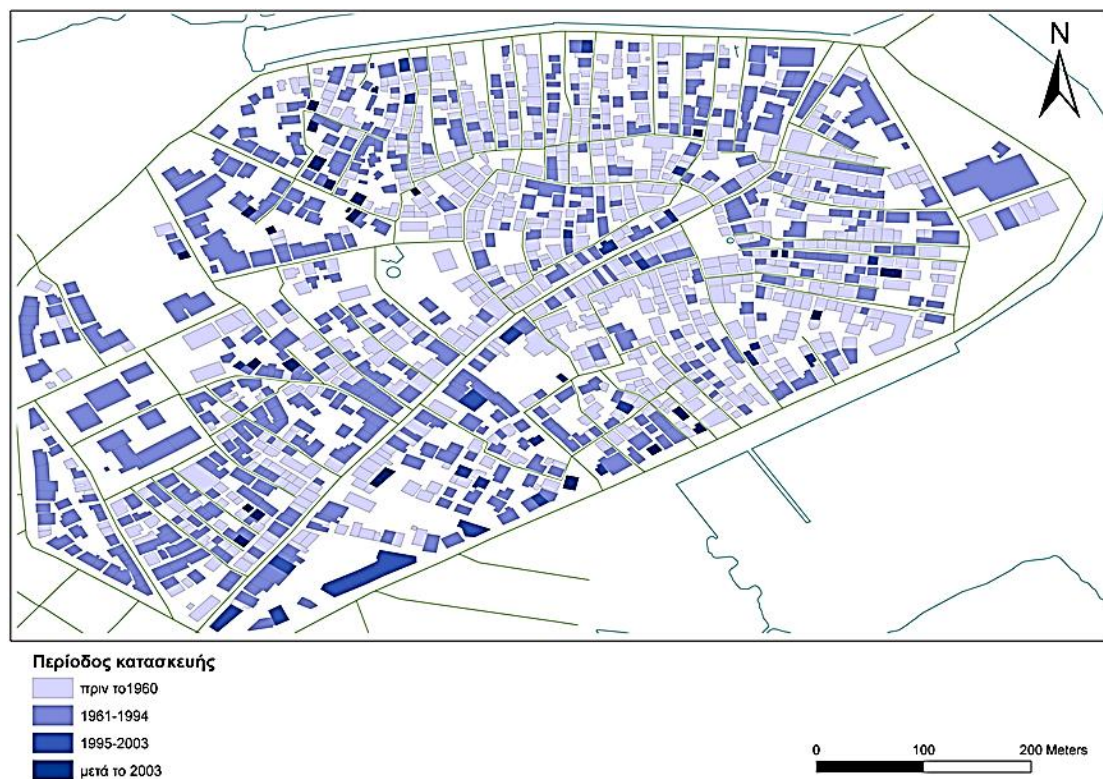


(B)

Σχήμα 40 Χωροταξική (A) και στατιστική (B) κατανομή των κτιρίων σύμφωνα με το υλικό κατασκευής



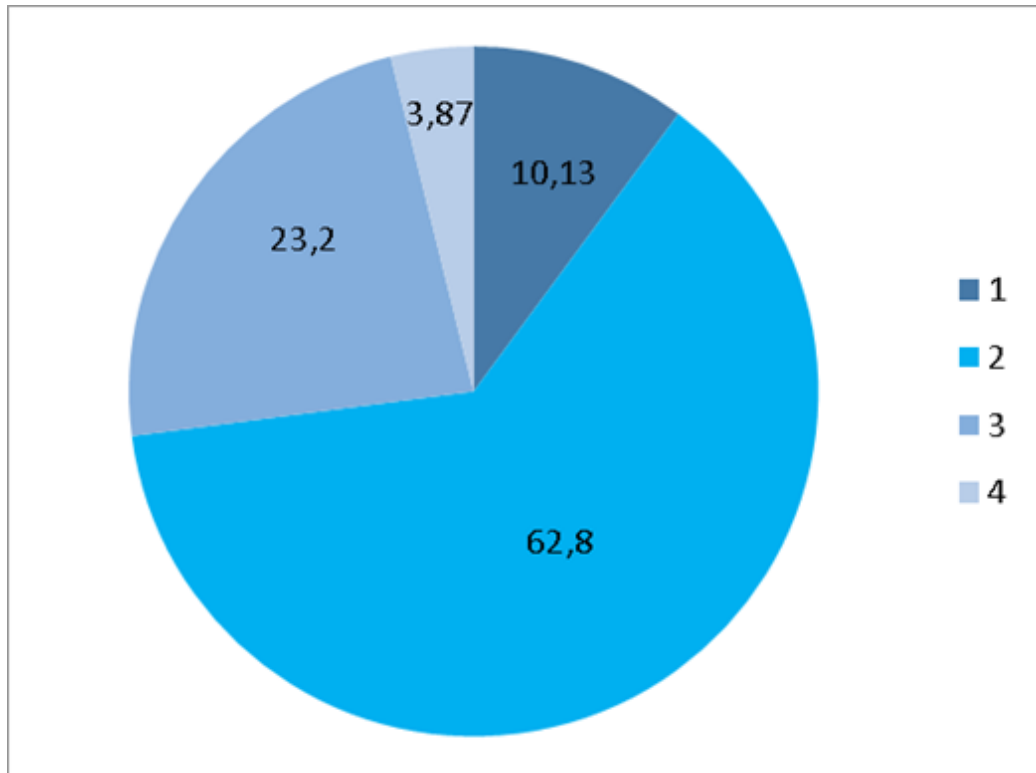
(A)



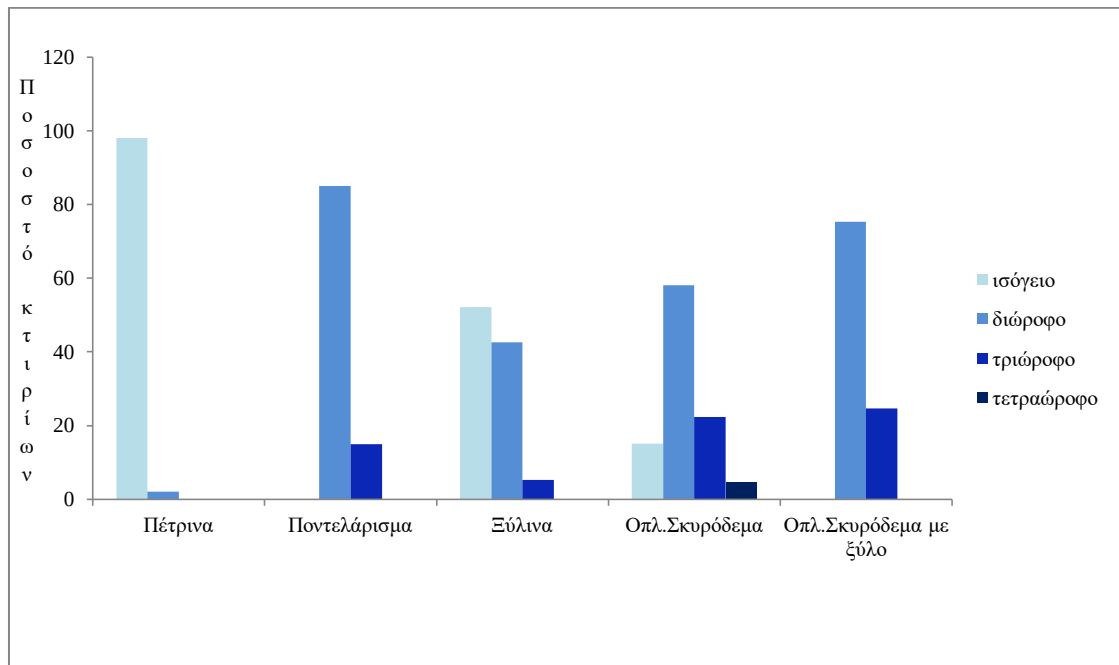
(B)

Σχήμα 41 Στατιστική (A) και χωροταξική (B) κατανομή των κτιρίων σύμφωνα με την περίοδο κατασκευής κατά το υλικό δόμησης

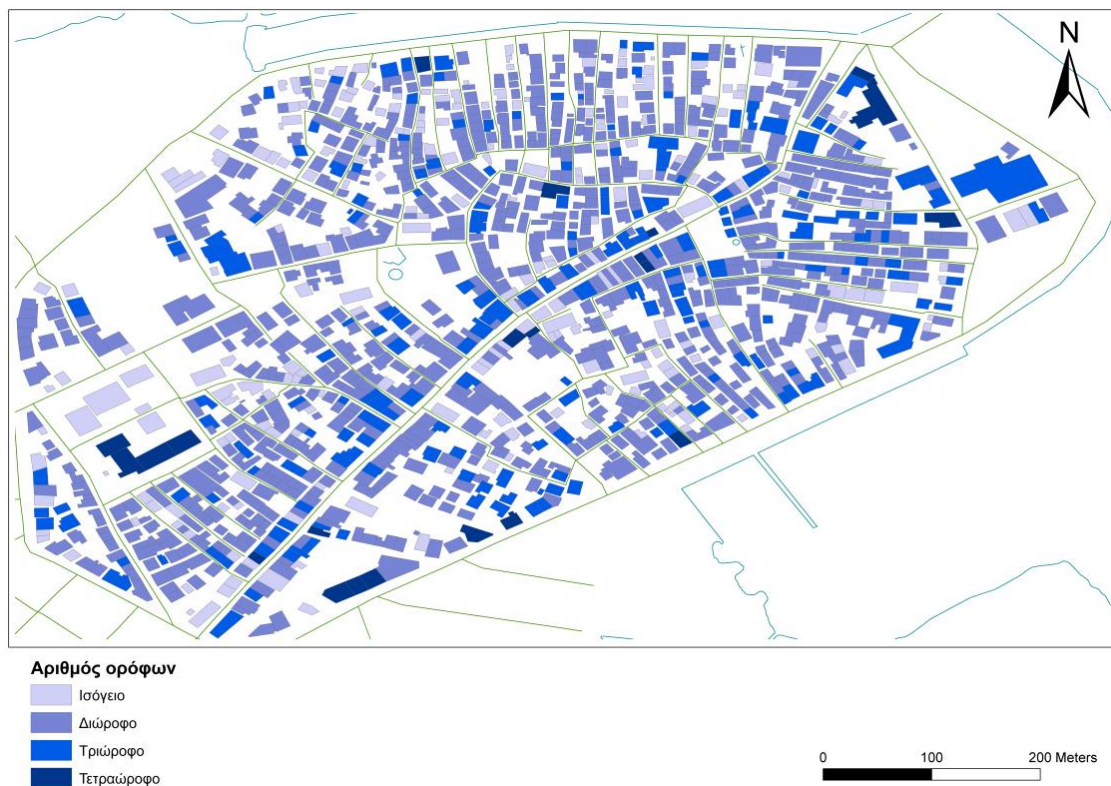
Σε πολλές περιπτώσεις το ισόγειο των κατοικιών έχει μετατραπεί σε κατάστημα, κυρίως στον κεντρικό, εμπορικό δρόμο της πόλης και στον παραλιακό. Τα πέτρινα κτίρια της πόλης στην πλειοψηφία τους είναι μικρού μεγέθους με σχήμα που πλησιάζει τον κύβο.



Σχήμα 42 Κατανομή των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα σύμφωνα με τον αριθμό ορόφων

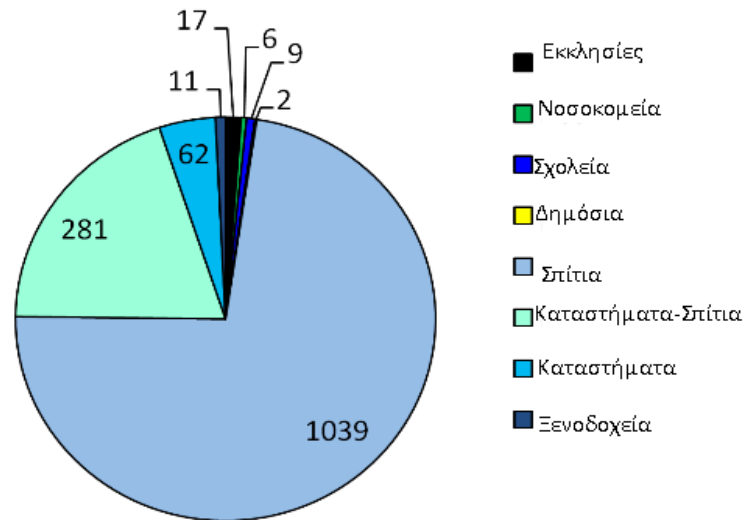


(A)

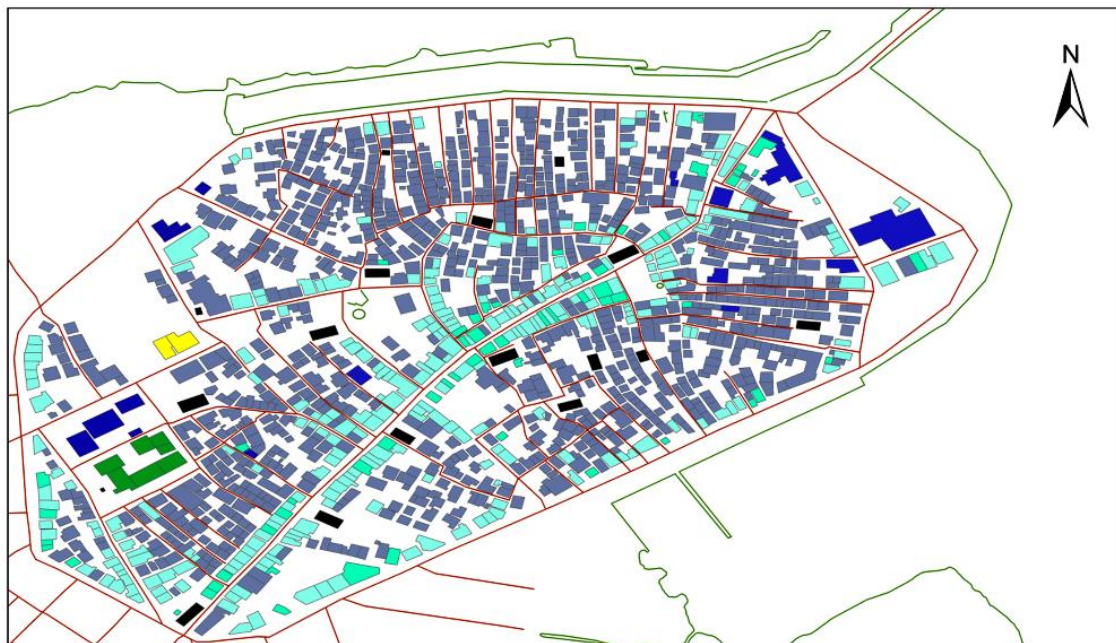


(B)

Σχήμα 43 Στατιστική (A) και χωροταξική (B) κατανομή των κτιρίων σύμφωνα με τον αριθμό ορόφων



(A)



Χρήση κτιρίων

Εκκλησίες	Σχολεία	Σπίτια-Καταστήματα
Νοσοκομεία	Δημόσια	Καταστήματα
Σπίτια	Ξενοδοχεία	

0 100 200 Meters

(B)

Σχήμα 44 Στατιστική (A) και χωροταξική (B) κατανομή των κτιρίων σύμφωνα με τη χρήση τους

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Εκτίμηση σεισμικής τρωτότητας

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται η εκτίμηση της τάξης και του δείκτη τρωτότητας των κτιρίων της υπό μελέτη περιοχής. Η εκτίμηση αυτή αφορά κυρίως στα ιδιωτικά κτίρια. Τα μνημειακά, καθώς και τα κτίρια που κτίστηκαν για δημόσια χρήση, δεν συμπεριλαμβάνονται στη μελέτη. Τα κτίρια αυτά αποτελούν ιδιαίτερη περίπτωση και επομένως δεν μπορούν να εκτιμηθούν με το γενικευμένο προτεινόμενο μοντέλο. Η αναλυτική απογραφή των δομικών χαρακτηριστικών όλων των κτιρίων συνέβαλε στην εκτίμηση της τρωτότητάς τους.

6.1 Εκτίμηση κατηγορίας τρωτότητας

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, το πλεονέκτημα της εμπειρικής μεθόδου που βασίζεται στην Ευρωπαϊκή Μακροσεισμική Κλίμακα (EMS-98) είναι ότι κατατάσσει τα κτίρια σε κατηγορίες (τάξεις) τρωτότητας, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το υλικό κατασκευής τους, αλλά και πρόσθετες παραμέτρους που επηρεάζουν τη σεισμική τους συμπεριφορά. Τέτοιες παράμετροι είναι:

6.1.1. Ο αντισεισμικός σχεδιασμός: Ο αντισεισμικός σχεδιασμός της περιόδου κατασκευής επηρεάζει την τάξη τρωτότητας των κτιρίων, κυρίως αυτών από οπλισμένο σκυρόδεμα, σύμφωνα πάντα με τον πίνακα τρωτότητας της EMS. Ο πρώτος αντισεισμικός κανονισμός στην Ελλάδα θεσπίστηκε το 1959. Βασίζεται σε μια επιτρεπόμενη τάση σχεδιασμού των κτιρίων. Ο υπολογισμός κατανομής των τάσεων σε δοκούς και υποστυλώματα γίνεται για κάθε όροφο χωριστά, ενώ δεν προβλέπεται μελέτη για τα εύκαμπτα μέρη της κατασκευής. Το 1984 βελτιώθηκε ο αντισεισμικός κανονισμός. Η κατανομή του σεισμικού φορτίου σε μια κατασκευή μελετάται θεωρώντας τον ταλαντωτή 1^{ης} τάξης. Βελτιώνεται η μελέτη του ρόλου της δυσκαμψίας δοκών και υποστυλωμάτων. Ουσιαστική αλλαγή στον αντισεισμικό κώδικα γίνεται το 1993, με εφαρμογή του από το 1995.

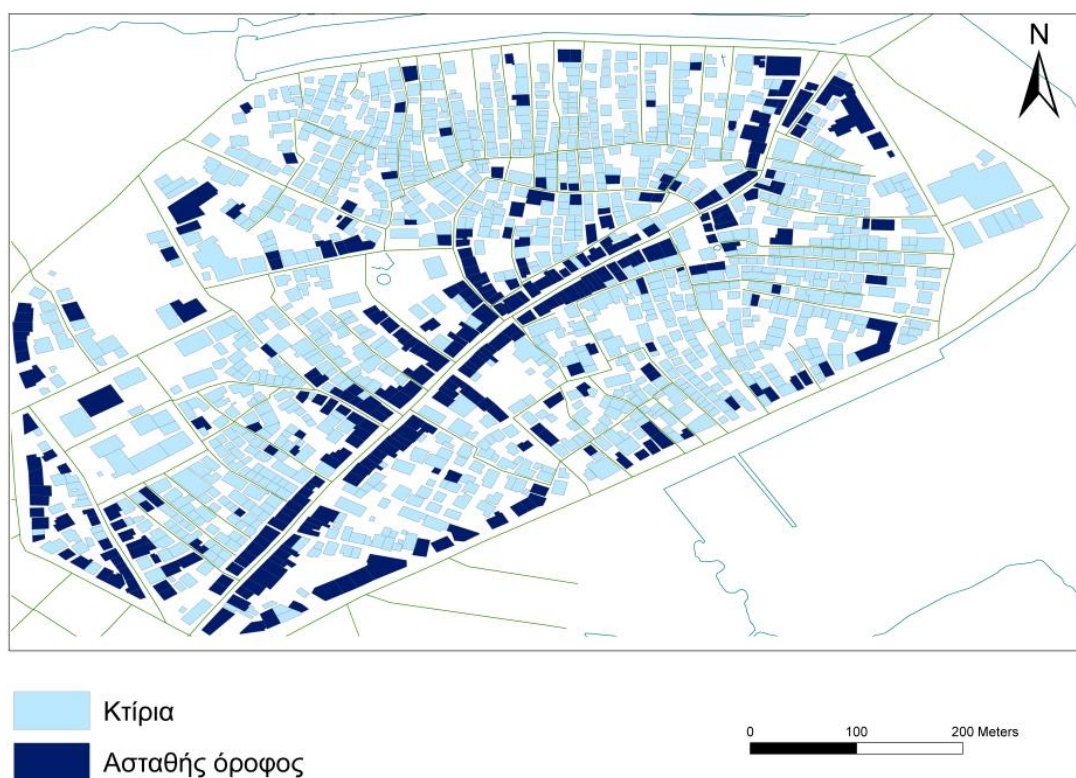
Ο κώδικας βασίζεται σε σχεδιασμό μέγιστης αντοχής των κατασκευών. Πρόκειται για ένα σύγχρονο αντισεισμικό κώδικα που χρησιμοποιεί φάσματα απόκρισης για την δυναμική δομική ανάλυση των κατασκευών. (Lekidis and Dimitriu, 2002). Από τότε έχουν γίνει και άλλες βελτιώσεις με τελευταία αυτή του 2004 που ισχύει μέχρι σήμερα.

Σύμφωνα με τον πίνακα κατάταξης κατασκευών σε κατηγορίες τρωτότητας της EMS-98, τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα διαχωρίζονται σε αυτά που είναι κατασκευασμένα χωρίς αντισεισμικό κανονισμό, σε αυτά που έχουν κατασκευαστεί με μέτριο αντισεισμικό κανονισμό και σε αυτά με υψηλό αντισεισμικό κανονισμό. Μελετώντας τα κριτήρια του διαχωρισμού του μέτριου και του υψηλού κανονισμού που θέτει η EMS και συγκρίνοντας με τους ελληνικούς αντισεισμικούς κανονισμούς, όπως περιγράφονται παραπάνω, χαρακτηρίζονται τα κτίρια ως εξής:

- κτισμένα πριν το 1960 χωρίς αντισεισμικό κανονισμό.
- κατασκευασμένα κτίρια εντός του χρονικού διαστήματος 1961-1994, με μέτριο αντισεισμικό σχεδιασμό,
- μεταγενέστερα του 1995 με υψηλό αντισεισμικό κανονισμό.

6.1.2. Η κανονικότητα των κτιρίων: Με τον όρο κανονικότητα εννοούμε τη συμμετρία στην όψη και κάτοψη των κτιρίων. Όσο αποκλίνει ένα κτίριο από το σχήμα του κύβου, που είναι το ιδανικό για την αντοχή του σε σεισμό, τόσο μεγαλύτερη η εκτροπή από την κανονικότητα. Η συμμετρία στις εξωτερικές διαστάσεις του κτιρίου δεν αρκεί για να θεωρήσουμε ότι το κτίριο αυτό ικανοποιεί τις προδιαγραφές της κανονικότητας. Μπορούν να ανακύψουν προβλήματα σε κτίρια που έχουν έντονη ασυμμετρία στη διάταξη εσωτερικών στοιχείων με διαφορετική ακαμψία, όπως η θέση φρεάτων ανελκυστήρων και κλιμακοστασίων (Grunthal, 1998). Η ύπαρξη ενός ορόφου σημαντικά ασθενέστερου των άλλων συμβάλει επίσης στην εκτροπή από τη κανονικότητα. Τα κτίρια στην παλιά πόλη έχουν μικρό μέγεθος στην πλειοψηφία τους και συμμετρική κάτοψη χωρίς εσωτερική ασυμμετρία, όπως περιγράφεται παραπάνω. Σε αντίθεση με άλλες περιοχές στην Ελλάδα, μέσα στην πόλη της Λευκάδας συναντάμε σπάνια ισόγειους χώρους με πυλωτές. Συχνά όμως, κυρίως στους εμπορικούς δρόμους της πόλης, το ισόγειο έχει

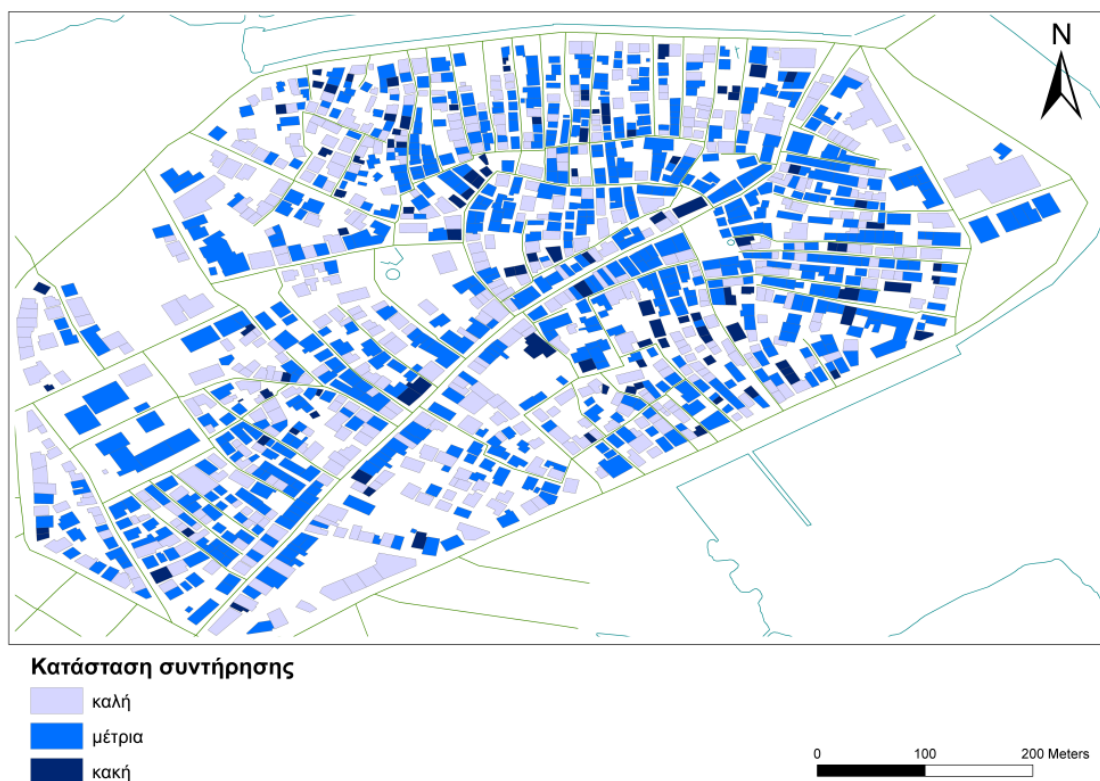
μετατραπεί σε κατάστημα, γκρεμίζοντας τοίχους για την κατασκευή βιτρινών και την επέκταση του εσωτερικού χώρου. Έτσι δημιουργείται ασθενής όροφος, που επηρεάζει σημαντικά την κανονικότητα των κτιρίων. Στο σχήμα 45 φαίνεται ότι τα περισσότερα κτίρια με ασταθή όροφο κατανέμονται γεωγραφικά κατά μήκος του κεντρικού εμπορικού δρόμου της πόλης και των παραλιακών οδών, που είναι και οι πιο τουριστικές.



Σχήμα 45 Κατανομή των κτιρίων σύμφωνα με την οριζόντια κανονικότητά τους

6.1.3. Η κατάσταση συντήρησης: Η παράμετρος αυτή συντελεί περισσότερο στην τρωτότητα των κτιρίων με παραδοσιακό τρόπο δόμησης και κυρίως αυτών που φέρουν ξύλινα μέρη. Το ξύλο, αν δεν συντηρηθεί σωστά, καταστρέφεται από την υγρασία και τους μικροοργανισμούς που αναπτύσσονται σε αυτό. Η εκτίμηση της συντήρησης των παραδοσιακών κτιρίων χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή και μέριμνα, αφού πρέπει ουσιαστικά να

προσδιορισθεί η κατάσταση συντήρησης των ξύλινων στοιχείων τους και ως εκ τούτου, η εξωτερική εμφάνιση όχι μόνο δεν αρκεί, αλλά μπορεί να είναι και αποπροσανατολιστική. Η εκτίμηση της συντήρησης στηρίχτηκε στις παρατηρήσεις στην επιτόπου έρευνα. Ήταν εύκολο να διαπιστωθεί ποια κτίρια ήταν κακοσυντηρημένα ή εγκαταλελειμμένα. Η διάκριση μεταξύ καλής και μέτριας συντήρησης παρουσίασε δυσκολίες. Σε αρκετά κτίρια μέρος του ξύλινου σκελετού των πάνω ορόφων ήταν εξωτερικά ορατός. Η κατάσταση του ήταν καθοριστικό κριτήριο. Πιθανώς κάποια καλά συντηρημένα να χαρακτηρίστηκαν σαν μέτρια γιατί δεν υπήρχαν ορατά στοιχεία που να το αποδεικνύουν. Επίσης διαπιστώθηκαν περιπτώσεις κτιρίων που έχουν χωριστεί σε δύο ή περισσότερες κατοικίες, συνήθως λόγω περισσότερων του ενός κληρονόμων, με διαφορετική κατάσταση συντήρησης.



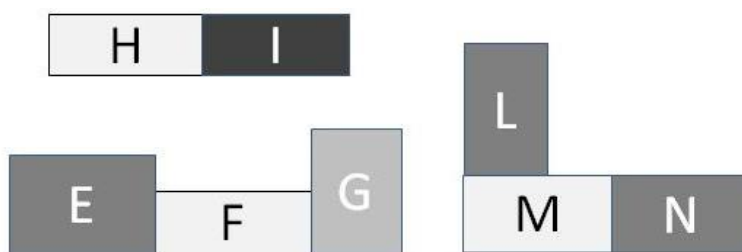
Σχήμα 46 Χωρική κατανομή των κτιρίων βάση της κατάστασης συντήρησης

Σε αυτές τις περιπτώσεις χαρακτηρίστηκαν όλα σύμφωνα με το τμήμα του κτιρίου που παρουσιάζει την χειρότερη κατάσταση συντήρησης, γιατί

κινδυνεύουν να επηρεαστούν από αυτό σε περίπτωση σεισμού. Τα περισσότερα κτίρια της πόλης είναι μέτρια έως καλά συντηρημένα (Σχ.46).

6.1.4. Η ελαστικότητα των κτιρίων: Η ελαστικότητα είναι το μέτρο της ικανότητας ενός κτιρίου να αντέχει πλευρικά φορτία διαχέοντας τη σεισμική ενέργεια και δημιουργώντας βλάβες σε ελεγχόμενη έκταση ανάλογα με τον τύπο κατασκευής. Η παράμετρος συμβάλει περισσότερο στην εκτίμηση της τρωτότητας των κτιρίων με διπλό τρόπο δόμησης, όπως αναλύεται εφεξής.

6.1.5. Η θέση του κάθε κτιρίου εντός οικοδομικού τετραγώνου, καθώς και σε σχέση με τα γειτονικά του: Η παράμετρος αυτή (Σχ. 47) λήφθηκε υπόψη κυρίως στην απόδοση δείκτη τρωτότητας, όπως αναλύεται στην επόμενη υποενότητα.



Σχήμα 47 Σκαρίφημα των θέσεων κτιρίου στο οικοδομικό τετράγωνο: H, I, E, G, L, N: Εφάπτεται μόνο με ένα κτίριο; F: Ανάμεσα σε δύο κτίρια M: γωνία

Η περιγραφή της EMS - 98 σε ό,τι αφορά στα κτίρια από πέτρα, ξύλο και οπλισμένο σκυρόδεμα είναι συμβατή με αυτόν τον τύπο κτιρίων, σε αντίθεση με τα κτίρια που διαθέτουν διπλό τρόπο δόμησης. (Πίνακας 3)

Τα συγκεκριμένα κτίρια παρουσιάζουν ομοιότητες με τα πέτρινα, αφού το ισόγειο είναι από πέτρα κτισμένη με τον ίδιο τρόπο. Οι επάνω όροφοι είναι ελαφρύτεροι και δεν επιβαρύνουν το ισόγειο. Η ύπαρξη των ξύλινων ορόφων αυξάνει επιπρόσθετα την ελαστικότητα των κτιρίων, βελτιώνοντας την αντισεισμική συμπεριφορά τους. Σύμφωνα με αναλυτική μελέτη των κτιρίων από ποντελάρισμα, καθώς και του είδους των βλαβών που υπέστησαν μετά

από το σεισμό του 2003 (Vintzileou et al., 2007), η λιθοδομή του ισογείου εμφανίζει μεγαλύτερο παράγοντα ακαμψίας.

Επιπλέον, είναι προφανές ότι το δευτερεύον σύστημα στήριξης (δηλαδή το σύστημα των ξύλινων δοκών), δεν συμβάλλει στη σεισμική συμπεριφορά των κτισμάτων, επιβεβαιώνοντας την υπόθεση των Τουλιάτου και Γαντέ (1995) ότι το σύστημα αυτό διαδραματίζει σημαντικό ρόλο μόνο κατά την περίπτωση όπου η λιθοδομή του ισογείου έχει καταστραφεί σε μεγάλο βαθμό ή ακόμη και εν μέρει καταρρεύσει λόγω σεισμού. Τα κτίρια αυτά παρουσίασαν λίγο καλύτερη συμπεριφορά από τα πέτρινα κατά το σεισμό του 2003, ίδια περίπου δηλαδή με τα νεότερα πέτρινα του νησιού (Karababa, 2007).

Η εκτίμηση της τάξης τρωτότητας για κάθε κτίριο έγινε ξεκινώντας από την πιθανότερη προτεινόμενη από την EMS - 98 κατηγορία, σύμφωνα με το υλικό κατασκευής (Πίνακας 3). Τα πέτρινα κτίρια, καθώς και τα κτίρια με το διπλό τρόπο δόμησης ανήκουν στην κατηγορία M3 της EMS και τα ξύλινα στην κατηγορία W.

Λαμβάνοντας υπόψη την περίοδο κατασκευής των κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα (συνεπώς τον αντισεισμικό κανονισμό βάσει του οποίου κτίστηκαν) χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: τα *κτίρια πριν το 1960* αντιστοιχούν στα **RC1** της EMS, τα *κτισμένα κατά την περίοδο 1961-1994* - **RC2** και *αυτά που κατασκευάστηκαν μετά το 1995* - **RC3**. Μελετώντας την *οριζόντια και κατακόρυφη κανονικότητα* του σχήματός τους, η τάξη τρωτότητας είτε βελτιώνεται ή επιδεινώνεται. Τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με ξύλινη ανωδομή αποτιμώνται με παραπλήσιο τρόπο, αφού η τελευταία δεν επιβαρύνει την κατασκευή και θεωρείται ασεισμική (Karababa and Pomonis, 2011).

Για τα κτίρια με παραδοσιακό τρόπο δόμησης, εκτός από την κανονικότητά τους, βασικό κριτήριο αποτέλεσε η κατάσταση συντήρησής τους αφού, όπως ειπώθηκε, η τρωτότητα των ξύλινων τμημάτων εξαρτάται από την καλή συντήρησή του.

Πίνακας 3 Κατηγορίες τρωτότητας ανα κτιριακό τύπο κατά EMS-98. Με πράσινο περίγραμμα συμβολίζονται οι κτιριακοί τύποι που συναντώνται στη Λευκάδα.

Typologies		Building type	Vulnerability Classes					
			A	B	C	D	E	F
	M1	Rubble stone	■					
	M2	Adobe (earth bricks)		■				
	M3	Simple stone	■	■				
	M4	Massive stone		■	■			
	M5	Unreinforced M (old bricks)		■	■	■		
	M6	Unreinforced M with r.c. floors		■	■	■	■	
	M7	Reinforced or confined masonry		■	■	■	■	■
Reinforced Concrete	RC1	Frame in r.c. (without E.R.D.)	■	■	■	■	■	■
	RC2	Frame in r.c. (moderate E.R.D.)		■	■	■	■	■
	RC3	Frame in r.c. (high E.R.D.)		■	■	■	■	■
	RC4	Shear walls (without E.R.D.)		■	■	■	■	■
	RC5	Shear walls (moderate E.R.D.)		■	■	■	■	■
	RC6	Shear walls (high E.R.D.)		■	■	■	■	■
Stell	S	Steel structures			■	■	■	■
Tiber	W	Timber structures		■	■	■	■	■

Situations: ■ Most probable class; ■ Possible class; ■ Unlikely class (exceptional cases)

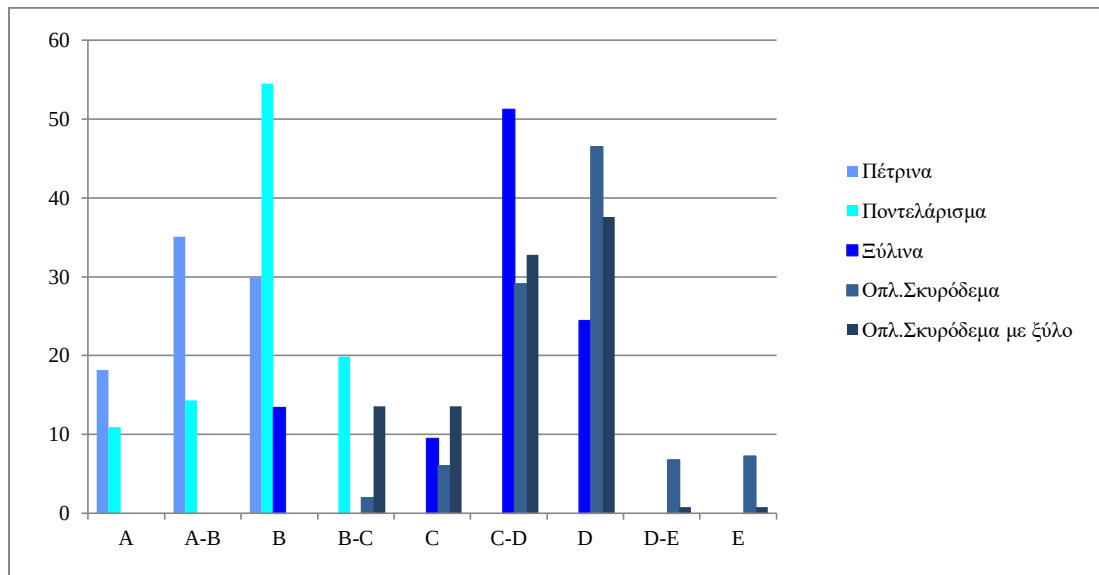
Προκειμένου να λάβουμε υπόψη τα δομικά και μη δομικά χαρακτηριστικά των κτιρίων ώστε να καταδειχτούν καλύτερα οι διαφορετικές περιπτώσεις κτιρίων, ειδικά εκείνων με την παραδοσιακή τοπική αρχιτεκτονική, προτάθηκαν υποκατηγορίες τρωτότητας. Ο πίνακας (Πίνακας 4) δείχνει τα τυπολογικά κριτήρια που υιοθετήθηκαν για την εμπειρική εκτίμηση των κατηγοριών τρωτότητας.

Από την κατανομή των τάξεων τρωτότητας για κάθε τύπο κτιρίου (Σχ.48) προκύπτουν τα ακόλουθα:

- τα πέτρινα κτίρια ανήκουν κυρίως στις κατηγορίες A και A – B,
- τα κτίρια από ποντελάρισμα, κυρίως στις κατηγορίες B και B – C,
- Τα ξύλινα κτίρια, στην πλειοψηφία τους ανήκουν στην κατηγορία C - D και συναντούμε ακόμα και κτίσματα κατηγορίας D,
- Καλύτερα όλων, όπως διαφαινόταν, είναι τα σύγχρονα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα τα οποία ανήκουν στις τάξεις C-D, D, ακόμα και E.

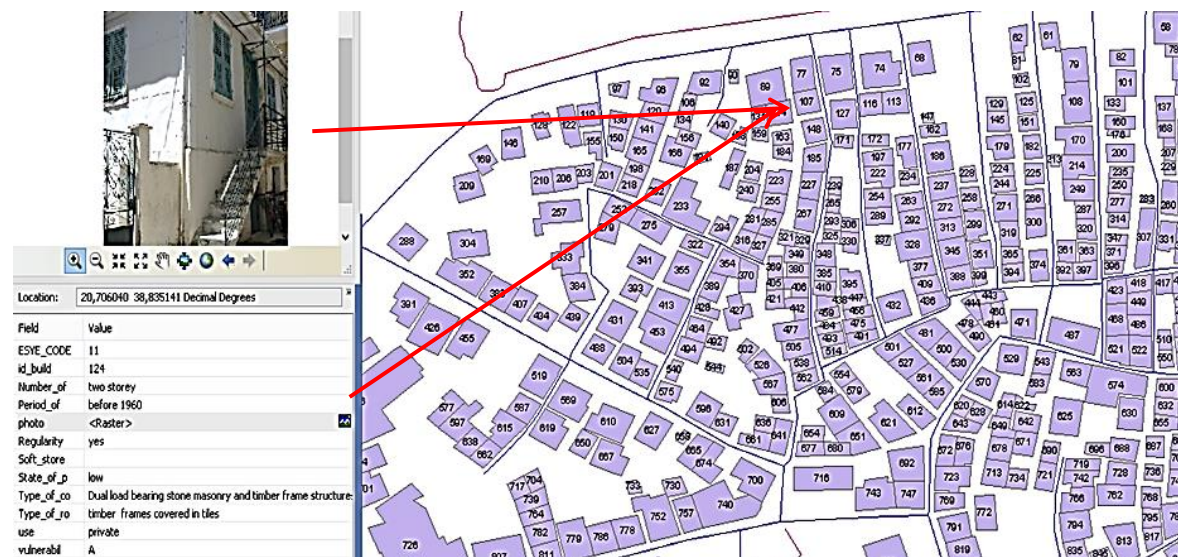
Πίνακας 4 Εμπειρική εκτίμηση κατηγοριών τρωτότητας

Υλικό Κατασκευής	Κριτήρια	Αντισεισμικός σχεδιασμός- Βαθμός συντήρησης	Κατηγορία τρωτότητας (σύμφωνα με την κανονικότητα)	
			Με Κανονικότητα	Χωρίς Κανονικότητα
Οπλισμένο σκυρόδεμα και (RC) Οπλισμένο σκυρόδεμα με ξύλο	Περίοδος κατασκευής και Κανονικότητα	Κτίρια χωρίς ή με χαμηλό αντισεισμικό σχεδιασμό (<1961) RC1	C	B-C
		Κτίρια με μέτριο αντισεισμικό σχεδιασμό (1961-1994) RC2	D	C-D
		Κτίρια με υψηλό αντισεισμικό σχεδιασμό (>1995) RC3	E	D-E
Πέτρα (M3)	Βαθμός συντήρησης και Κανονικότητα	Καλός βαθμός συντήρησης	B	A-B
		Μέτριος βαθμός συντήρησης	A-B	A
		Εγκαταλελειμμένα	A	A
Ποντελάρισμα (M3)		Καλός βαθμός συντήρησης	B-C	B
		Μέτριος βαθμός συντήρησης	B	A-B
		Εγκαταλελειμμένα	A	A
Ξύλο (W)		Καλός βαθμός συντήρησης	D	C-D
		Μέτριος βαθμός συντήρησης	C	B-C
		Εγκαταλελειμμένα	B	B

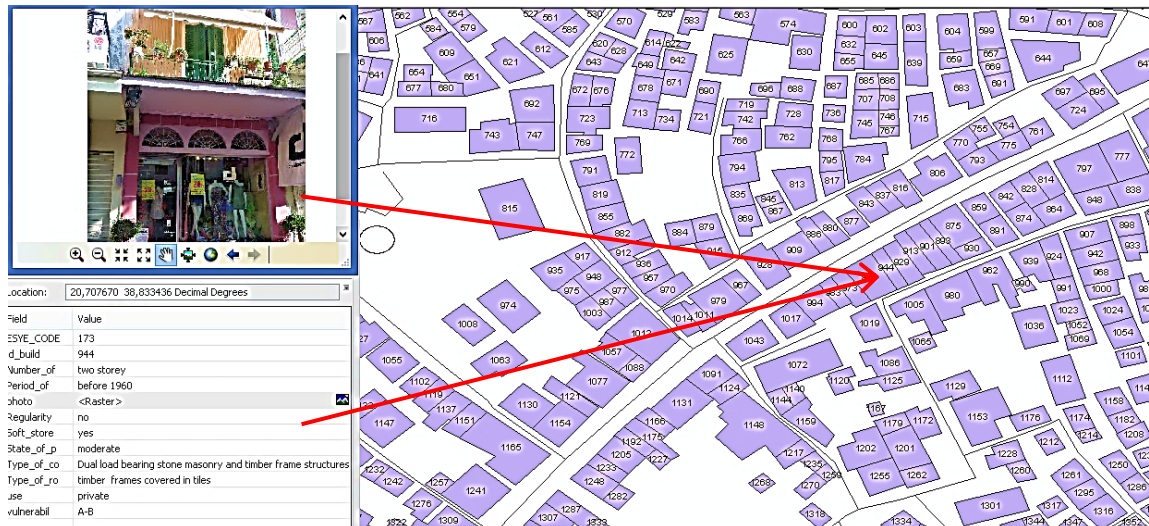


Σχήμα 48 Κατανομή των τάξεων τρωτότητας για κάθε τύπο κτιρίου.

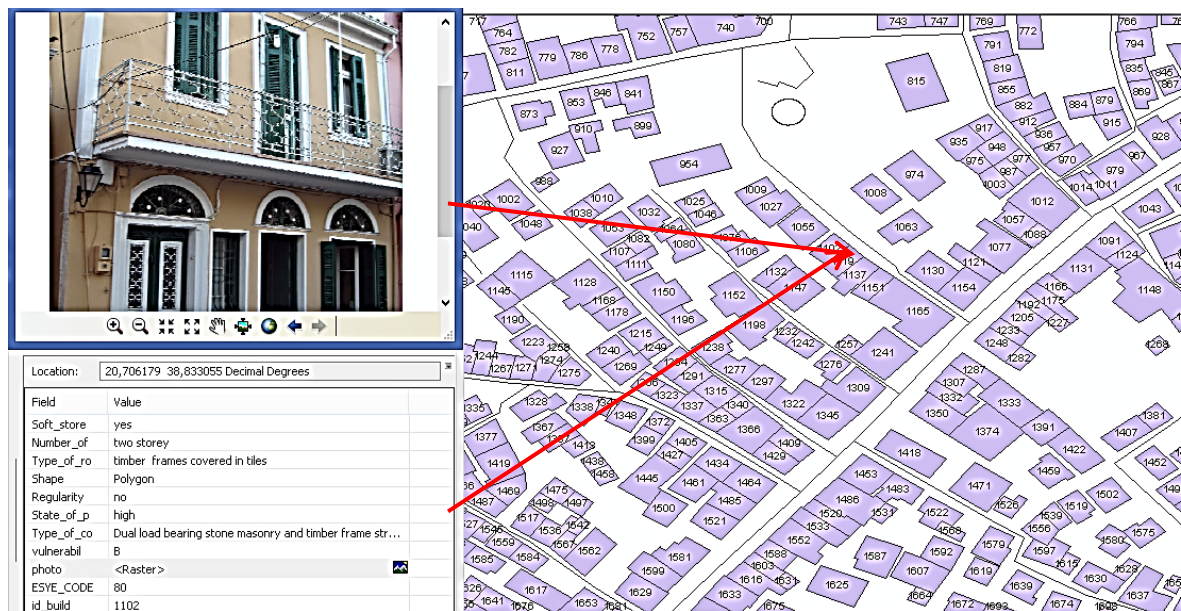
Παρατίθενται παρακάτω ενδεικτικά εικόνες κτιρίων με το χαρακτηρισμό της κατηγορίας τρωτότητας.



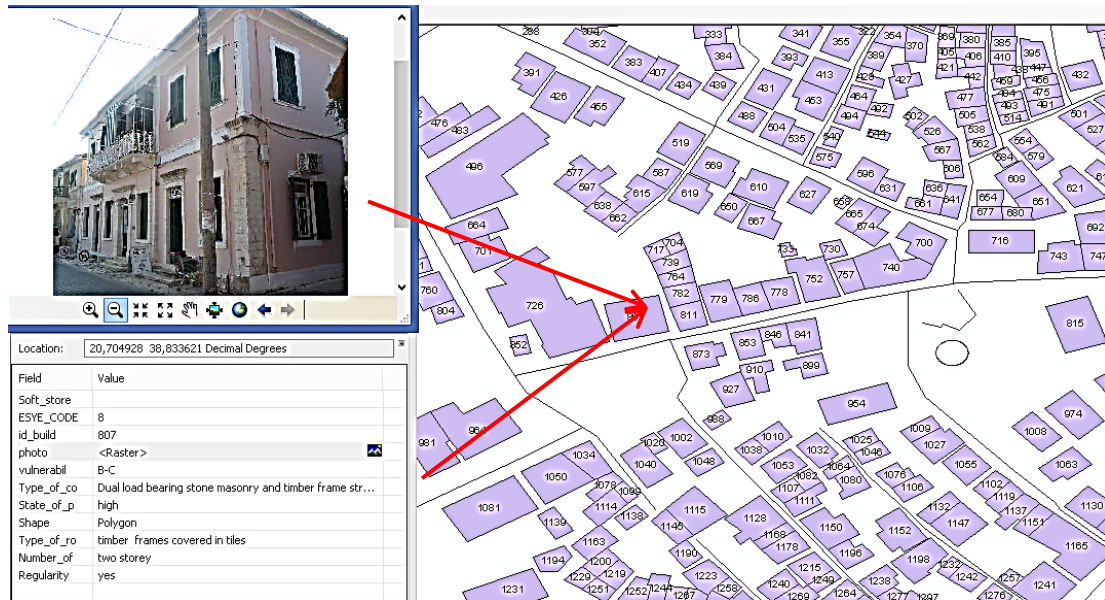
Σχήμα 49 Κτίριο από ποντελάρισμα κατασκευασμένο πριν το 1960 με κακή συντήρηση και κατηγορία τρωτότητας A



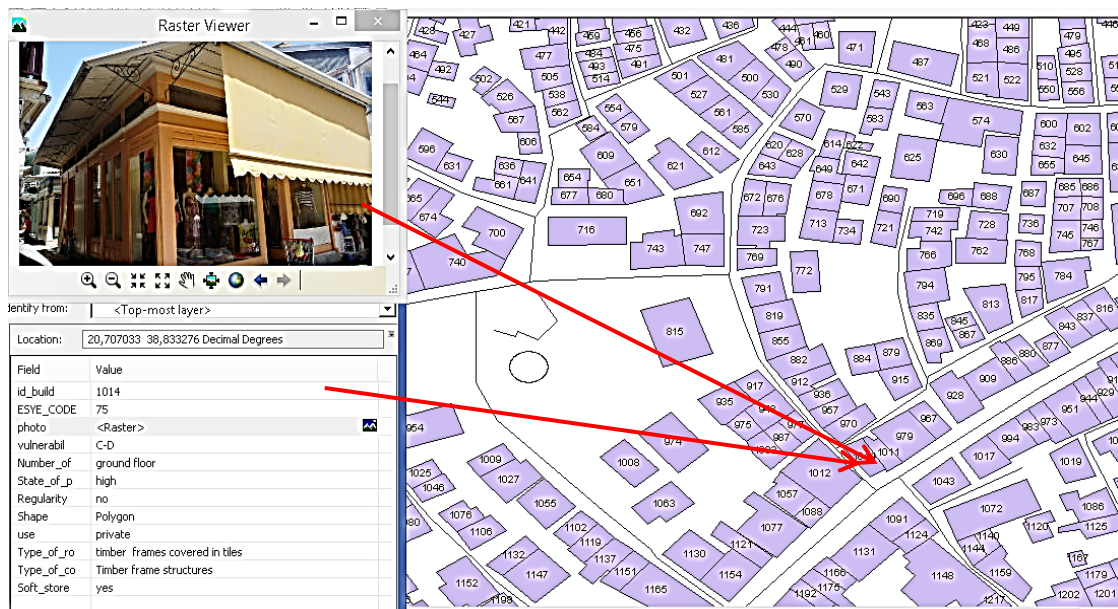
Σχήμα 50 Κτίριο με διπλό τρόπο δόμησης, με μέτριο βαθμό συντήρησης. Το ισόγειο αποτελεί ασταθή όροφο. Κατηγορία τρωτότητας A-B.



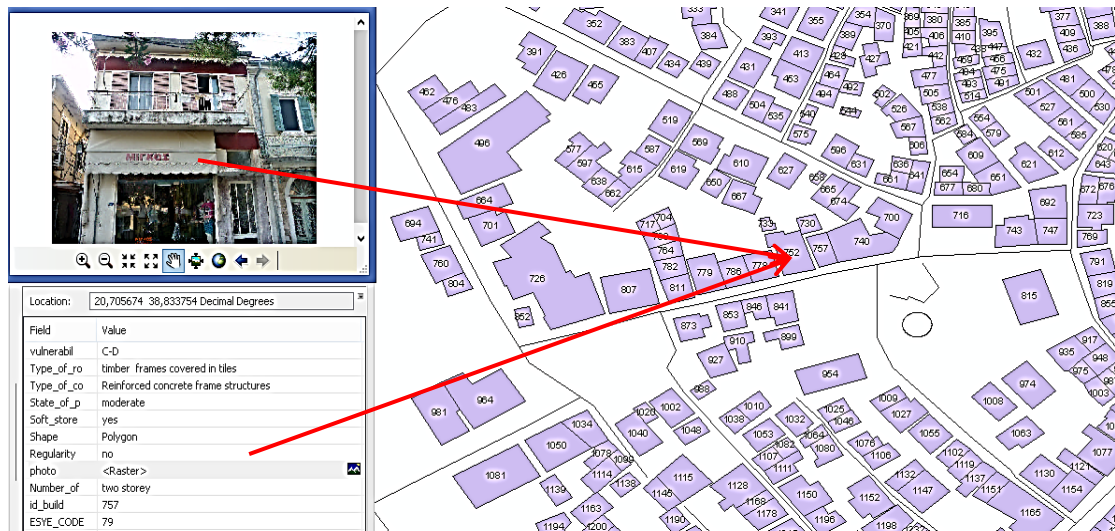
Σχήμα 51 Κτίριο με διπλό τρόπο δόμησης, μέτρια συντήρηση και πολλά ανοίγματα στη πρόσοψη. Κατηγορία τρωτότητας B



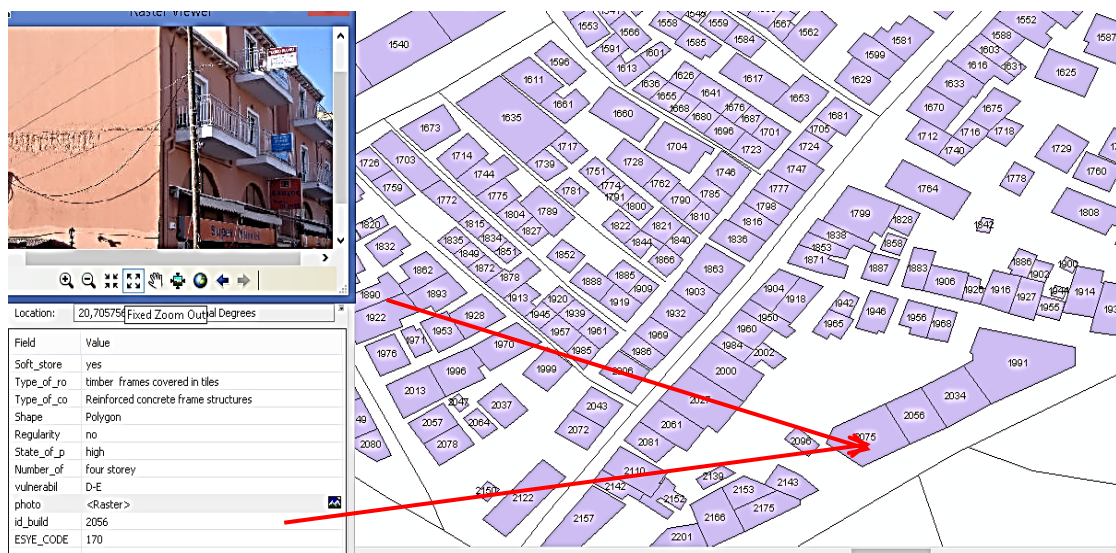
Σχήμα 52 Κτίριο με διπλό τρόπο δόμησης, καλή συντήρηση , κανονικότητα. Κατηγορία τρωτότητας B- C



Σχήμα 53 Κτίριο από ξύλο με καλή συντήρηση και ασταθή όροφο. Κατηγορία τρωτότητας C-D



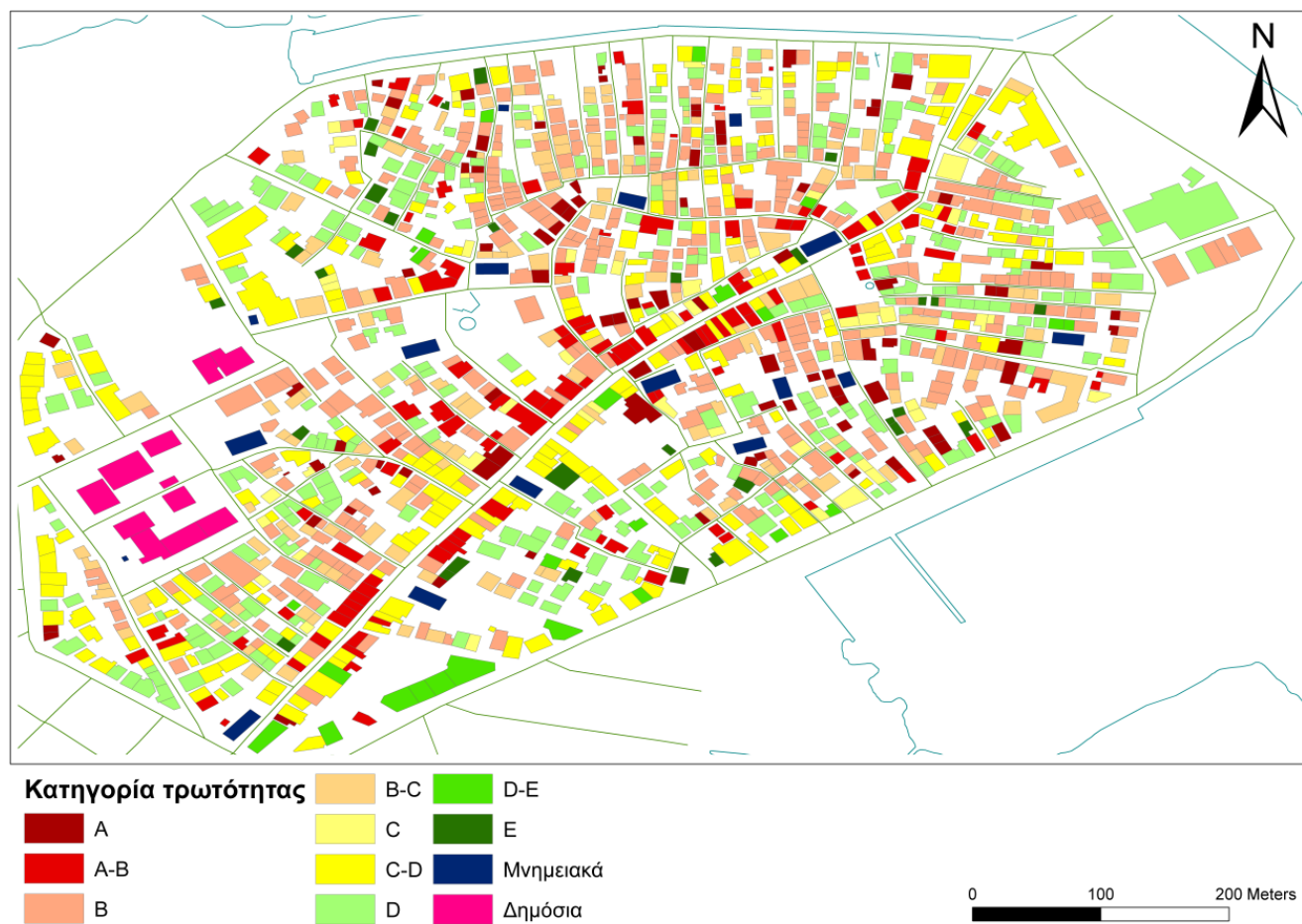
Σχήμα 54 Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα κτισμένο με μέτριο αντισεισμικό κανονισμό, με ασταθή όροφο στο ισόγειο. Κατηγορία τρωτότητας C-D.



Σχήμα 55 Κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα με υψηλό αντισεισμικό κανονισμό χωρίς κανονικότητα, τάξη τρωτότητας D-E

Στο χάρτη (Σχ.56) που ακολουθεί φαίνεται η χωροταξική κατανομή των κατηγοριών τρωτότητας κτιρίων.

Τα χαμηλότερης τρωτότητας κτίρια βρίσκονται κυρίως στο κέντρο της πόλης και γύρω από τον κεντρικό εμπορικό δρόμο.



Σχήμα 56 Χωροταξική κατανομή των κατηγοριών τρωτότητας των κτιρίων σύμφωνα με την απογραφή του 2012.

6.2 Εκτίμηση δείκτη τρωτότητας

Η κατάταξη σε τάξεις τρωτότητας δεν μπορεί να αντιπροσωπεύσει τα ιδιαίτερα δομικά χαρακτηριστικά, όπως εντοπίστηκαν σε πλήθος περιπτώσεων κατά την επιτόπια, μακροσκοπική εξέταση. Επιπλέον η κατηγορία τρωτότητας είναι εκφρασμένη με γράμμα, κάτι που δεν διαμορφώνεται σε αλγόριθμο για τον υπολογισμό της πιθανής διαβάθμισης βλαβών, γεγονός που αποτελεί στόχο της διατριβής. Εφαρμόστηκε αναγωγή των τάξεων τρωτότητας σε δείκτες τρωτότητας, λαμβάνοντας υπόψη ειδικές δομικές παραμέτρους που μεταβάλλουν τη σεισμική συμπεριφορά των κτιρίων, ιδιαίτερα των παραδοσιακών. Για την εκτίμηση του δείκτη τρωτότητας εφαρμόστηκε η μεθοδολογία του ασαφούς συνόλου που έχουν προτείνει οι Gioninazzi – Lagomarsino (2004). Όπως έχει ήδη αναλυθεί στο κεφάλαιο 3, ο δείκτης τρωτότητας κάθε κτιρίου προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα του πιθανότερου δείκτη (V_I^*) (Πίνακας 5) για την πιθανότερη τάξη τρωτότητας στην οποία ανήκει ο συγκεκριμένος τύπος κτιρίου και εμπειρικών παραγόντων που εξαρτώνται από άλλα χαρακτηριστικά του.

Πίνακας 5 Δείκτες τρωτότητας (πιθανότερος V_I^* , όρια του εύλογου εύρους του δείκτη τρωτότητας V_I^- , V_I^+ και άνω και κάτω όρια των πιθανών τιμών V_{Imin} , V_{Imax} για τις κατηγορίες τρωτότητας (Gioninazzi –Lagomarsino, 2004).

Typologies		Building type	□ulnerabilità Classes				
			V_{Imin}	V_I^-	V_I^*	V_I^+	V_{Imax}
Masonry	M1	Rubble stone	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
	M2	Adobe (earth bricks)	0.62	0.687	0.84	0.98	1.02
	M3	Simple stone	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M4	Massive stone	0.3	0.49	0.616	0.793	0.86
	M5	Unreinforced M (old bricks)	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
	M6	Unreinforced M with r.c. floors	0.3	0.49	0.616	0.79	0.86
	M7	Reinforced or confined masonry	0.14	0.33	0.451	0.633	0.7
Reinforced Concrete	RC1	Frame in r.c. (without E.R.D.)	0.3	0.49	0.644	0.8	1.02
	RC2	Frame in r.c. (moderate E.R.D.)	0.14	0.33	0.484	0.64	0.86
	RC3	Frame in r.c. (high E.R.D.)	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
	RC4	Shear walls (without E.R.D.)	0.3	0.367	0.544	0.67	0.86
	RC5	Shear walls (moderate E.R.D.)	0.14	0.21	0.384	0.51	0.7
	RC6	Shear walls (high E.R.D.)	-0.02	0.047	0.224	0.35	0.54
Stell	S	Steel structures	-0.02	0.17	0.324	0.48	0.7
Tiber	W	Timber structures	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

Για κάθε κτιριακό τύπο επιλέχτηκε ο VI* σύμφωνα με τον πίνακα 5. Στον Πίνακα 6 απεικονίζονται οι δείκτες που επιλέχτηκαν για κάθε κτιριακό τύπο στην πόλη της Λευκάδας

Πίνακας 6 Κύριοι δείκτες τρωτότητας για κάθε τύπο δόμησης

Τύπος δόμησης της Λευκάδας	Τύπος κτιρίου κατά EMS-98	VI*(αρχικός δείκτης)
Πέτρινα	M3	0.74
Διπλός τρόπος δόμησης (ποντελάρισμα)		0.74
Ξύλινα	W	0.447
Οπλισμένο σκυρόδεμα χωρίς αντισεισμικό κανονισμό	RC1	0.644
Οπλισμένο σκυρόδεμα με μέτριο αντισεισμικό κανονισμό	RC2	0.484
Οπλισμένο σκυρόδεμα με υψηλό αντισεισμικό κανονισμό	RC3	0.324

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τον δείκτη τρωτότητας και η βαρύτητά τους καθορίστηκαν κυρίως από την βιβλιογραφία (Giovinazzi and Lagomarsino, 2004; Lantada et al.,2007) για τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα και τα λιθόκτιστα. Τα δομικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν κάποιους παράγοντες δεν συναντώνται στην υπό μελέτη περιοχή, αφού τα κτίρια της Λευκάδας διαφέρουν από τα ιταλικά. Πιο συγκεκριμένα, στη Λευκάδα δεν παρατηρούνται περισσότεροι όροφοι από τέσσερεις, ούτε κτίρια με αντηρίδες ή με διαφορετικό βάθος θεμελίων.

Όσον αφορά στα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, μέσα στην πόλη δεν συναντάμε χαμηλές κολώνες στο ισόγειο. Τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα και ξύλινο πάνω όροφο εξετάστηκαν κατ' αντιστοιχία αυτών από σκυρόδεμα, αφού εμφανίζουν παρεμφερή σεισμική συμπεριφορά και δεν επιδεικνύουν κατακόρυφη κανονικότητα.

Για τα ξύλινα κτίρια, καθώς και για τα κτίρια με το διπλό τρόπο δόμησης, οι παράγοντες και η βαρύτητα του καθενός υπήρξαν ακαθόριστοι. Για τα ξύλινα

κτίρια μελετήθηκε από τη βιβλιογραφία η σεισμική συμπεριφορά τους (Anagnostopoulos, 1994; Arnold, 2003), καθώς και η αντιστοιχία παραγόντων που την επηρεάζουν, μεταξύ αυτών και των λιθόχτιστων. Τα ξύλινα επηρεάζονται περισσότερο από το βαθμό συντήρησης και λιγότερο από τον αριθμό ορόφων και τη θέση τους εντός οικοδομικού τετραγώνου. Παρεμβάσεις δεν παρατηρούνται στη Λευκάδα. Εκ παραλλήλου, λήφθηκαν υπόψη και τα όρια τιμών των δεικτών τρωτότητας που προτείνει η EMS. Τα κτίρια από ποντελάρισμα ακολουθούν τη μεθοδολογία αξιολόγησης των λίθινων κτιρίων, αφού, ο ξύλινος σκελετός δεν επηρεάζει την τρωτότητα του κτιρίου. Ο παράγοντας που εξαρτάται από τον αριθμό των ορόφων έλαβε την τιμή των ισόγειων λίθινων κτιρίων.

Στον Πίνακα 7 φαίνονται οι παράγοντες και η βαρύτητά τους για κάθε τύπο κτίσματος. Το αρνητικό πρόσημο στον πίνακα σημαίνει ότι ο συγκεκριμένος παράγοντας ελαττώνει το δείκτη τρωτότητας, επομένως βελτιώνει την αναμενόμενη σεισμική συμπεριφορά.

Για τον υπολογισμό του δείκτη τρωτότητας τα κτίρια χωρίστηκαν σε δυο κατηγορίες σε σχέση με την κατάσταση συντήρησής τους. Η καλή ή κακή συντήρηση αφορά κυρίως στα αντισεισμικά στοιχεία των κτιρίων, ιδιαίτερα στα ξύλινα στοιχεία, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα. Επηρεάζει λίγο ως καθόλου τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η κατακόρυφη κανονικότητα στην πόλη της Λευκάδας επηρεάζεται κυρίως από την ύπαρξη ασταθούς ορόφου, ενώ η οριζόντια, για τα μεν παραδοσιακά εξαρτάται από το σχήμα τους, για τα δε σύγχρονα από το σχήμα αλλά και την ομοιόμορφη οριζόντια κατανομή των δομικών στοιχείων τους, αν π.χ. οι τοίχοι και τα ανοίγματα είναι συμμετρικά σε όλους τους ορόφους ή αν υπάρχει όροφος ψηλότερος των υπολοίπων, που προκαλεί ακανονική κατανομή δυσκαμψιών καθ' ύψος. Τέτοιες περιπτώσεις παρατηρούνται σε κτίρια που στο ισόγειο υπάρχει πατάρι, καθιστώντας το ψηλότερο των επάνω ορόφων. Συνήθως αυτά τα ισόγεια είναι καταστήματα.

Πίνακας 7 Παράγοντες τρωτότητας και η βαρύτητά τους

Παράγοντες		Ξύλινα	Πέτρινα-Ποντελάρισμα	Οπλισμένο σκυρόδεμα με αντισεισμικό σχεδιασμό		
				χαμηλό	μεσαίο	υψηλό
Κατάσταση συντήρησης	καλή	0	-0.04	-	-	-
	πτωχή	0.08	0.04	0.04	0.02	0
Αριθμός ορόφων	1-2	0	-0.08			
	3-4	0.04	0			
	1-3			-0.02	-0.02	-0.02
	4-7			-	-	-
Κατακόρυφη κανονικότητα		0.04	0.04	0.04	0.02	0
Οριζόντια κανονικότητα		0.04	0.04	Κατανομή μάζας		
				0.02	0.01	0
				Γεωμετρία		
				0.04	0.02	0
Δομικό σύστημα (πάχος τοίχων συνδέσεις)		- 0.04/ 0.04	-0.04/0.04			
Οροφή		0.04	0.04			
Παρεμβάσεις		0	-0.08/0.08			
Θέση στο οικοδομικό τετράγωνο	Γωνία	0.02	0.04	0.04	0	0
	Μεταξύ δυο κτιρίων	-0.02	-0.04			
	Εφάπτεται μόνο με ένα κτίριο	0.04	0.06			
Διαφορά ύψους των κτιρίων που εφάπτονται		0	-0.04/0.04			

Το πάχος των τοίχων και οι συνδέσεις μεταξύ τους επηρεάζουν την τρωτότητα των παραδοσιακών κτιρίων. Οι τοίχοι των λίθινων κτιρίων της Λευκάδας έχουν

συνήθως μεγάλο πάχος, γεγονός που συμβάλει στην ελάττωση του δείκτη τρωτότητας. Σε μερικά πέτρινα ισόγεια, όχι πολλά, αντί για την ελαφριά στέγη από κεραμίδια συναντάμε πλάκα από σκυρόδεμα, γεγονός που επιβαρύνει τη σεισμική συμπεριφορά τους. Οι παρεμβάσεις μπορεί να αποδυναμώνουν το κτίριο, όπως στην περίπτωση που μεγαλώνουν τα ανοίγματα ή γκρεμίζονται ενδιάμεσοι τοίχοι, αυξάνοντας το δείκτη τρωτότητας ή να το ενισχύουν, όταν πραγματοποιούνται εργασίες συντήρησης και επισκευές βλαβών, ελαττώνοντας την τιμή του δείκτη.

Τα κτίρια που εφάπτονται επηρεάζουν το ένα το άλλο με διαφορετική βαρύτητα, ανάλογα με τη θέση τους στο οικοδομικό τετράγωνο. Στις περιπτώσεις που ένα κτίριο εφάπτεται με δυο άλλα διαφορετικού ύψους, τότε διακρίνουμε:

Το ένα κτίριο να είναι πιο χαμηλό και το άλλο να έχει το ίδιο ύψος με αυτό (0.02),

Τα δυο γειτονικά κτίρια να είναι πιο χαμηλά (0.04),

Το ένα κτίριο να είναι πιο ψηλό και το άλλο να έχει το ίδιο ύψος (-0.02),

Τα δυο γειτονικά κτίρια να είναι πιο ψηλά (-0.04), (Lantada et al., 2004).

Στον ακόλουθο πίνακα φαίνεται το εύρος των τιμών των δεικτών τρωτότητας όπως υπολογίστηκαν για τους διαφορετικούς τύπους κτιρίων.

Πίνακας 8 Το εύρος των δεικτών τρωτότητας

Τύπος κτιρίου	Δείκτες Τρωτότητας
Οπλισμένο σκυρόδεμα και οπλισμένο σκυρόδεμα με ξύλο	0.304-0.740
Πέτρινα	0.560-0.980
Διπλός τρόπος δόμησης (ποντελάρισμα)	0.580-0.880
Ξύλινα	0.387-0.607

Στους πίνακες που ακολουθούν παρατίθενται παραδείγματα υπολογισμού δείκτη τρωτότητας για τους διάφορους τύπους κτιρίων.

Πίνακας 9 Παράδειγμα υπολογισμού δείκτη τρωτότητας για πέτρινα κτίρια

id build	vulnerability class	State of preservation	Floor number	structural system	plan irregularity.	vertical irregularity	ro of	Intervention	Differ. High	Building position	VI*	Vifinal
1143	B	-0,04	-0,08	0	0	0	0	0	0	0	0,74	0,62
122	B	-0,04	-0,08		0	0	0	0	0	0,1	0,74	0,68
128	A-B	-0,04	-0,08	0	0,04	0	0	0	0	0,1	0,74	0,72
203	A-B	-0,04	-0,08	0	0	0	0	0	0	0,1	0,74	0,68
206	B	-0,04	-0,08	0	0	0	0	0	0	-0	0,74	0,58
434	B	-0,04	-0,08	0	0	0	0	0	0	0	0,74	0,66
92	B	-0,04	-0,08	0	0,04	0	0	0	0	0,1	0,74	0,72
140	A-B	0,04	-0,08	0	0	0	0,04	0	0	0,1	0,74	0,8
223	B	-0,04	-0,08	0	0	0	0	0	0	0,1	0,74	0,68
354	B	-0,04	-0,08	0	0	0	0	0	0	0	0,74	0,66
540	A-B	-0,04	-0,08	0	0	0	0	0	0	-0	0,74	0,58
329	B	-0,04	-0,08	0	0	0	0	0	0	0	0,74	0,66
234	A	0,04	-0,08	0,04	0	0	0,04	0	0	0	0,84	0,92

Πίνακας 10 Παράδειγμα υπολογισμού δείκτη τρωτότητας για κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης

id build	vulnerability class	State of preservation	Floor N	structural system	Plan irregularity.	vertical irregularity	roof	Intervention	Differ. High	Building position	VI*	Vifin
694	B	0,04	-0,08							0,04	0,74	0,74
741	B	-0,04	-0,08							-0,04	0,74	0,58
1096	B-C	-0,04	-0,08			0,04				0,06	0,74	0,72
455	B-C	-0,04	-0,08			0,04				0,06	0,74	0,72
615	B-C	-0,04	-0,08							-0,04	0,74	0,58
662	B-C	-0,04	-0,08							0,04	0,74	0,66
807	B-C	-0,04	-0,08							0,04	0,74	0,66
119	B	0,04	-0,08							0,04	0,74	0,74
169	B	-0,04	-0,08	0,04						0,06	0,74	0,72
209	B	0,04	-0,08							0,06	0,74	0,76
304	B-C	-0,04	-0,08						0,04	0,06	0,74	0,72
333	B-C	-0,04	-0,08	0,04	0,04					0,04	0,74	0,74

Πίνακας 11 Παράδειγμα υπολογισμού δείκτη τρωτότητας για ξύλινα κτίρια

id build	vulnerability	State of preservation	Floor number	structural system	Plan Irr	Vertical Irr.	ro of	Intervention	Differ. High	Building position	VI*	Vi final
391	D	0	-0,04	0	0	0	0	0	0	0,04	0,447	0,447
587	D	0	-0,04	0	0	0	0	0	0	-0,02	0,447	0,387
257	C	0	-0,04	0	0	0	0	0	0	0,04	0,447	0,447
383	D	0	-0,04	0	0	0	0	0	0	-0,02	0,447	0,387
407	C-D	0	-0,04	0	0	0	0	0	0	-0,02	0,447	0,387
89	C-D	0,08	0	0	0	0	0	0	0	0,02	0,447	0,547
106	B	0,08	-0,04	0	0	0	0	0	0		0,447	0,487
131	C	0,08	-0,04	0	0	0	0	0	0	-0,02	0,447	0,467
134	C-D	0,08	-0,04	0	0	0	0	0	0	-0,02	0,447	0,467
159	C-D	0,08	-0,04	0	0	0	0	0	0	0,02	0,447	0,507

Πίνακας 12 Παράδειγμα υπολογισμού δείκτη τρωτότητας για κτίρια από ολπισμένο σκυρόδεμα.

id build	Period of construction	vulnerability class	preservation	n.of floors	plan irregularity	vertical irregularity	Building position	Short column	VI*	Vi final
760	1961-1994	C-D		-0,02		0,02			0,484	0,484
904	1961-1994	D		-0,02				0,01	0,484	0,474
1030	1961-1994	D		-0,02	0	0		0,01	0,484	0,474
1066	1961-1994	C-D		-0,02		0,02			0,484	0,484
804	after 2003	E		-0,02					0,324	0,304
426	1961-1994	D		-0,02					0,484	0,464
462	1961-1994	D		-0,02					0,484	0,464
476	1961-1994	D		-0,02					0,484	0,464
483	1961-1994	D		-0,02					0,484	0,464
496	1961-1994	C-D		-0,02	0,02	0,02			0,484	0,504
519	1961-1994	D		-0,02					0,484	0,464

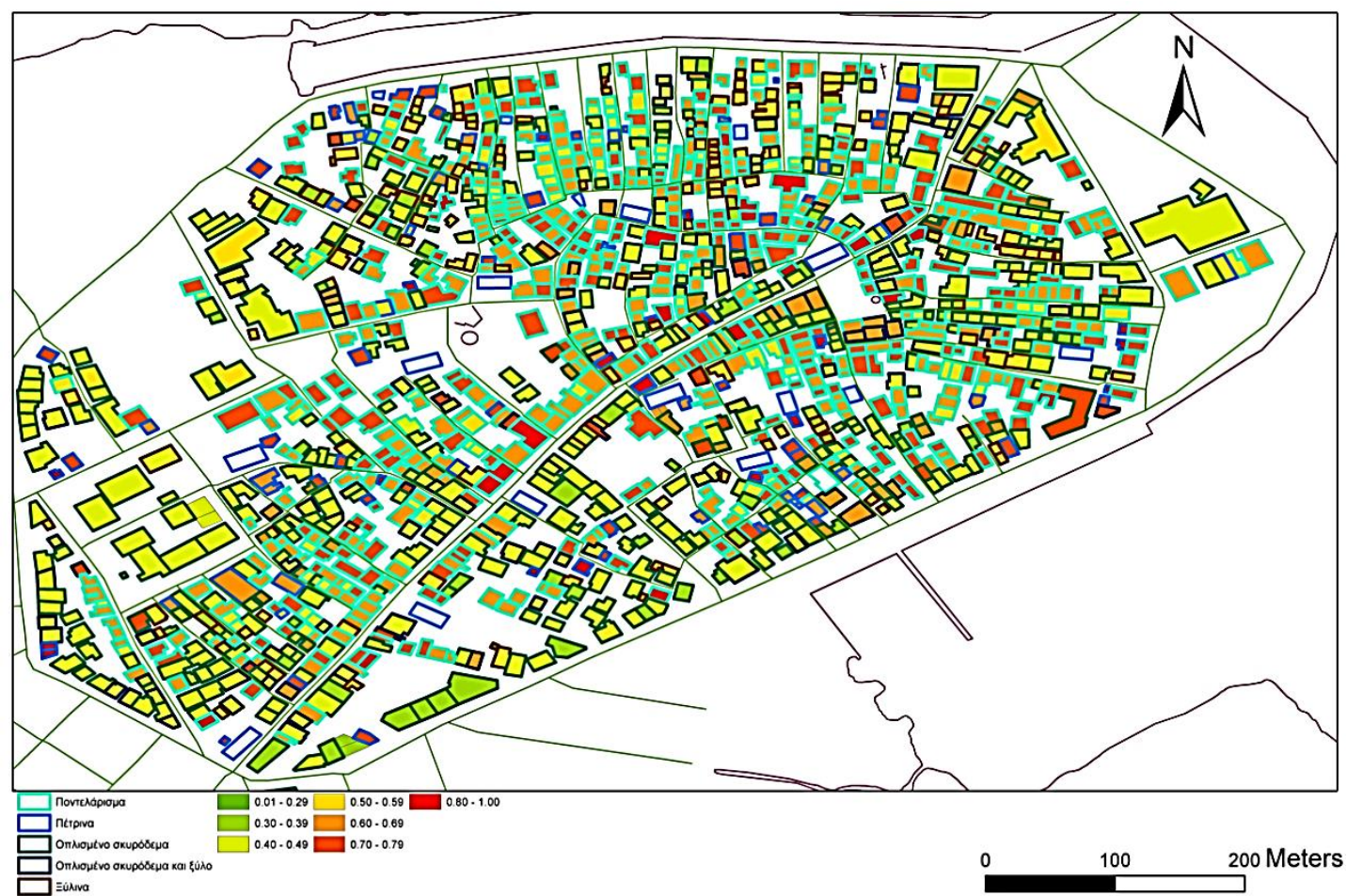
Όπως φαίνεται στο σχήμα 57, όπου απεικονίζονται η κατανομή των δεικτών τρωτότητας ταυτόχρονα με τον τύπο δόμησης κάθε κτιρίου, τα κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης και τα πέτρινα παρουσιάζουν τους μεγαλύτερους δείκτες τρωτότητας. Τα νεότερα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάζουν τους μικρότερους δείκτες τρωτότητας.

Παρατηρώντας την γεωγραφική κατανομή τους, τα κτίρια με τη μεγαλύτερη τρωτότητα κατανέμονται στο βόρειο και βορειοανατολικό τμήμα της πόλης, που είναι το παλαιότερο, καθώς και γύρω από τον κεντρικό εμπορικό δρόμο όπου έχουν επιβεβαιωθεί οι περισσότερες παρεμβάσεις στα κτίρια, μεγαλώνοντας τα ανοίγματα ή κατεδαφίζοντας εσωτερικούς τοίχους. Οι παρεμβάσεις αυτές μεταβάλλουν επιβαρυντικά τη στατικότητα των κτιρίων.

6.3 Εκτίμηση του δείκτη τρωτότητας του δομικού ιστού το 2003

Ο δείκτης τρωτότητας που αποδόθηκε στα κτίρια της πόλης μετά την επιτόπια έρευνα αφορά στην τρωτότητά τους όπως υφίσταται σήμερα. Όπως αναφέρεται στην εισαγωγή, η επαλήθευση του προτεινόμενου μοντέλου πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σεισμού του 2003, με τα πραγματικά αποτελέσματα του εν λόγω σεισμού. Για να συγκρίνουμε όμως τ' αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου με αυτά του σεισμού του 2003, οι δείκτες τρωτότητας των κτιρίων πρέπει να αντιστοιχούν με την κατάσταση των κτιρίων πριν το σεισμό του 2003. Το εγχείρημα αυτό παρουσίασε δυσκολίες, καθώς δεν υπήρχε ακριβής απογραφή των κτιρίων κατά των προηγούμενων του σεισμού ημερών. Χρησιμοποιώντας την απογραφή της ΕΛΣΤΑΤ του 2001 και την δική μας απογραφή του 2012, ταυτοποιήσαμε τα κτίρια που είχαν παραμείνει ανέπαφα. Τα στοιχεία της απογραφής των κτιρίων του 2011 δεν ήταν διαθέσιμα.

Με τη βοήθεια των φύλλων απογράφης ζημιών του ΤΑΣ και σε συνδυασμό με τα στοιχεία της απογραφής του 2001, εκτιμήθηκαν τα χαρακτηριστικά των κτιρίων που έχουν σήμερα αντικατασταθεί από άλλα, (Σχ.58) ή έχουν επισκευαστεί σημαντικά εξαιτίας των βλαβών που είχαν υποστεί κατά τον εν λόγω σεισμό, ή έχουν κατεδαφιστεί (Σχ.59).



Σχήμα 57 Κατανομή των κτιρίων σύμφωνα με το δείκτη τρωτότητας και το υλικό κατασκευής.



Σχήμα 58 Σύγχρονα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα κτίρια που βρίσκονταν στη θέση τους, κατά το σεισμό του 2003, σύμφωνα με την περιγραφή του ΤΑΣ, ήταν πέτρινα εγκαταλελειμμένα και χαρακτηρίστηκαν κίτρινα. (Καλαντώνη – Παύλου, 11-07-2012)

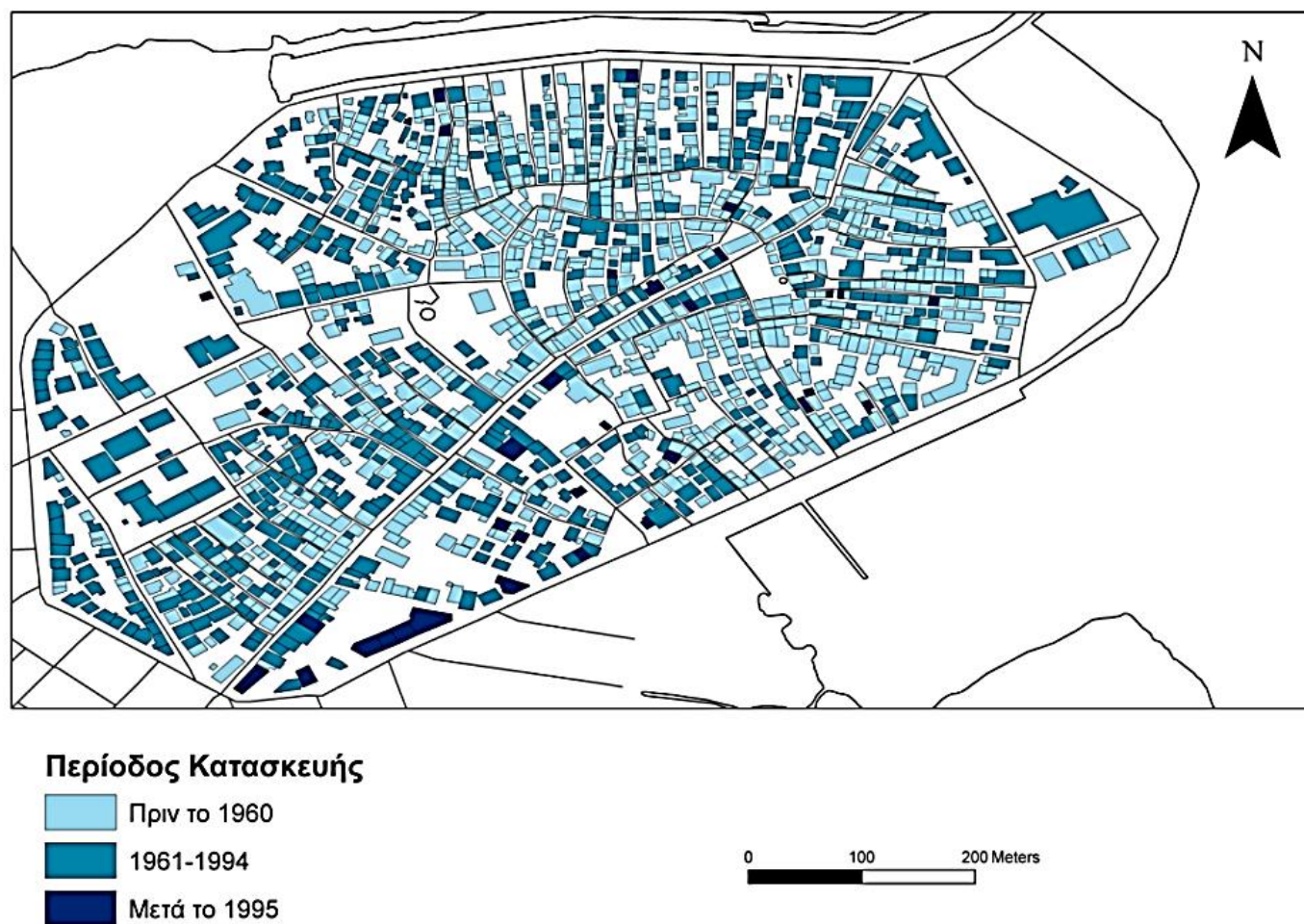
Έτσι δημιουργήθηκε μια νέα βάση δεδομένων με τα χαρακτηριστικά των κτιρίων κατά το 2003. Μεγάλος αριθμός κτιρίων δεν παρουσιάζουν μεταβολές. Για κάθε κτίριο εκτιμήθηκαν εκ νέου τα χαρακτηριστικά που καθορίζουν τον δείκτη τρωτότητας. Αξιολογήθηκε το υλικό δόμησης, ο αριθμός ορόφων, η περίοδος κατασκευής, η ύπαρξη ασταθούς ορόφου- κανονικότητα, η θέση στο

οικοδομικό τετράγωνο και η διαφορά ύψους με τα κτίρια που εφάπτεται. Τα αποτελέσματα προβλήθηκαν σε νέους χάρτες (Σχ. 60, 61, 62, 63).

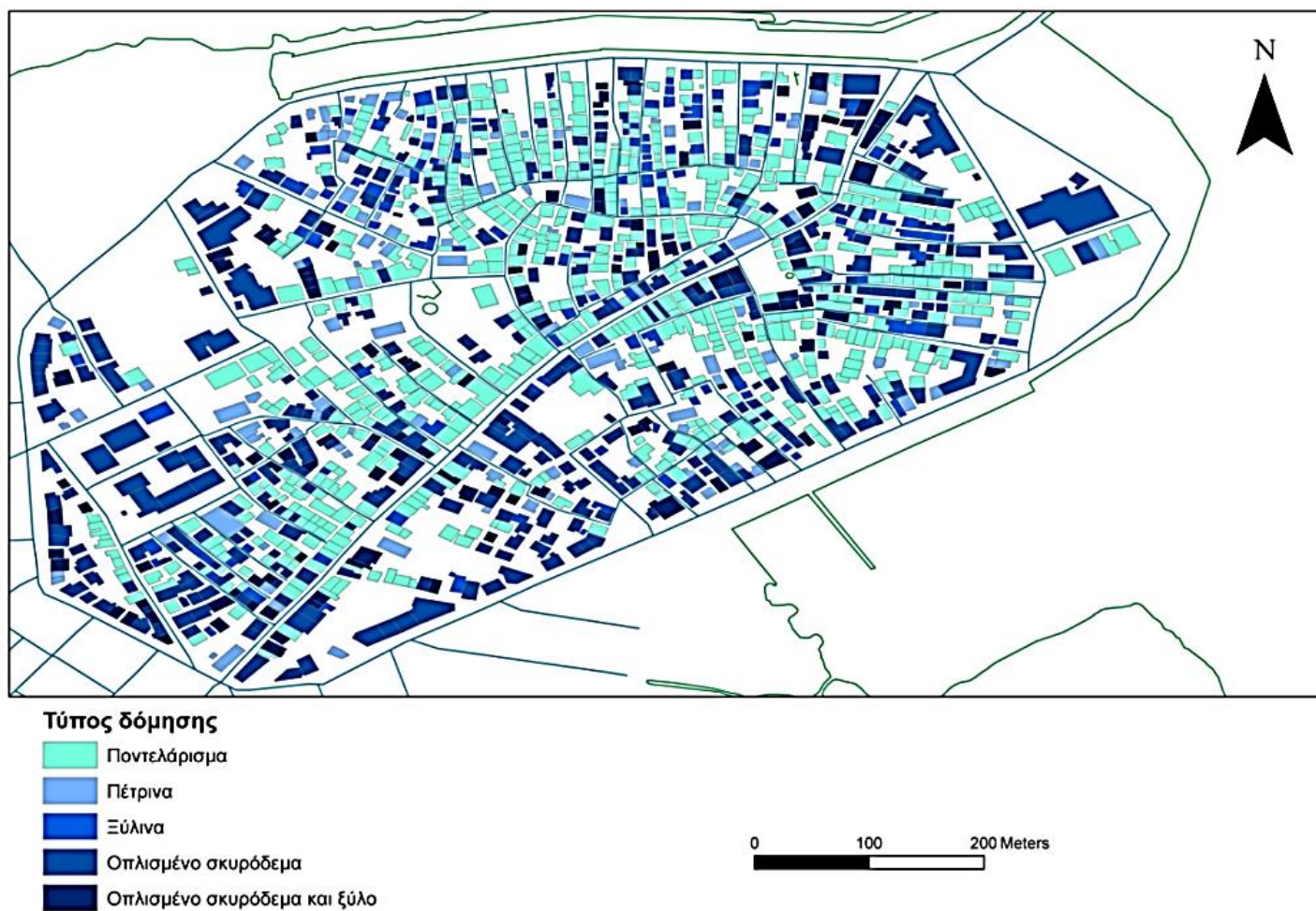


Σχήμα 59 Ξυλόπηκτος τοίχος κτιρίου που κατεδαφίστηκε λόγω σοβαρής βλάβης μετά το σεισμό (Καλαντώνη – Παύλου, 13-07-2012)

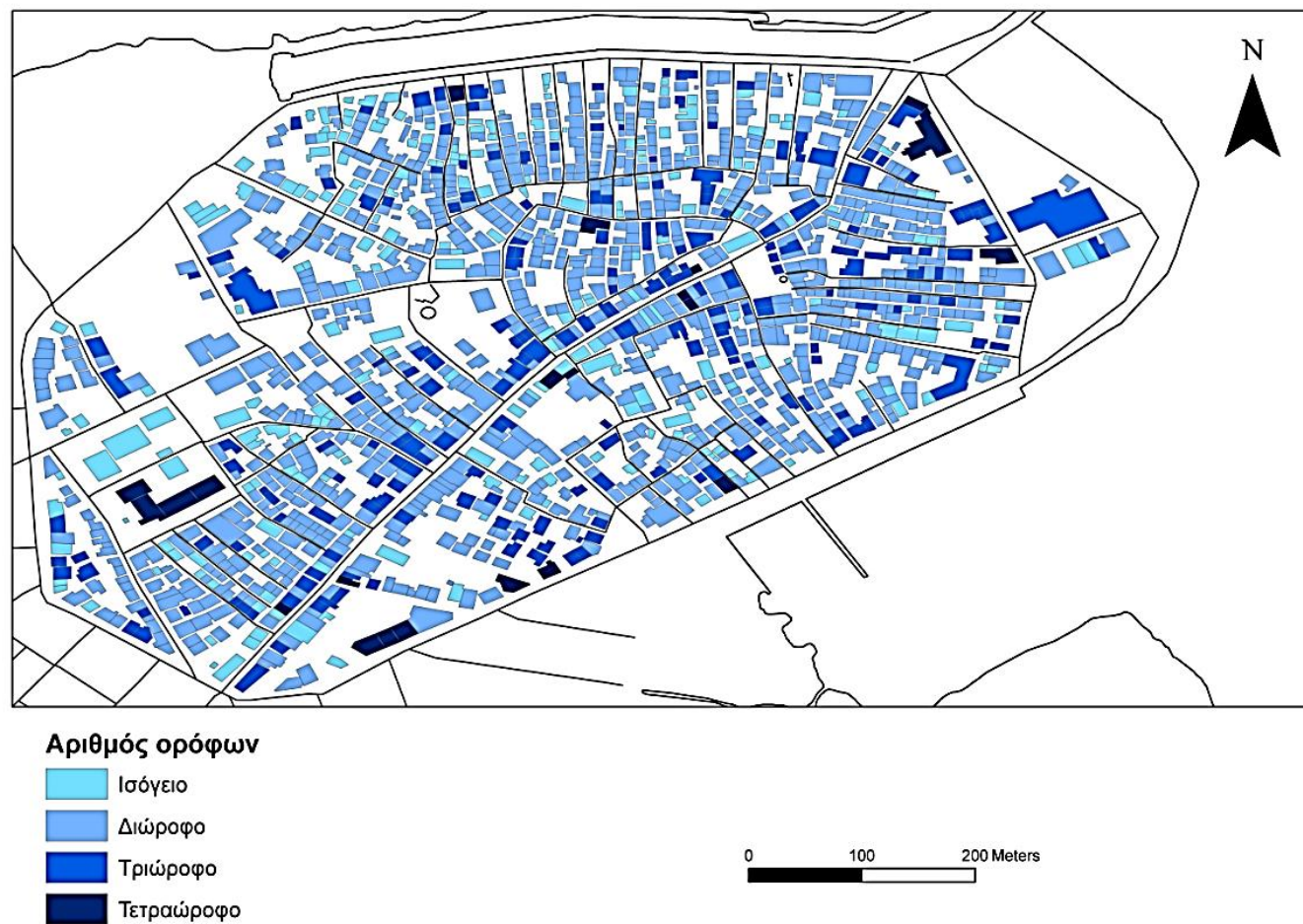
Ιδιαίτερη προσοχή χρειάστηκε στην αξιολόγηση της κατάστασης συντήρησης των κτιρίων. Θεωρήθηκε ότι ήταν ίδια για όλα τα κτίρια, με εξαίρεση εκείνα για τα οποία υπήρχαν δεδομένα στα φύλλα απογραφής βλαβών που αποδείκνυαν διαφορετική συντήρηση. Η παραδοχή αυτή δεν είναι απόλυτα ορθή, αλλά είναι η καλύτερη δυνατή. Υπολογίστηκε για κάθε κτίριο η τάξη (Σχ. 64) και ο δείκτης τρωτότητάς του (Σχ. 65) ακολουθώντας τα παραπάνω κριτήρια. Τα πιο τρωτά κτίρια βρίσκονται στο κέντρο της πόλης και γύρω από τον κεντρικό εμπορικό δρόμο. Συγκρίνοντας τους επόμενους χάρτες προκύπτει ότι τα πιο τρωτά κτίρια είναι παραδοσιακά, με χαμηλό βαθμό συντήρησης.



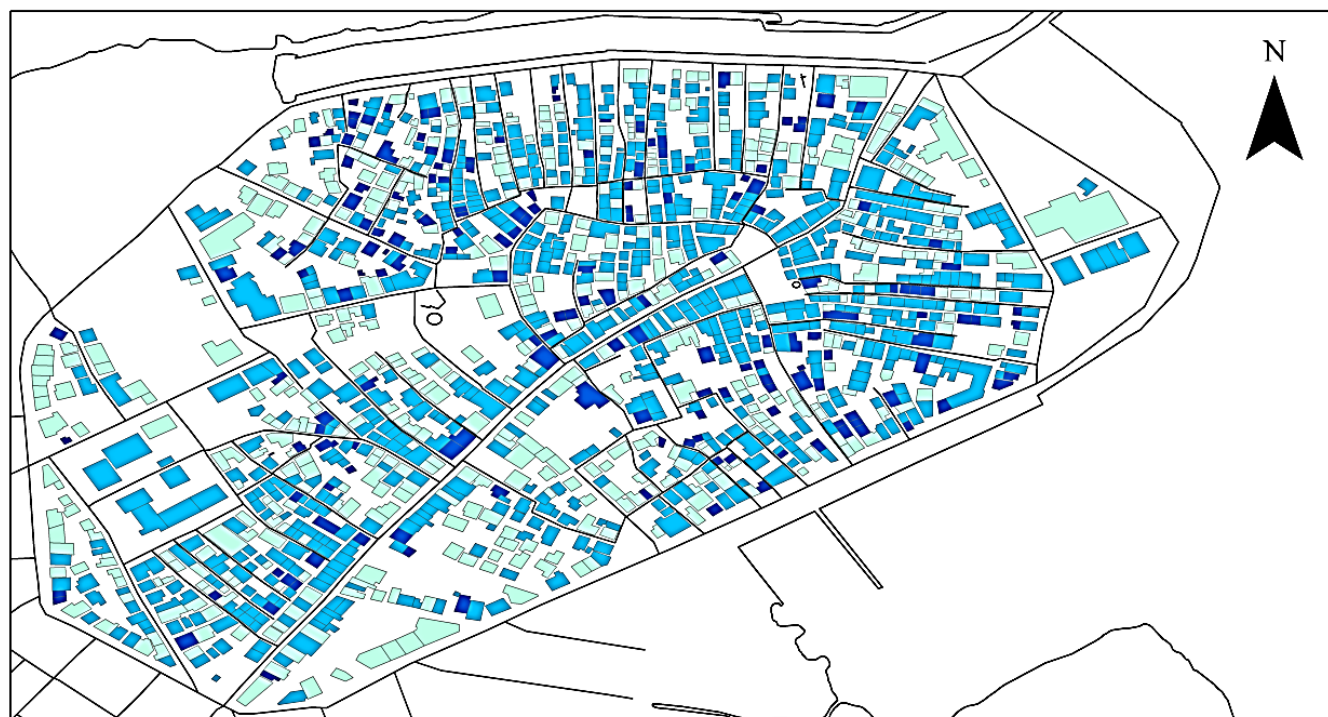
Σχήμα 60 Κατανομή των κτιρίων πριν το 2003 σύμφωνα με την περίοδο κατασκευής



Σχήμα 61 Κατανομή των τύπων κτιρίων πριν το 2003



Σχήμα 62 Κατανομή των κτιρίων κατά αριθμό ορόφων πριν το 2003.

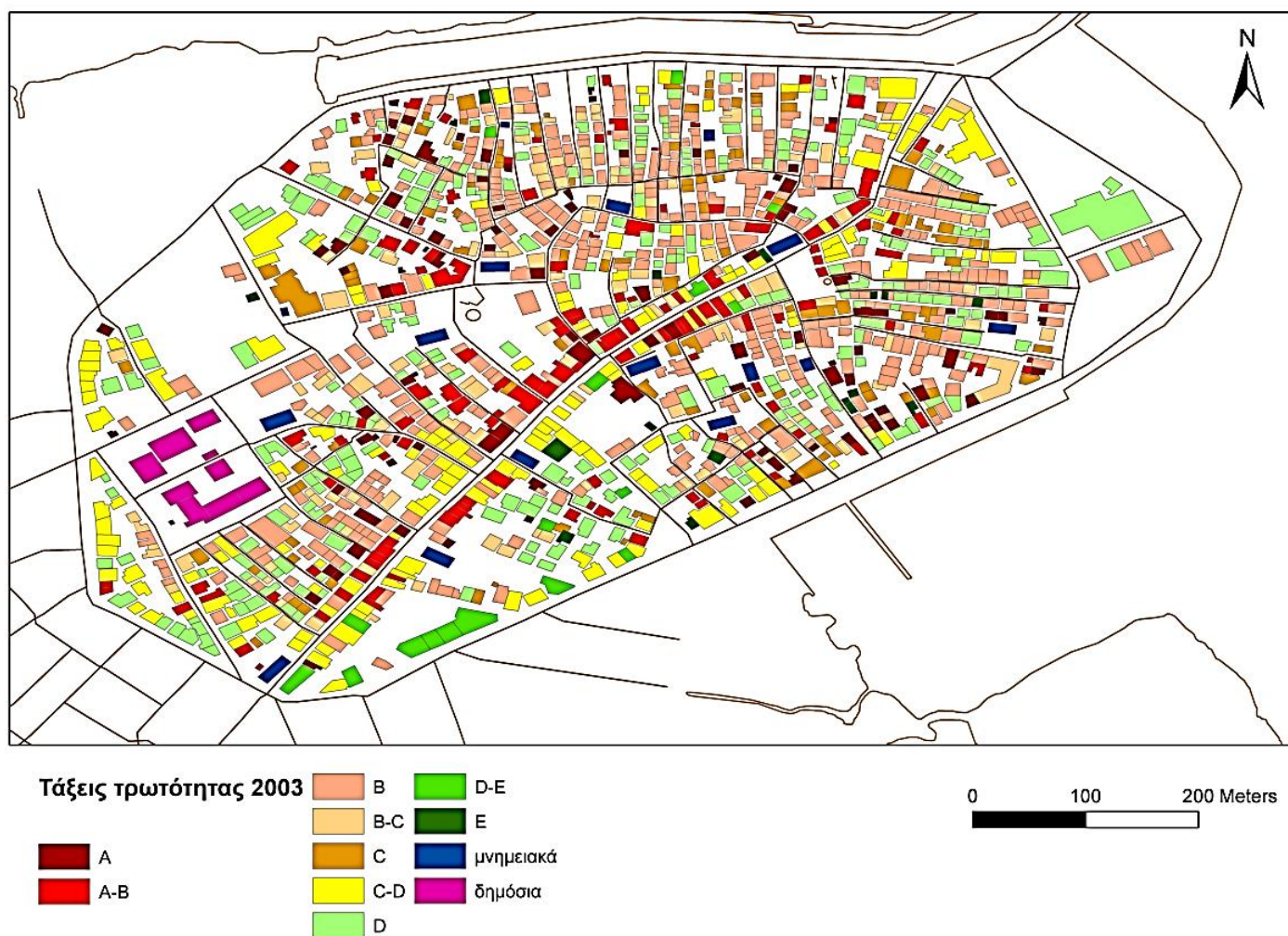


Κατάσταση συντήρησης

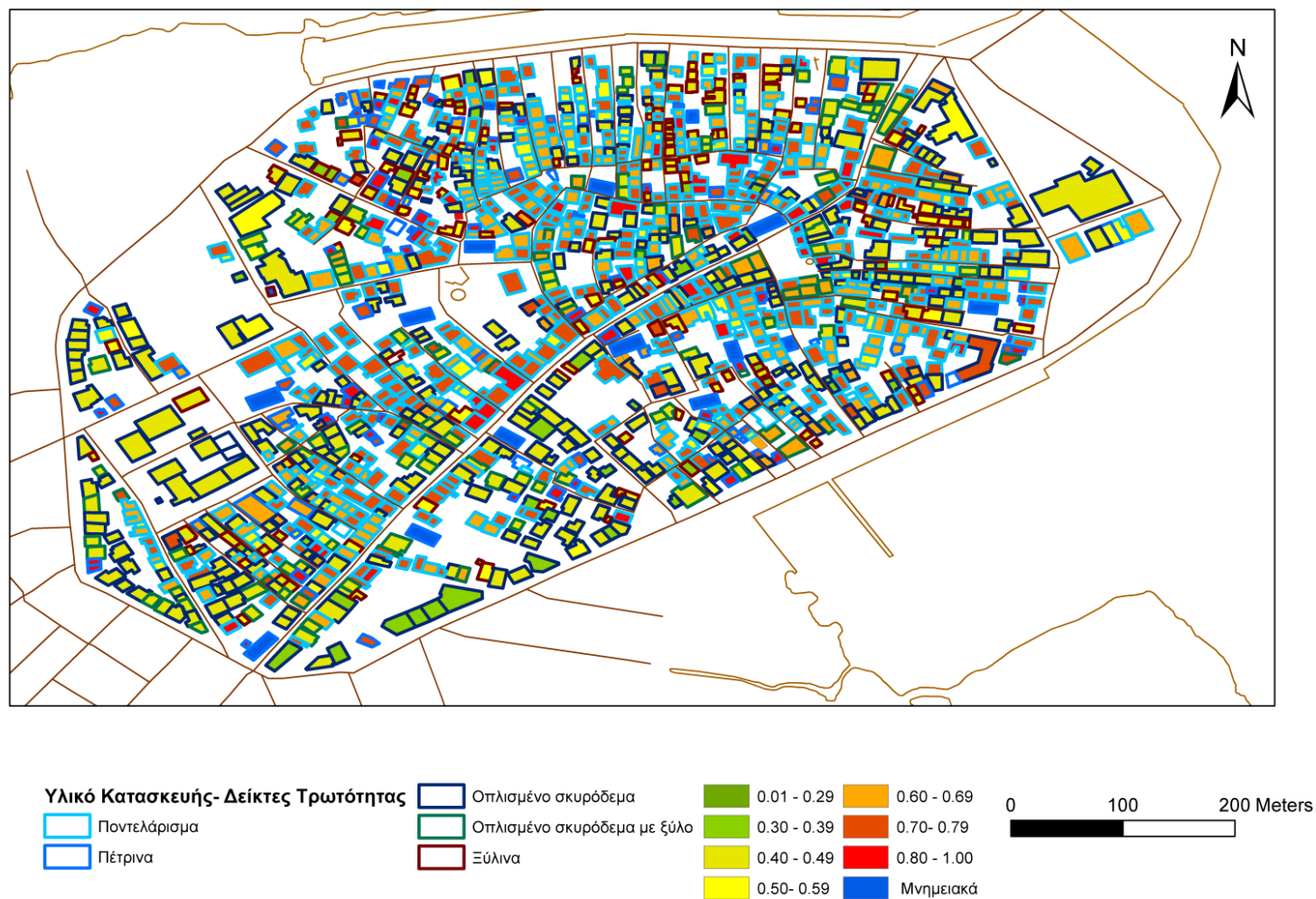
- Υψηλή
- Μέτρια
- Χαμηλή

0 100 200 Meters

Σχήμα 63 Κατανομή των κτιρίων σύμφωνα με την κατάσταση συντήρησης



Σχήμα 64 Χωροταξική κατανομή των τάξεων τρωτότητας των κτιρίων κατά το 2003



Σχήμα 65 Οι δείκτες τρωτότητας των κτιρίων σε σχέση με το υλικό δόμησης πριν το σεισμό του 2003

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ανάλυση βλαβών του σεισμού του 2003

Όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, στις 14 Αυγούστου 2003 σεισμός μεγέθους $M_w = 6.2$ έπληξε το νησί της Λευκάδας. Το επίκεντρο ήταν σε απόσταση περίπου 13 km από τη παλιά πόλη της Λευκάδας (Benetatos et al., 2005; Zahradnik et al., 2005; Papadimitriou et al., 2006; Benetatos et al., 2007). Στο κεφάλαιο αυτό αναλύονται οι βλάβες που υπέστησαν τα κτίρια της παλιάς πόλης από αυτό το σεισμό.

Μετά το σεισμό του 2003 πραγματοποιήθηκαν δυο απογραφές ζημιών από ειδικούς επιστήμονες του Τομέα Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων. Κατά την πρώτη καταγραφή, εντοπίστηκαν τα κτίρια που ήταν επικίνδυνα να κατοικηθούν προσωρινά ή μόνιμα. Κατά τη δεύτερη, συμπληρώθηκαν από τους αρμόδιους επιστήμονες δελτία βλαβών σύμφωνα με τα πρότυπα του ΟΑΣΠ (Dandoulaki et al., 1998). Στα δελτία αυτά (Σχ. 66) καταγράφονται στοιχεία ιδιοκτητών (που δεν αφορούν στη μελέτη), διευθύνσεις κτιρίων, λοιπά στοιχεία κτιρίων, όπως υλικά κατασκευής, αριθμός ορόφων, περίοδος κατασκευής, περιγραφές βλαβών, καθώς και χαρακτηρισμοί κτιρίων σύμφωνα με την ασφάλεια στη χρήση τους.

Οι χαρακτηρισμοί των κτιρίων ήταν οι ακόλουθοι:

- Πράσινο: χωρίς δομικές βλάβες και / ή με μικρές μη δομικές βλάβες, ήτοι κατάλληλο για χρήση.
- Πράσινο – Κίτρινο: με μικρές βλάβες ή μεσαίες βλάβες, κυρίως στη φέρουσα λιθοδομή του ισογείου ή στις πλινθοδομές πλήρωσης των επάνω ορόφων.
- Κίτρινο: με μεσαίες δομικές βλάβες και / ή σοβαρές μη δομικές βλάβες, ήτοι προσωρινά ακατάλληλο για χρήση.
- Κόκκινα: με σοβαρές δομικές βλάβες, δηλαδή ακατάλληλο για χρήση.

Για τα κτίρια που χαρακτηρίστηκαν κόκκινα ακολούθησαν πρωτόκολλα κατεδάφισης. Για να υπάρξει κτιριακός έλεγχος κατόπιν σεισμού, έπρεπε να γίνει σχετική αίτηση από τους ιδιοκτήτες. Για κάποια κτίρια δεν ζητήθηκε να

ελεγχθούν, επομένως θεωρούμε ότι δεν είχαν υποστεί καμία βλάβη, χωρίς όμως αυτό να είναι σίγουρο.

Τηλ. 23/06
Τηλ. 23/06

Β. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΤΙΡΙΟΥ
Αριθμός ορόφων 2 Αριθμός διαμερισμάτων 1 Χρόνος κατασκευής 1950

Χρήση/εις:
☒ Κατοικία
☐ Κατάστημα
☐ Γραφεία

Χώρος στάθμευσης:
☐ Χώρος στάθμευσης
☐ Σχολείο
☐ Ξενοδοχείο

Δημόσια υπηρεσία:
☐ Δημόσια υπηρεσία
☐ Εκκλησία
☐ Αποθήκη

Βιοτεχνία / Βιομηχανικό κτίριο:
☐ Βιοτεχνία / Βιομηχανικό κτίριο
☐ Αγροτική χρήση / Σταύλος
☐ Άλλο

Είδος φέροντος οργανισμού:
☐ Σκελετός οπλισμένου σκυροδέματος
☐ Κατακόρυφα στοιχεία από φέροντα τοιχοποιία και οριζόντια από οπλισμένο σκυροδέμα, ξύλο, χάλυβα κλπ.
☐ Μικτή κατασκευή (κατακόρυφα στοιχεία από οπλισμένο σκυροδέμα και φέροντα τοιχοποιία)
☒ Άλλο

Ασυνέχεια σε όροφο (π.χ. πιλοτή, καταστήματα χωρίς τοιχοπληρώσεις) ΝΑΙ ☐ ΟΧΙ ☐
Υπόγειο ΝΑΙ ☐ ΟΧΙ ☐
Το κτίριο χρησιμοποιείται σήμερα ΝΑΙ ☒ ΟΧΙ ☐

Γ. ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΧΡΗΣΗ

Κτίριο κατάλληλο για χρήση (ΠΡΑΣΙΝΟ) ☒ Το κτίριο επιτρέπεται να χρησιμοποιείται.

Κτίριο προσωρινά ακατάλληλο για χρήση (ΚΙΤΡΙΝΟ) ☐ Το κτίριο δεν επιτρέπεται να χρησιμοποιείται πριν επανεξεταστεί κατά το δευτεροβάθμιο έλεγχο. Θα πρέπει να ληφθούν αμέσως τα μέτρα ασφαλείας που αναφέρονται στην έκθεση αυτή.

Κτίριο ακατάλληλο για χρήση (ΚΟΚΚΙΝΟ) ☐ Υπάρχει άμεσος κίνδυνος. Το κτίριο ή τμήματά του μπορεί να καταρρεύσουν ξαφνικά. Απαγορεύεται η είσοδος σε αυτό. Πρέπει να ληφθούν αμέσως τα μέτρα ασφαλείας που αναφέρονται στην έκθεση αυτή. Το κτίριο θα επανελεγχθεί από Επιτροπή Μηχανικών κατά τον δευτεροβάθμιο έλεγχο.

Η εκτίμηση που έγινε ισχύει: για το σύνολο του κτιρίου ☒ για τμήμα του κτιρίου ☐

Ελεγχος εξωτερικά μόνο ☐
Ελεγχος εσωτερικά και εξωτερικά ☒

Αριθμός νοικοκυριών που μένουν άστεγα

Δ. ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ
Απαιτείται να εμποδιστεί η πρόσβαση στις εξής περιοχές

Να αποσυνδεθούν τα δίκτυα ηλεκτροδότησης ☐ ύδρευσης ☐ υγραερίου ☐

Απαιτείται άμεση υποστήριξη του κτιρίου

Πρέπει να κατεδαφιστούν ή να απομακρυνθούν τα εξής στοιχεία

Ε. ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ελαφρές ρωγμές

Ημερομηνία 22/8/03 Ωρα

ΟΙ ΤΕΧΝΙΚΟΙ

1. Υπογραφή Ονομα Ειδικότητα

2. Υπογραφή Ονομα Ειδικότητα

Σχήμα 66 Αντίγραφο δελτίου απογραφής βλαβών.

Ο χαρακτηρισμός πράσινο - κίτρινο δεν συναντάται συνήθως στις καταγραφές ζημιών άλλων περιοχών. Σχετίζεται κυρίως με κτίρια διπλού τρόπου δόμησης. Η επεξήγηση του χαρακτηρισμού αυτού δόθηκε από τους πολιτικούς μηχανικούς του ΤΑΣ.

Στην πόλη της Λευκάδας κατέρρευσε ένα σπίτι που όμως βρισκόταν εκτός του ιστορικού κέντρου που αποτελεί τη γεωγραφική θέση ενδιαφέροντος της εν λόγω διατριβής. Πρόκειται για τριώροφο κτίριο από οπλισμένο σκυρόδεμα με ισχυρή μπατική τοιχοποιία στο πίσω τμήμα του ισογείου, αλλά με μεγάλα ανοίγματα τα οποία δημιουργούσαν κοντά υποστυλώματα. Τα υποστυλώματα αστόχησαν πλήρως με αποτέλεσμα την ανάπτυξη κλίσης στο κτίριο και

επομένως την αστοχία του φέροντος οργανισμού (Σχ.67). Το κτίριο αυτό αποτελεί μεμονωμένο περιστατικό.



Σχήμα 67 Το σπίτι που κατέρρευσε μετά το σεισμό του 2003 (ΙΤΣΑΚ, 2004)

Κατά τη διάρκεια της δεύτερης επιτόπιας έρευνας (Οκτώβριος 2014) επισκεφτήκαμε το γραφείο του ΤΑΣ και μελετήσαμε τα φύλλα της δεύτερης απογραφής ζημιών (Σχ. 68). Εντοπίστηκαν μέσα στην πόλη τα κτίρια που είχαν υποστεί βλάβες και αναλύθηκαν οι βλάβες για κάθε τύπο κτιρίου.

Στα κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης οι συνηθέστερες βλάβες, όπως προκύπτουν από τα φύλλα απογραφής, αφορούν στην τοιχοποιία του ισόγειου. Επίσης αναφέρονται ρωγμές στο υλικό πλήρωσης του ξύλινου σκελετού των πάνω ορόφων. Παρόλα αυτά, η συμπεριφορά αυτών των κτιρίων ήταν ικανοποιητική. Το δευτερεύον δομικό σύστημα συνέβαλε στην δομική ευστάθεια των κτιρίων, επαληθεύοντας την χρησιμότητά του. Αντίστοιχα ρωγμές και μερική κατάρρευση σε σπάνιες περιπτώσεις στην τοιχοποιία αναφέρονται και στα πέτρινα κτίρια. Στα ξύλινα οι βλάβες περιορίζονται κυρίως σε ρωγμές στους τοίχους πλήρωσης και αποκόλληση δοκαριών από την τοιχοποιία. Σε πολλές περιπτώσεις κτιρίων με ξύλινη στέγη

καλυμμένη με κεραμίδια παρουσιάστηκε αποκόλληση και πτώση των κεραμιδιών.

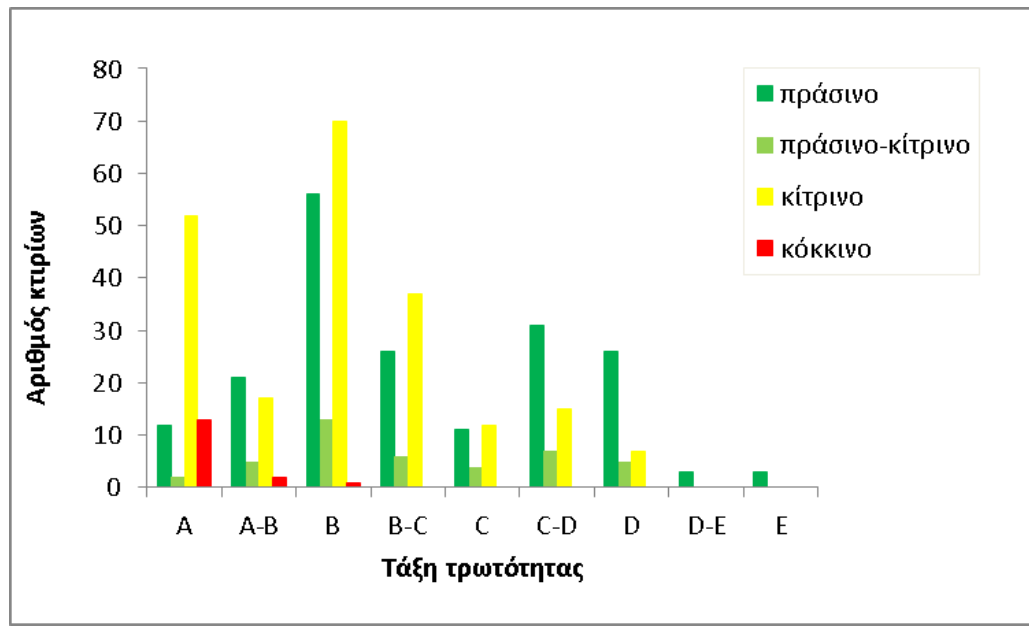
Σε κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα παρουσιάστηκαν διαγώνιες ρωγμές στους τοίχους πλήρωσης, ρωγμές σε κολώνες και δοκάρια, αποκόλληση τοίχων και οξείδωση οπλισμού στη βάση κολώνων του ισογείου. Τα κτίρια αυτού του δομικού τύπου συμπεριφέρθηκαν καλύτερα από τα παραδοσιακά.

Αναλύθηκαν επίσης οι βλάβες ανά τάξη τρωτότητας (πίνακας 13) και για τα επιμέρους χαρακτηριστικά των κτιρίων. Τα κτίρια που έπαθαν τις σοβαρότερες βλάβες ανήκουν στις τάξεις τρωτότητας A, A-B και λίγα στην τάξη B. Στην τάξη τρωτότητας B εντάσσονται πέτρινα κτίρια ή κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης, ισόγεια ή διώροφα (Σχ.68, 69). Το αποτέλεσμα της ανάλυσης ήταν πρόδηλο, αφού ακόμα και ο αριθμός ορόφων (Σχ. 70) αιτιολογείται από το γεγονός ότι τα περισσότερα πέτρινα κτίρια είναι ισόγεια, ενώ τα κτίρια από ποντελάρισμα διώροφα.

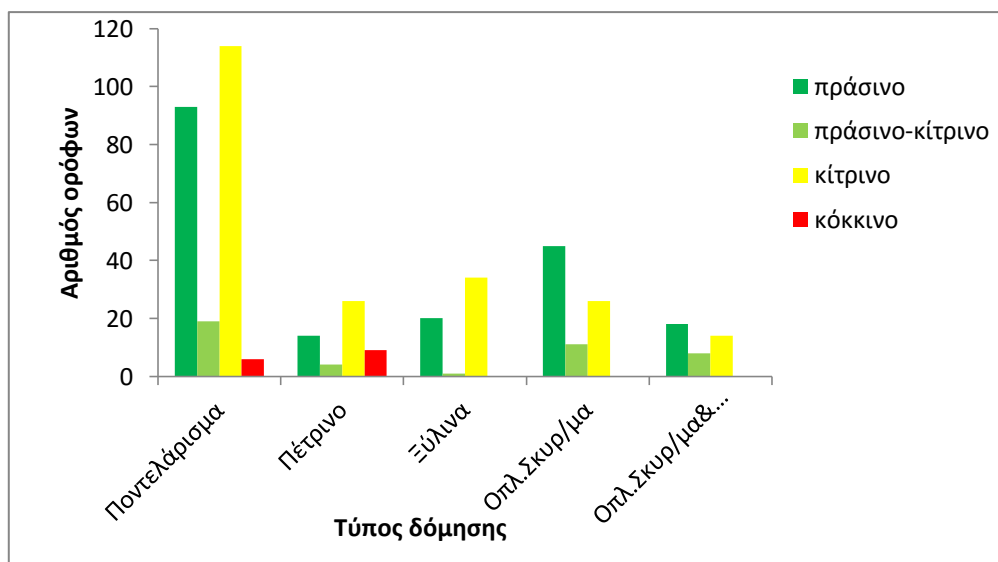
Τα μνημειακά και τα δημόσια κτίρια δεν έχουν συμπεριληφθεί στον πίνακα 13 εφόσον η εκτίμηση της τάξης τρωτότητάς τους δεν ήταν αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Όλες σχεδόν οι εκκλησίες, που αποτελούν τα μνημειακά κτίρια της πόλης, έχουν κατασκευαστεί από τον 18ο αιώνα. Πέντε από τις εκκλησίες της πόλης χαρακτηρίστηκαν 'κίτρινες'. Δεν παρουσιάστηκαν βλάβες σε καμπαναριά, καθώς στις περισσότερες εκκλησίες έχουν κτιστεί μετά τον σεισμό του 1948.

Πίνακας 13 Κατανομή βλαβών των κτιρίων ανά τάξη τρωτότητας

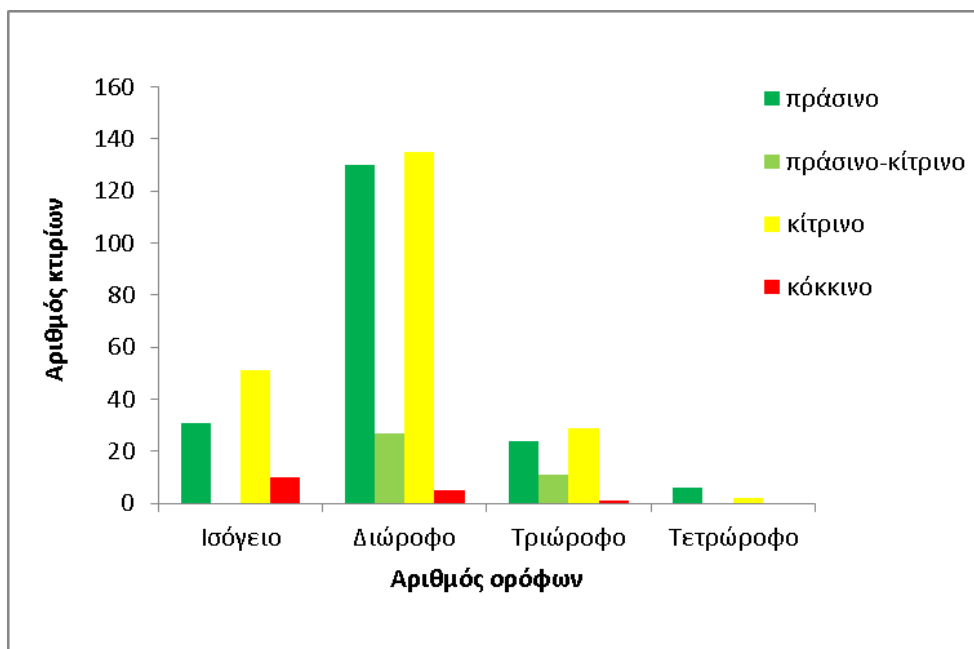
Τάξη Τρωτότητας	Πράσινα		Πράσινα-Κίτρινα		Κίτρινα		Κόκκινα		Χωρίς βλάβες	
	(%)	Αρ.κτ.	(%)	Αρ.κτ.	(%)	Αρ.κτ.	(%)	Αρ.κτ.	(%)	Αρ.κτ.
A	7.95	12	1.32	2	34.44	52	8.61	13	47.68	72
A-B	17.07	21	4.07	5	13.82	17	1.63	2	63.41	78
B	13.43	56	3.12	13	16.79	70	0.24	1	66.43	277
B-C	15.85	26	3.66	6	22.56	37	-	-	57.93	95
C	11	11	4	4	12	12	-	-	73	73
C-D	18.9	31	4.27	7	9.15	15	-	-	67.68	111
D	9.74	26	1.87	5	2.62	7	-	-	85.77	229
D-E	16.67	3	-	-	-	-	-	-	83.33	15
E	16.67	3	-	-	-	-	-	-	83.33	15



Σχήμα 68 Κατανομή του τύπου βλάβης σύμφωνα με την τάξη τρωτότητας.



Σχήμα 69 Κατανομή του τύπου βλάβης σύμφωνα με το δομικό υλικό.



Σχήμα 70 Κατανομή του τύπου βλάβης ανάλογα με το ύψος.

Οι χαρακτηρισμοί πράσινο, πράσινο - κίτρινο, κίτρινο και κόκκινο σχετίζονται με το βαθμό ασφάλειας στη χρήση του κτιρίου μετά το σεισμό, όμως δεν υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισής τους απευθείας με τους πιθανούς βαθμούς βλάβης, όπως αυτοί υπολογίστηκαν βάσει του προτεινόμενου μοντέλου περιγραφής βλαβών της EMS-98. Η μετατροπή των ποιοτικών χαρακτηρισμών βλάβης μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση ενός συστήματος διακριτών τιμών για την κατάταξη των βαθμών βλάβης (Karababa and Pomonis, 2011).

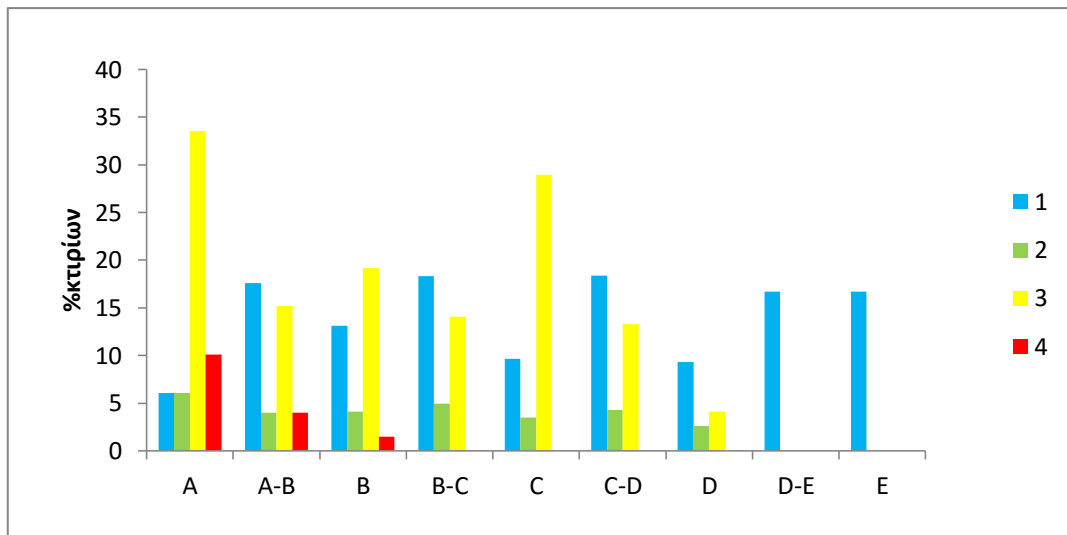
Έχουν προταθεί διάφορα συστήματα διαβάθμισης βλαβών, όπως για παράδειγμα των Whitman et al., 1973; Medvedev, 1977; Grünthal, 1998; FEMA and NIBS, 2003). Στα περισσότερα συστήματα ο βαθμός βλάβης διακρίνεται σε *ελαφρύ, μέτριο, σοβαρό, πολύ σοβαρό, κατάρρευση*. Ακριβείς περιγραφές κάθε βαθμού καθορίζονται κατ' αντιστοιχία ανά σύστημα. Ο πίνακας βλαβών που χρησιμοποιήσαμε είναι αυτός που προτείνει η EMS-98 (Grünthal, 1998), αφού σύμφωνα με αυτήν έχουν αξιολογηθεί ο δείκτης και η τάξη τρωτότητας, καθώς και ο πιθανός βαθμός βλάβης κατά τις προσομοιώσεις σεισμικών σεναρίων (Giovinazzi and Lagomarsino, 2004).

Αναλύθηκαν όλα τα πρωτόκολλα κτιριακών ζημιών, λαμβάνοντας υπόψη την ακριβή περιγραφή των βλαβών. Για τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα και τα πέτρινα, η περιγραφή των δομικών και μη δομικών βλαβών κάθε βαθμού είναι καθορισμένη. Για τα ξύλινα κτίρια, η αξιολόγηση του βαθμού βλάβης βασίστηκε στη βιβλιογραφία (Anagnostopoulos, 1994; Arnold, 2003). Για τα κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης υιοθετήσαμε τη μέθοδο των Karababa and Romonis (2011), συνδυάζοντας το βαθμό βλάβης καθενός από τα δομικά συστήματα, αλλά δίνοντας έμφαση στο δομικό σύστημα με τη σοβαρότερη βλάβη ανά περίπτωση. Αυτή η παραδοχή όμως μπορεί να προκαλέσει υπερεκτίμηση του βαθμού βλάβης, καθώς τα δομικά συστήματα μπορούν να έχουν επιπλέον αποθέματα αντοχής, τα οποία όμως δεν διαφαίνονται όταν αξιολογείται η βλάβη των συστημάτων τους ξεχωριστά. Οι τύποι ζημιών που καθόρισαν την αξιολόγηση του βαθμού βλάβης περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 14). Για κάθε κτίριο αποδόθηκε ένας βαθμός από το 1 έως το 5, όπως ακριβώς προτείνει η EMS.

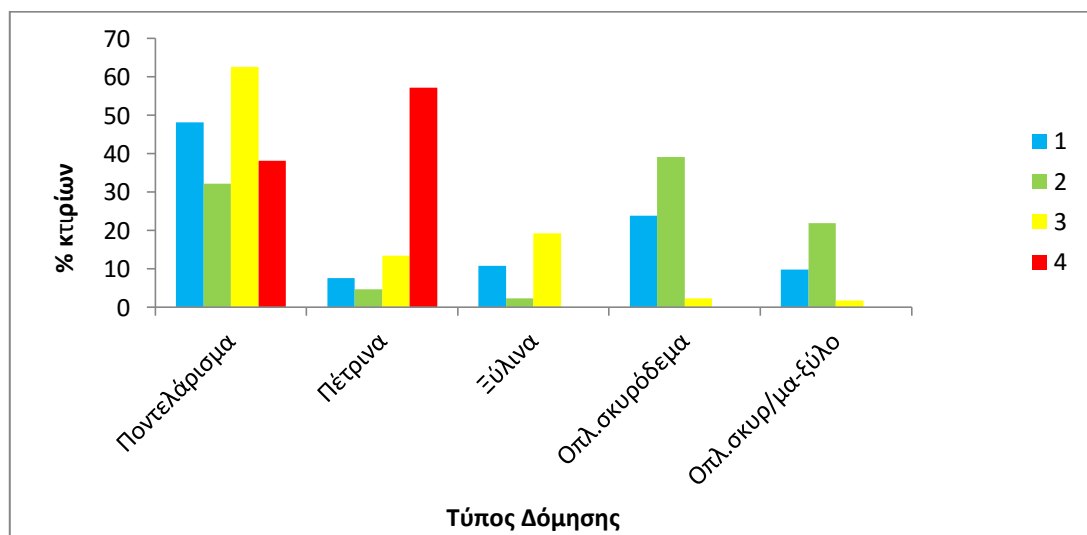
Τα κτίρια της παλιάς πόλης παρουσίασαν βαθμούς από 1 έως 4 αφού κανένα δεν κατέρρευσε. Βαθμό 4 παρουσίασαν κτίρια τάξης τρωτότητας A, A-B, και ελάχιστα B (Σχ.71). Επίσης είναι ισόγεια πέτρινα κτίρια ή διώροφα κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης (Σχ.72, 73). Λίγα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, υπέστησαν σημαντικές βλάβες στο φέροντα οργανισμό.

Πίνακας 14 Περιγραφή βλαβών ανά τύπο δόμησης και βαθμό βλάβης

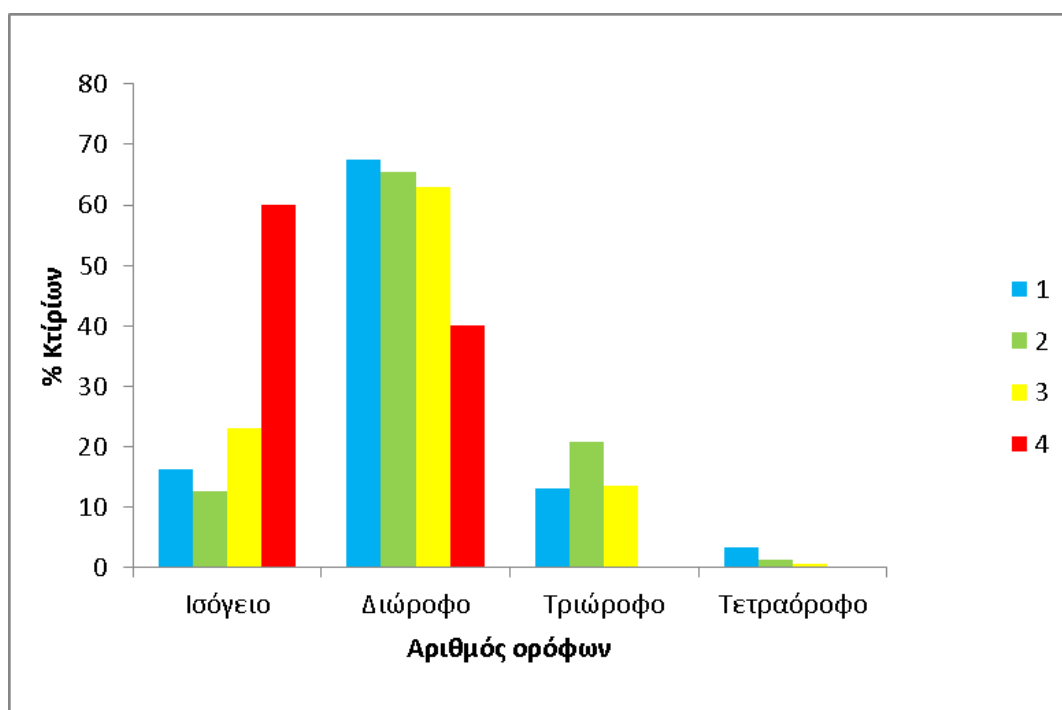
Βαθμός βλάβης 1 - 5	Τύπος Δόμησης		
	Πέτρινα	Ξύλινα	Οπλισμένο Σκυρόδεμα
1 - Μικρή ή αμελητέα βλάβη	Τριχοειδείς ρωγμές στην τοιχοποιία. Πτώση μικρών γύψινων τεμαχίων. Πτώση χαλαρών πετρών σε σπάνιες περιπτώσεις.	Τριχοειδείς ρωγμές στην τοιχοποιία. Πτώση μικρών γύψινων τεμαχίων. Τριχοειδείς ρωγμές στα γύψινα στοιχεία, στις γωνίες, στις πόρτες και στα παράθυρα.	Λεπτές ρωγμές σε γύψινα στοιχεία ή στη βάση των τοίχων. Λεπτές ρωγμές σε ενδιάμεσους τοίχους.
2 - Μεσαία βλάβη	Ρωγμές σε πολλούς τοίχους. Πτώση μεγάλων τεμαχίων γύψου. Μερική πτώση καμινάδων.	Κάθετες ρωγμές στις γωνίες ή στους τοίχους. Μεγάλες ρωγμές στο γύψο. Πτώση κεραμιδιών από τη στέγη.	Ρωγμές σε κολώνες και δοκάρια. Πτώση σοβάδων από τοίχους. Πτώση γύψινων στοιχείων.
3 - Ουσιώδης - σοβαρή βλάβη	Μεγάλες και εκτεταμένες ρωγμές σε πολλούς τοίχους. Απόσπαση κεραμιδιών από την οροφή. Αστάθεια μη δομικών στοιχείων. Κατάρρευση καμινάδων.	Οριζόντιες ρωγμές στους τοίχους και μεγάλες ρωγμές στα ανοίγματα. Διαρκής παραμόρφωση των τοίχων κατά μήκος των ξύλινων δοκαριών. Διαχωρισμός των τοίχων από τα δοκάρια. Διαχωρισμός στέγης από τους τοίχους.	Ρωγμές σε κολώνες και δοκάρια στη βάση και στις συνδέσεις πολλών τοίχων. Μεγάλες ρωγμές σε ενδιάμεσους τοίχους. Θρυμματισμός επικάλυψης σκυροδέματος.
4 - Πολύ σοβαρή βλάβη	Σοβαρές αστοχίες σε τοίχους. Μερική κατάρρευση ορόφων και στεγών.	Μερική κατάρρευση τοίχων και ρωγμές στη θεμελίωση. Κατάρρευση στεγών.	Μεγάλες ρωγμές σε δομικά στοιχεία. Αστοχία σε οπλισμένα δοκάρια και κολώνες. Κατάρρευση κολώνων ή μεμονωμένου πάνω ορόφου
5 - Κατάρρευση	Ολική κατάρρευση	Ολική κατάρρευση	Κατάρρευση ισογείου ή μέρους του κτιρίου



Σχήμα 71 Κατανομή του βαθμού βλάβης των κτιρίων ανά τάξη τρωτότητας.



Σχήμα 72 Κατανομή του βαθμού βλάβης των κτιρίων ανά τύπο δόμησης.



Σχήμα 73 Κατανομή του βαθμού βλάβης των κτιρίων σύμφωνα με τον αριθμό ορόφων.

Οι βαθμοί βλάβης (Πίνακας 15), όπως αποδόθηκαν στα κτίρια, μπορούν να συγκριθούν με τους χαρακτηρισμούς πράσινο - κίτρινο – κόκκινο (Πίνακας 14) αλλά δεν ταυτίζονται, γεγονός που συμφωνεί με τη βιβλιογραφία (Kouskouna and Malakatas, 2000, Pomonis et al., 2013)

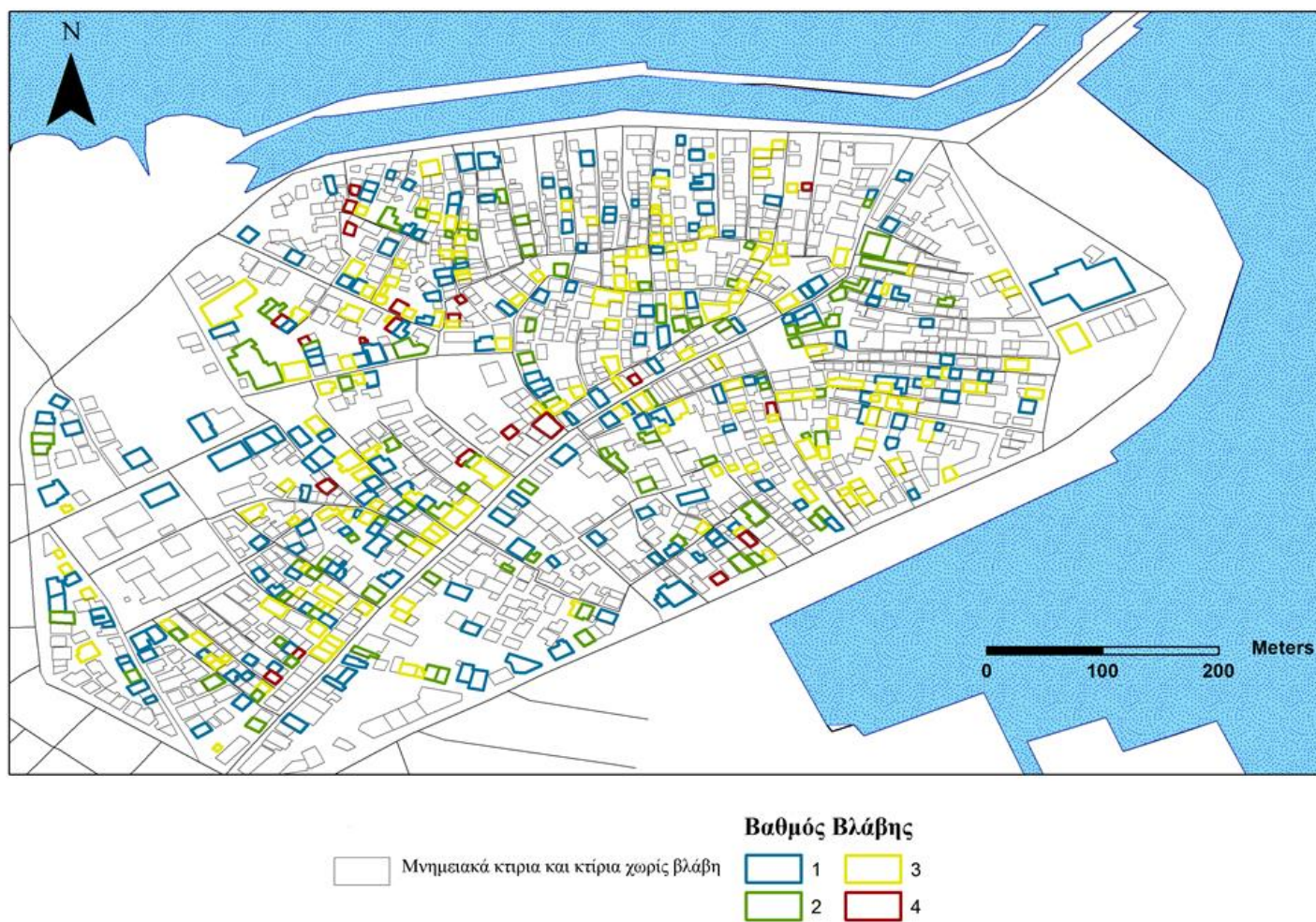
Τα περισσότερα πράσινα κτίρια έχουν χαρακτηριστεί με βαθμό βλάβης 1 (παρότι κάποια δεν παρουσίαζαν καμία βλάβη), ενώ τα χαρακτηρισθέντα κτίρια με πράσινο - κίτρινο (που ως επί το πλείστον είναι κτίρια από ποντελάρισμα), εντάχθηκαν στο βαθμό βλάβης 2. Τα κτίρια που χαρακτηρίστηκαν ως κίτρινα παρουσιάζουν ταξινομητικές διαφοροποιήσεις. Τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα εντάσσονται στους βαθμούς 2 ή 3, ενώ τα πέτρινα στους βαθμούς 3 ή 4. Τα κτίρια όμως αυτά, παρόλο το γεγονός πως δεν εκδόθηκαν γι' αυτά πρωτοκόλλα κατεδάφισης όπως συνέβη για τα καταταγμένα ως κόκκινα, παρουσιάζουν μέσω των περιγραφών τους μερική κατάρρευση τοίχων ή σκέπης, πράγμα που καθαυτό μας οδηγεί στο βαθμό 4, στο βαθμό δηλαδή με τον οποίο διακρίθηκαν τα κόκκινα.

Πίνακας 15 Αριθμητική και ποσοστιαία κατανομή του βαθμού βλάβης των κτιρίων ανά τάξη τρωτότητας. Το ποσοστό αφορά στα κτίρια που έχουν ελεγχθεί

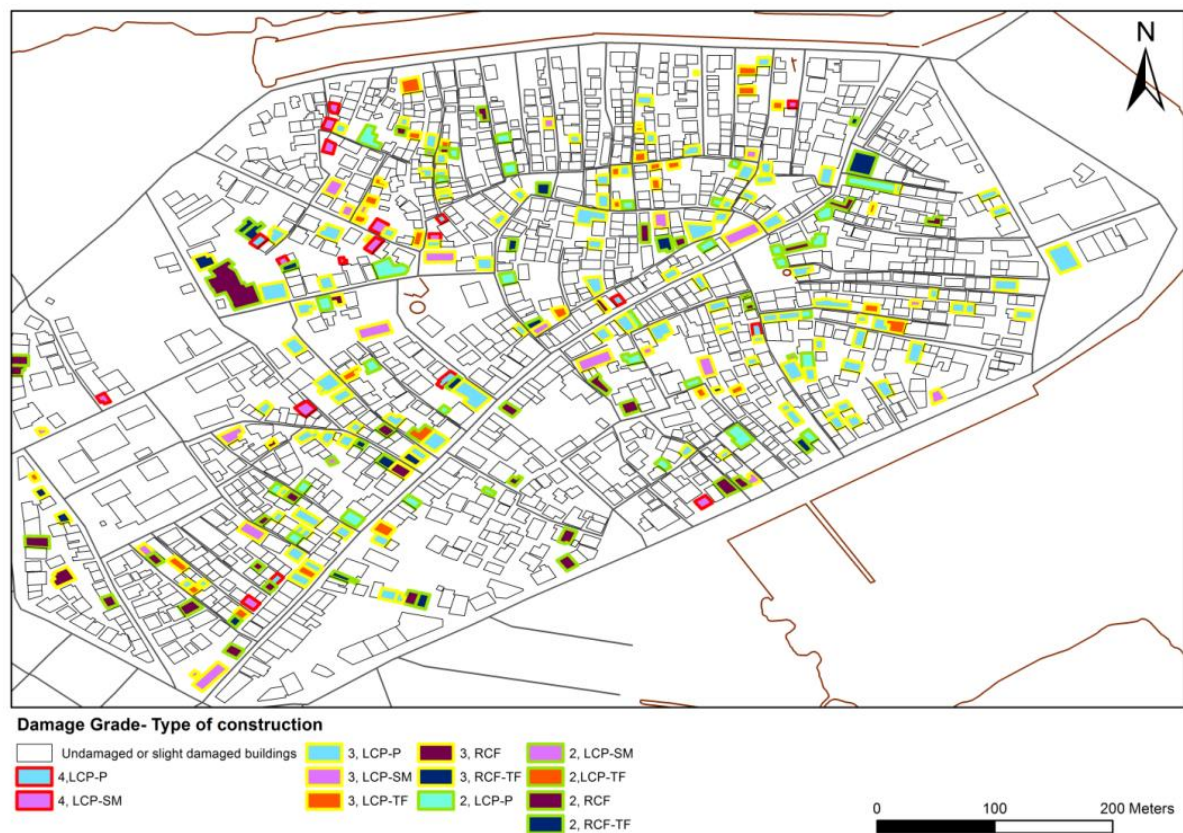
Τρωτότητα	Βαθμός Βλάβης							
	1		2		3		4	
	(%)	Αρ. Κτιρίων	(%)	Αρ. Κτιρίων	(%)	Αρ. Κτιρίων	(%)	Αρ. Κτιρίων
A	11.39	9	10,13	8	55.7	44	22.78	18
A-B	46.67	21	11,11	5	37.78	17	4.44	2
B	39.29	55	10,71	15	49.28	69	0.72	1
B-C	37.68	26	18,84	13	43.48	30	0	0
C	40.74	11	55,55	15	3.71	1	0	0
C-D	58.49	31	35,85	19	5.66	3	0	0
D	65.79	25	28.95	11	5.26	2	0	0
D-E	100	3	0	0	0	0	0	0
E	100	3	0	0	0	0	0	0

Σχεδιάστηκαν χάρτες κατανομής των βλαβών σε σχέση με το υλικό δόμησης, την τάξη τρωτότητας και τον δείκτη τρωτότητας.

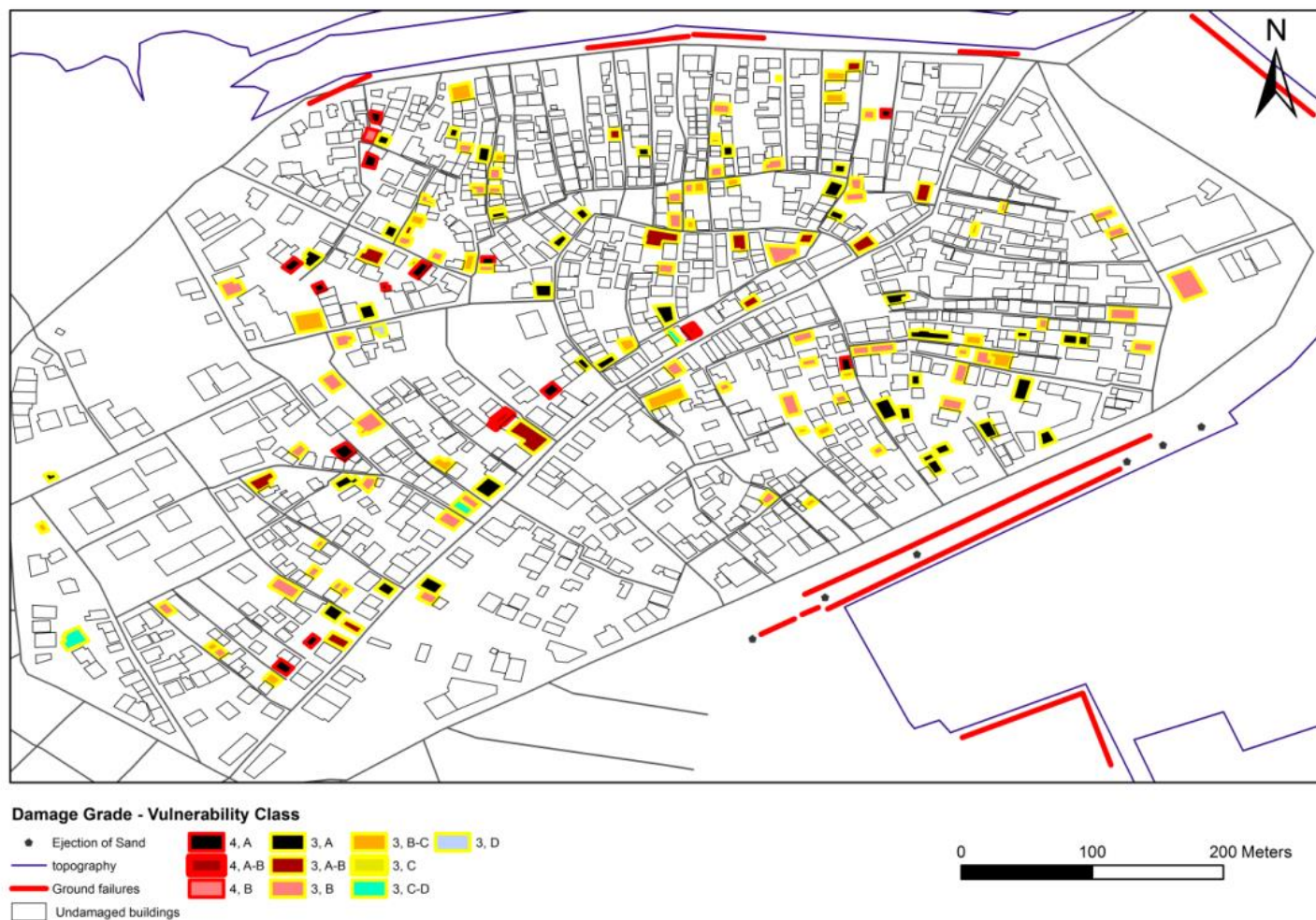
Τα περισσότερα κτίρια με βαθμό βλάβης 3 και 4 κατανέμονται στο βόρειο, ανατολικό και νότιο τμήμα της πόλης, καθώς και κατά μήκος του εμπορικού δρόμου της (Σχ 74). Όπως έχει ήδη αναλυθεί, τα κτίρια αυτά στην πλειοψηφία τους είναι πέτρινα ή με διπλό τρόπο δόμησης (Σχ. 75). Είναι κτίρια υψηλής τρωτότητας, όπως φαίνεται τόσο από την τάξη (Σχ. 76) όσο και από τον δείκτη τρωτότητας (Σχ.77).



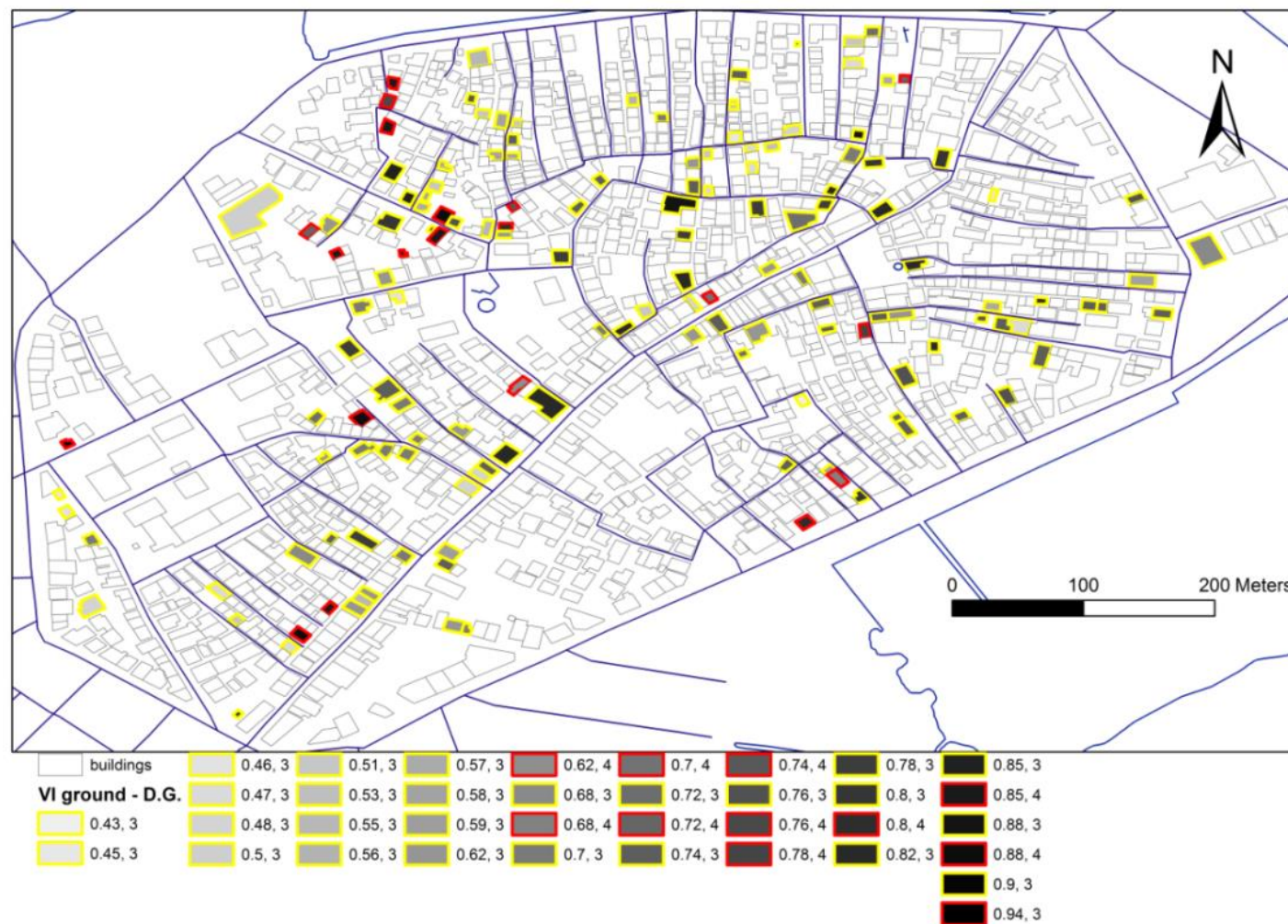
Σχήμα 74 Χωροταξική κατανομή των βαθμών βλάβης σε κτίρια στη πόλη της Λευκάδας



Σχήμα 75 Χωροταξική κατανομή των βλαβών σε σχέση με το υλικό δόμησης. Οι συμβολισμοί που φαίνονται στο υπόμνημα αντιστοιχούν ως ακολούθως: LCP-P - παραδοσιακά με διπλό τρόπο δόμησης, LCP-SM - παραδοσιακά πέτρινα, LCP-TF - παραδοσιακά ξύλινα, RCF - κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, RCF-TF - κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα με ξύλινο όροφο.



Σχήμα 76 Χωροταξική κατανομή των βλαβών σε σχέση την τάξη τρωτότητας



Σχήμα 77 Χωροταξική κατανομή των βλαβών σε σχέση το δείκτη τρωτότητας.

Συνοψίζοντας, παρά το προβληματικό έδαφος στο οποίο είναι θεμελιωμένη η πόλη της Λευκάδας, τη μεγάλη διάρκεια και την υψηλή τιμή της μέγιστης επιτάχυνσης, δεν αποδόθηκε σε κανένα κτίριο βαθμός βλάβης 5. Η λεπτομερής μελέτη του βαθμού βλάβης σε σχέση με το ύψος, το δομικό σύστημα και την τάξη τρωτότητας, δείχνει ότι :

- Βαθμό βλάβης 3 και 4 υπέστησαν τα πέτρινα κτίρια τρωτότητας A, A-B, B. Στα κτίρια αυτά οι αστοχίες μπορούν να αποδοθούν στα ανύπαρκτα μέτρα σεισμικής προστασίας.
- Τα παραδοσιακά κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης στις περισσότερες περιπτώσεις συμπεριφέρθηκαν ικανοποιητικά, αν και ένα σημαντικό ποσοστό των κατεστραμμένων είναι διώροφα με διπλό τρόπο δόμησης.
- Στις περισσότερες περιπτώσεις οι βλάβες παρουσιάστηκαν στη φέρουσα λιθοδομή του ισογείου.
- Η ενεργοποίηση του δευτερεύοντος ξύλινου σκελετού συνέβαλε στη διατήρηση της δομικής ευστάθειας.
- Οι ξύλινοι σκελετοί δεν παρουσίασαν δομικές βλάβες, αλλά παρατηρήθηκαν ρηγματώσεις στις πλινθοδομές πλήρωσης. Οι ρηγματώσεις αυτές φαίνονται δύσκολα εξωτερικά εξαιτίας των λαμαρινών που καλύπτουν τους πάνω ορόφους.
- Μεταξύ των παραδοσιακών κτιρίων, καλύτερη συμπεριφορά έδειξαν τα ξύλινα λόγω της σχετικά μικρής μάζας τους και της ευκαμψίας των ξύλινων πλαισίων, αλλά είναι πιο ευάλωτα σε σύγκριση με τα σύγχρονα από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- Λίγα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, υπέστησαν σημαντικές βλάβες στο φέροντα οργανισμό.

Η καλή συμπεριφορά των κτιρίων σε σχέση με την αναμενόμενη οφείλεται κυρίως στη μικρή μάζα των περισσοτέρων, καθώς και στη μέθοδο θεμελίωσης με ξύλινες εσχάρες (Makarios and Demosthenous 2006). Επίσης, οι ιδιοπερίοδοι των κτιρίων είναι μικρότερες από 0,15- 0,20 s. Συγκρινόμενες με το φάσμα του σεισμού διαφαίνεται ότι δεν υπήρχε κίνδυνος συντονισμού.

(Karakostas et al., 2005). Ένας ακόμη παράγοντας που συνέβαλε στην αντοχή των κτιρίων είναι η καλή ποιότητα κατασκευής για τα παλιά κτίρια που έχουν κτιστεί χωρίς αντισεισμικό κανονισμό, καθώς και η σωστή εφαρμογή των αντισεισμικών κανονισμών στα νεότερα κτίρια. Σε αυτό έχει συμβάλει η εμπειρία των ειδικών και των τεχνιτών της περιοχής λόγω των πολυάριθμων σεισμών που έχουν πλήξει το νησί.

Δυο σημαντικοί παράγοντες που επηρέασαν το βαθμό βλάβης των κτιρίων ήταν η κακή συντήρηση και η ύπαρξη ασταθούς ορόφου (soft storey) στο ισόγειο. Τα περισσότερα από τα κτίρια που υπέστησαν βλάβη λόγω ασταθούς ορόφου κατανέμονται κατά μήκος του κεντρικού εμπορικού δρόμου της πόλης. Ο ασταθής όροφος δημιουργήθηκε γκρεμίζοντας εσωτερικούς τοίχους ώστε να αλλάξει η χρήση του ισόγειου από σπίτι σε μαγαζί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Γεωτεχνική ανάλυση και προσδιορισμός ελαστικού μοντέλου του εδάφους θεμελίωσης

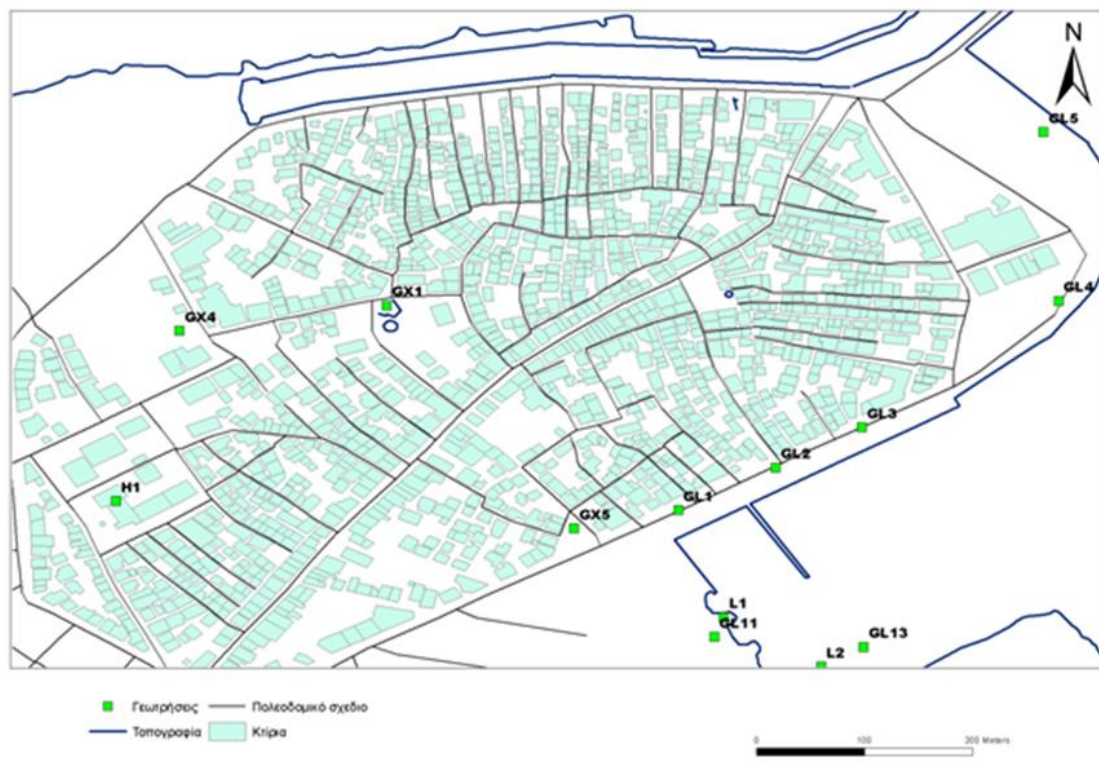
Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται η μελέτη της επίδρασης του εδαφικού στρώματος, όπου είναι θεμελιωμένη η παλιά πόλη της Λευκάδας, στις παραμέτρους της ισχυρής σεισμικής εδαφικής κίνησης. Με δεδομένα τα αποτελέσματα γεωτεχνικών γεωτρήσεων, καθώς και τη μελέτη μικροθορύβου στην περιοχή, προσδιορίστηκαν η απόκριση και τα δυναμικά χαρακτηριστικά του εδάφους στην υπό μελέτη περιοχή.

8.1 Ανάλυση γεωτεχνικών στοιχείων στην παλιά πόλη της Λευκάδας.

Αναλύθηκαν δεδομένα γεωτρήσεων (Σχ.78), καθώς και γεωφυσικών δοκιμών Cross-Hole που έχουν διεξαχθεί στην πόλη για τη θεμελίωση κρατικών και ιδιωτικών κτιρίων και άλλων έργων υποδομής πριν και μετά το σεισμό του 2003. Με βάση τα στοιχεία των γεωτρήσεων, η εδαφική στήλη σε όλη την πόλη της Λευκάδας αποτελείται από ίδιους λιθολογικούς σχηματισμούς με περίπου οριζόντια στρωματοποίηση (Gazetas et al., 2004). Το βραχώδες μαργαϊκό υπόβαθρο εκτιμάται ότι εμφανίζεται σε βάθος 9m στα βόρεια της πόλης, σε βάθος 13m στο κέντρο της και σε βάθος περίπου 16m νότια του λιμένος της πόλης.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών λήφθηκαν διαταραγμένα και αδιατάρακτα δείγματα για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών. Εκτελέστηκαν, επίσης, επιτόπιες δοκιμές πρότυπης διείσδυσης (S.P.T). Οι εργαστηριακές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων – ΚΕΔΕ (Τσιαμπάος et al., 1999; Gazetas et al., 2004)

Μέσω δοκιμών Cross-Hole εκτιμήθηκαν οι ταχύτητες διάδοσης των διατμητικών κυμάτων (V_s) διαφόρων εδαφικών στρώσεων. Συγκεκριμένα, οι σχηματισμοί του υπεδάφους διακρίνονται σε επτά γεωτεχνικές ενότητες, οι οποίες χαρακτηρίζονται από ομοιογένεια φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών (Τσιαμπάος et al., 1999; Gazetas et al., 2004).



Σχήμα 78. Οι θέσεις των γεωτρήσεων

Οι ενότητες αυτές είναι οι ακόλουθες:

Ενότητα I

Τεχνητά υλικά, μπάζα και επιχωματώσεις. Τα υλικά των επιχώσεων έχουν στο μεγαλύτερο ποσοστό τους προέλθει από τα ερείπια κτιρίων που κατέρρευσαν σε παλαιότερους σεισμούς.

Ενότητα II

Περιλαμβάνει όλα τα αργιλικά εδάφη, τα οποία συναντώνται στα ανώτερα τμήματα των αλλουβιακών αποθέσεων. Χωρίζεται σε δυο υποενότητες:

Η πρώτη υποενότητα (IIA), αποτελείται από τεφρομέλανη έως τεφροκάστανη παχιά άργιλο, με πολλά οργανικά, με πάχος κυμαινόμενο από 0.6 έως 4.2 μέτρα, ενώ απουσιάζει από κάποιες γεωτρήσεις. Κατατάσσεται, κατά το Ενοποιημένο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (Unified Soil Classification System, USCS), ως CH και σπανιότερα CL ή CL/CH. Απουσιάζει από κάποιες γεωτρήσεις. Η δοκιμή SPT έδωσε μέσο αριθμό κρούσεων $N=4$ με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται μαλακή ως μέτρια άργιλος (Terzaghi and Peck, 1967). Η

μέση αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u είναι 37kPa ενώ η μέση διατμητική αντοχή από τριαξονική δοκιμή τύπου UU είναι 26 kPa

Η δεύτερη υποενότητα (IIB), αποτελείται από καστανή, καστανοκίτρινη έως τεφρή, αμμώδη άργιλο με θραύσματα οστράκων κατά θέσεις. Τα εδάφη της ενότητας αυτής κατατάσσονται κατά USCS ως CL και σπανιότερα CL/CH, CH ή SC/CL. Η δοκιμή SPT έδωσε μέσο αριθμό κρούσεων $N=9$, ώστε το υλικό να χαρακτηρίζεται μέτρια ως σιφρή άργιλος (Terzaghi and Peck, 1948). Η μέση αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u είναι 141kPa. Η μέση τιμή του δείκτη πλαστικότητας (IP) και για τις δυο υποενότητες είναι μικρότερος του 20, (35.6 και 25,6 αντίστοιχα).

Ενότητα III

Καστανή ως τεφρή, ιλυώδης έως αργιλώδης άμμος με θραύσματα οστράκων και χαλίκια κατά θέσεις. Τα εδάφη της ενότητας αυτής είναι κυρίως μη πλαστικά και χαρακτηρίζονται κατά USCS ως SM και σπανιότερα SM-SC, SP. Η δοκιμή SPT έδωσε μέσο αριθμό κρούσεων $N=38$, ώστε το υλικό να χαρακτηρίζεται μέσης ως πυκνής εναπόθεσης (Terzaghi & Peck, 1948).

Ενότητα IV

Ιλυώδες ως αργιλώδες αμμοχάλικο. Εμφανίζεται σε λίγες γεωτρήσεις (όχι μέσα στην παλιά πόλη) σε μέσο βάθος περίπου 5.5μ και με μέσο πάχος περίπου 2μ. Το υλικό ταξινομείται ως GM, GP-GM, GC. Η δοκιμή SPT έδωσε μέσο αριθμό κρούσεων $N=35$, χαρακτηρίζοντάς το ως πυκνής εναπόθεσης αμμοχάλικο.

Ενότητα V

Καστανοκίτρινη έως τεφρή, λίγο αμμώδης ιλύς με θραύσματα οστράκων. Το εδαφικό αυτό στρώμα συμπίπτει των υλικών της ενότητας 2 και μερικές φορές και της ενότητας 3. Εμφανίζεται σε ένα μέσο βάθος 9.5μ και έχει μέσο πάχος περίπου 4μ. Είναι κυρίως μη πλαστικά εδάφη και χαρακτηρίζονται ως ML. Η δοκιμή SPT έδωσε μέσο αριθμό κρούσεων $N=18$. Οι ταχείες τριαξονικές δοκιμές έδωσαν μέση αστράγγιστη διατμητική αντοχή $C_u= 31.85$ kPa και γωνιά εσωτερικής τριβής $\phi=4^\circ$. Η μέση αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u είναι 78kPa

Ενότητα VI

Τεφροπράσινη, κυανότεφρη έως μελανότεφρη αργιλική ή αμμώδης μάργα με όστρακα.

Αποτελεί το σκληρό γεωλογικό υπόβαθρο και εμφανίζεται σε όλες τις γεωτρήσεις μέσου βάθους 13μ. Τα εδάφη αυτής της ενότητας κατατάσσονται ως CL και σπανιότερα ML, SM/ML. Η δοκιμή SPT έδωσε μέσο αριθμό κρούσεων $N=50$, επομένως το υλικό χαρακτηρίζεται ως σκληρή μάργα.). Ο μέσος δείκτης πλαστικότητας παίρνει τιμή 17.9. Η μέση αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη q_u είναι 715kPa

Ενότητα VII

Χαλαρός έως μέτρια συγκολλημένος ψαμμίτης.

Το υλικό αυτό εμφανίζεται πάνω από το μαργαϊκό υπόβαθρο και θεωρείται ο μεταβατικός σχηματισμός μεταξύ των αλλουβιακών αποθέσεων και των μαργαϊκών υλικών. Στις περισσότερες θέσεις έχει κυρίως τη μορφή θραυσμάτων ψαμμίτη μεγέθους χαλικιών και άμμου.

Οι ενότητες αυτές δεν συναντώνται σε όλες τις γεωτρήσεις.

Μελετώντας το εδαφικό προφίλ της περιοχής γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι επηρεάζει σημαντικά τη διάδοση των σεισμικών κυμάτων από το βραχώδες υπόβαθρο στην θέση θεμελίωσης των κατασκευών.

Με τη συμβολή των δοκιμών Cross-Hole, καθώς και των δοκιμών πρότυπης διείσδυσης (SPT), υπολογίστηκαν αντίστοιχα, με άμεσο και έμμεσο τρόπο, οι μέσες ταχύτητες διάδοσης των διατμητικών κυμάτων κάθε σχηματισμού, σε κάθε θέση.

Συγκριμένα, κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής Cross-Hole που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή του Νοσοκομείου της Λευκάδας από το Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελιώσεων του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, καθορίστηκαν οι τιμές της μέσης ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων για κάθε μια από τις ενότητες που συναντώνται στη συγκεκριμένη θέση, από τη σχέση

$$V_s = L/T_s \quad (20)$$

όπου L ορίζεται η οριζόντια απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων λήψης και εκπομπής, ίση με 3.91m και T_s , ο χρόνος διάδοσης σε msec. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 16) απεικονίζονται οι τιμές αυτές (Τσιαμπάος et al., 1999)

Πίνακας 16 Μέσες τιμές ταχυτήτων διάδοσης διατμητικών κυμάτων στη θέση του νοσοκομείου της Λευκάδας (Τσιαμπάος et al., 1999)

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ	ΒΑΘΟΣ (m)	ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ (V_s) σε m/s
Ενότητα I -Μπάζα	0.0-1.0	225
Ενότητα II-Άργιλος	1.0-6.0	150
Ενότητα III-Αργιλώδης Άμμ	6.0-8.0	300
ΕνότηταV- Ιλύς	8.0-12.0	250
ΕνότηταVI- Μάργα	12.0-25.0	280
Ενότητα VI- Μάργα	25.0-50.0	300

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω τιμές, τα αργιλικά υλικά έχουν μικρή μέση τιμή, γεγονός που συμφωνεί με τα χαμηλή γεωτεχνική τους ποιότητα. Το μαργαϊκό υπόβαθρο παρουσιάζει μεγαλύτερη τιμή. Σύμφωνα με την μελέτη των Gazetas et al., 2004, η ταχύτητα διάδοσης στις μάργες υπολογίστηκε 550 m/s, γεγονός που καθιστά το μαργαϊκό στρώμα το σεισμικό βραχώδες υπόβαθρο.

Η εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσης των διατμητικών κυμάτων, μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί με την εφαρμογή εμπειρικών σχέσεων από τα αποτελέσματα των δοκιμών πρότυπης διείσδυσης για κάθε γεώτρηση. Στη βιβλιογραφία δίνεται ένας σημαντικός αριθμός εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες συνδέουν τον αριθμό κρούσεων (N) για διείσδυση 30 εκατοστών, ή τη διείσδυση εκφρασμένη σε εκατοστά 50 κρούσεων, σε σκληρότερα εδάφη, με τη ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων (V_s) (Imai and Tonouchi 1982, Kaltetziotis et al. 1992, Raptakis et al. 1995, Tsiambaos and Sabatakakis, 2011). Σε κάποιες από τις σχέσεις αυτές, χρησιμοποιείται μια διορθωμένη τιμή

N_{60} του αριθμού κρούσεων ($N_{60}=0.75 \cdot N$). Οι σχέσεις αυτές είναι αποτέλεσμα επεξεργασίας και αξιολόγησης πλήθους δοκιμών σε διάφορες περιοχές και διαφοροποιούνται σύμφωνα με το είδος του εδάφους.

Για την καλύτερη υπολογιστική προσέγγιση χρησιμοποιήθηκαν σχέσεις προερχόμενες από αναλύσεις στον ελλαδικό χώρο, που φυσικά αφορούν στους ελληνικούς εδαφικούς σχηματισμούς, οι οποίοι μπορούν σχεδόν να ταυτοποιηθούν με τους σχηματισμούς της ιδιαίτερης περιοχής. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκαν οι σχέσεις:

Kaltetziotis et al. (1992)

$$V_s = 76.55 N_{SPT}^{0.445} \text{ (Συνεκτικά Εδάφη)} \quad (21)$$

$$V_s = 49.1 N_{SPT}^{0.502} \text{ (Μη Συνεκτικά Εδάφη)} \quad (22)$$

$$V_s = 123.44 N_{60}^{0.286} \text{ (Χαλαρές Αμμοιλίες – Άμμοι, NSPT < 10)} \quad (23)$$

Raptakis et al., 1995

$$V_s = 99.95 N_{60}^{0.237} \text{ (Μέτριες – Πυκνές Άμμοι, NSPT > 10)} \quad (24)$$

$$V_s = 105.67 N_{60}^{0.325} \text{ (Μαλακές Άργιλοι, NSPT < 8)} \quad (25)$$

$$V_s = 184.19 N_{60}^{0.174} \text{ (Σκληρές Άργιλοι, NSPT > 8)} \quad (26)$$

$$V_s = 10.78 N_{60} - 299.3 \text{ (Μάργες)} \quad (27)$$

Tsiambaos and Sabatakakis (2011):

$$V_s = 112.2 N_{60}^{0.324} \text{ (Αργιλικά Εδάφη και Μάργες)} \quad (28)$$

$$V_s = 88.8 N_{60}^{0.370} \text{ (Ιλυώδη Εδάφη)} \quad (29)$$

$$V_s = 79.7 N_{60}^{0.365} \text{ (Αμμώδη Εδάφη)} \quad (30)$$

Οι υπολογισμοί των ταχυτήτων και η μέση τιμή για κάθε περίπτωση παρουσιάζονται στον Πίνακα 17.

Πίνακας 17 Υπολογισμός Vs κάθε σχηματισμού σε κάθε γεώτρηση

Κωδικός	Στρώμα	SPT	N ₆₀	Vs (m/s) Kaltetziotis et al (1992)	Vs (m/s) Raptakis et al (1994)	Vs (m/s) Tsiambaos and Sabatakakis (2011)	Vs (m/s) Μέση Τιμή
GX1	II	12	9	231,30	269,96	228,65	243,30
	V	12	9	170,93	269,96	200,21	213,70
	VI	72	54	513,40	282,82	408,59	401,60
GX2	II	11	8	222,52	265,91	222,29	236,91
	V	19	14	215,29	292,44	237,31	248,35
	VI	112	84	624,95	606,22	471,48	567,55
GX4	II	9	7	203,51	256,78	208,30	222,86
	III	4	3	98,47	129,68	119,02	
	V	7	5	130,41	181,14	164,01	158,52
	VI	80	60	538,05	347,50	422,78	
GX5	II	42	32	403,92	335,72	343,12	360,92
	V	73	55	423,13	369,61	390,49	394,41
	VI						
GL1	II						
	III	47	35	339,21	232,52	292,53	288,09
	V	35	26	292,55	325,23	297,50	305,10
	VI	96	72	583,52	476,86	448,51	502,96
GL2	II						
	III	43	32	324,40	227,67	283,19	278,42
	VI	140	105	690,20	832,60	506,83	676,54
GL3	II	5	4	156,67	162,37	172,18	163,74
	III	70	53	414,31	255,54	338,31	336,05
	V	95	71	482,95	386,95	430,47	433,45
	VI	99	74	591,57	501,12	453,00	515,23
GL4	II	2	2	104,21	120,55	127,95	117,57
	III	15	11	191,20	177,38	192,81	187,13
	V	96	72	485,49	387,65	432,14	435,09
	VI	100	75	594,22	509,20	454,48	519,30
GL5	II						
	III	15	11	191,20	177,38	192,81	187,13
	VI	74	56	519,70	298,99	412,23	410,31
GL11	II	3	2	124,81	137,53	145,92	136,09
	III	21	16	226,38	192,10	218,00	212,16
	V	14	11	184,69	277,30	211,96	224,65
	VI	68	51	500,51	250,48	401,09	384,03
GL12	II	11	8	222,52	265,91	222,29	236,91
	III	28	21	261,55	205,66	242,14	236,45
	V	25	19	247,09	306,74	262,68	272,17
	VI	93	70	575,33	452,61	443,92	490,62
GL13	II						
	III	47	35	339,21	232,52	292,53	288,09
	VI	105	79	607,26	549,63	461,72	539,53

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται ταχύτητες μόνο για φυσικά εδάφη. Τα τεχνητά εδάφη που βρίσκονται σε μεγάλο μέρος της πόλης, επηρεάζουν την συμπεριφορά των κτιρίων, αλλά δεν είναι εφικτός ο υπολογισμός της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων με τη συγκεκριμένη μέθοδο.

Συνοψίζοντας τα δεδομένα των γεωτρήσεων και τα αποτελέσματα των υπολογισμών των ταχυτήτων (Πίνακας 17) υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των δοκιμών πρότυπης διεύθυνσης (SPT), των ταχυτήτων (V_s), του πάχους και των πυκνοτήτων των εδαφικών σχηματισμών. (Πίνακας 18).

Πίνακας 18 Μέσες τιμές χαρακτηριστικών εδαφικής στήλης από δεδομένα γεωτρήσεων

Είδος εδάφους	SPT	V_s (m/s)	Πάχος (m)	Πυκνότητα (gr/cm ³)	Υδροφόρος Ορίζοντας (m)
Τεχνητές αποθέσεις	-	-	3.2	-	0.6-3.1
Άργιλος	10	187	4.1	1.86	
Αργιλώδης άμμος	33	236	5.2	1.94	
Ιλύς	37	270	3.0	1.97	
Μάργα	>50	470		2.15	

Θεωρώντας την ταχύτητα διάδοσης των S κυμάτων στα τεχνητά εδάφη ίση με την τιμή που προέκυψε από τη δοκιμή cross-hole (Πίνακας 16), υπολογίστηκε η μέση ταχύτητα διάδοσης για πάχος 30 μέτρων (V_{s30}) για κάθε γεώτρηση (Πίνακας 19).

$$V_{s30} = \frac{\text{Συνολικό πάχος στρωμάτων (30 m)}}{\sum \frac{\text{Πάχος στρώματος}}{\text{Ταχύτητα εγκάρσιων κυμάτων κάθε στρώματος}}} \quad (31)$$

Πίνακας 19 Κατανομή Vs30 στις θέσεις των γεωτρήσεων.

Γεώτρηση	GX1	GX2	GX4	GX5	GL1	GL2	GL3	GL4	GL5	GL11	GL12	GL13
V_{s30} (m/s)	334.80	519.28	280.49	422.46	384.59	408.91	361.51	257.41	291.63	245.75	371.88	355.37

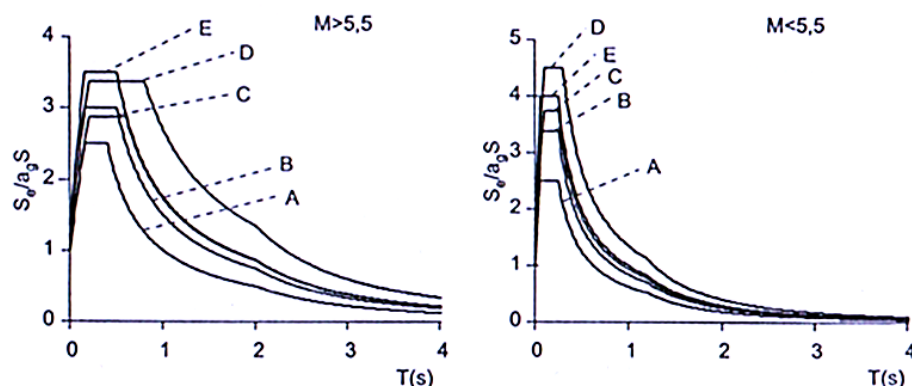
Λαμβάνοντας υπόψη την περιγραφή των σχηματισμών, τις τιμές των Vs και N_{SPT}, καθώς και την περιγραφή των εδαφών στον Ευρωκώδικα 8 (Πίνακας 20), οι εδαφικοί σχηματισμοί της πόλης της Λευκάδας μπορούν να χαρακτηριστούν ως C στην πλειοψηφία τους (στρώσεις κοκκώδους υλικού μικρής σχετικής πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 5μ. ή μέσης πυκνότητας πάχους μεγαλύτερου των 70μ., Ιλυοαργιλικά εδάφη μικρής αντοχής σε πάχος, μεγαλύτερο των 5μ.) ή D (έδαφος με μαλακές αργίλους υψηλού δείκτη πλαστιμότητας συνολικού πάχους μεγαλύτερου των 10μ.) σε ό,τι αφορά στο στρώμα της ιλύος που βρίσκεται σε επαφή με το μαργαϊκό υπόβαθρο. Η μέση ταχύτητα διάδοσης για πάχος 30 μέτρων (Vs30) σε κάποιες θέσεις γεωτρήσεων είναι μεγαλύτερες από 360 m/s πιθανόν λόγω του μικρού πάχους του χαλαρού εδαφικού σχηματισμού.

Βάσει της παραπάνω ταξινόμησης προσεγγίζονται οι παράμετροι της εδαφικής ενίσχυσης στους σεισμικούς κώδικες, λαμβάνοντας υπόψη και στοιχεία του σεισμού, όπως το μέγεθος και την επικεντρική απόσταση (EC8 prEN1998-1, Draft 4, 2001).

Πίνακας 20 Κατηγοριοποίηση εδαφών με βάση τον Ευρωκώδικα 8

Κατηγορία Εδάφους	Περιγραφή στρωματογραφίας	Παράμετροι		
		V_{s30} (m/s)	N_{SPT} (κρούσεις/ 30cm)	c_u (kPa)
A	Βράχος ή άλλος βραχώδης γεωλογικός σχηματισμός, που περιλαμβάνει το πολύ 5 m ασθενέστερου επιφανειακού υλικού.	> 800	—	—
B	Αποθέσεις πολύ πυκνής άμμου, χαλίκων, ή πολύ σκληρής αργίλου, πάχους τουλάχιστον αρκετών δεκάδων μέτρων, που χαρακτηρίζονται από βαθμιαία βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων με το βάθος.	360- 800	> 50	> 250
C	Βαθιές αποθέσεις πυκνής ή μετρίως πυκνής άμμου, χαλίκων ή σκληρής αργίλου πάχους από δεκάδες έως πολλές εκατοντάδες μέτρων.	180-360	15 - 50	70 - 250
D	Αποθέσεις χαλαρών έως μετρίως χαλαρών μη συνεκτικών υλικών (με ή χωρίς κάποια μαλακά στρώματα συνεκτικών υλικών), ή κυρίως μαλακά έως μετρίως σκληρά συνεκτικά υλικά.	< 180	< 15	< 70
E	Εδαφική τομή που αποτελείται από ένα επιφανειακό στρώμα ιλύος με τιμές v_s κατηγορίας C ή D και πάχος που ποικίλλει μεταξύ περίπου 5m και 20m, με υπόστρωμα από πιο σκληρό υλικό με $v_s > 800$ m/s.			
S_1	Αποθέσεις που αποτελούνται, ή που περιέχουν ένα στρώμα πάχους τουλάχιστον 10 m μαλακών αργίλων/ιλών με υψηλό δείκτη πλαστικότητας ($PI > 40$) και υψηλή περιεκτικότητα σε νερό.	< 100 ενδεικτικό)	—	10 - 20
S_2	Στρώματα ρευστοποιήσιμων εδαφών, ευαίσθητων αργίλων, ή οποιαδήποτε άλλη εδαφική τομή που δεν περιλαμβάνεται στους τύπους A – E ή S_1			

Στον Ευρωκώδικα 8 το μέγεθος του σεισμού λαμβάνεται υπόψη με τον διαχωρισμό σε φάσματα τύπου 1 ($M_s > 5.5$) και τύπου 2 ($M_s < 5.5$). Οι συντελεστές φασματικής ενίσχυσης παίρνουν μεγαλύτερες τιμές για σεισμούς μικρότερου μεγέθους (Σχ.79, Πίνακας 21).



Σχήμα 79 Προτεινόμενα ελαστικά φάσματα απόκρισης για σεισμούς μεγέθους μεγαλύτερου του 5.5 (τύπος 1) και μικρότερο του 5.5 (τύπος 2) για κατηγορίες εδαφών Α έως Ε σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8 (Πιτιλάκης, 2010).

Πίνακας 21 Παράμετροι εδαφικής ενίσχυσης και γωνιακές περιόδους ως συνάρτηση της εδαφικής κατηγορίας για σεισμό τύπου 1 (Α) και τύπου 2 (Β) (Πιτιλάκης, 2010)

(Α)

Κατηγορία	S	T_B	T_C	T_D
A	1.00	0.15	0.40	2.0
B	1.20	0.15	0.50	2.0
C	1.15	0.20	0.60	2.0
D	1.35	0.20	0.80	2.0
E	1.40	0.15	0.50	2.0

(Β)

Κατηγορία	S	T_B	T_C	T_D
A	1.00	0.05	0.25	1.20
B	1.35	0.05	0.25	1.20
C	1.50	0.10	0.25	1.20
D	1.80	0.10	0.30	1.20
E	1.60	0.05	0.25	1.20

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει πολλές γενικεύσεις, αφού οι υπολογισμοί γίνονται βάσει γενικευμένων πινάκων και ο καθορισμός εδαφικών τύπων με τον Ευρωκώδικα 8 δεν είναι πλήρης, καθώς υπάρχουν τύποι εδαφών που η

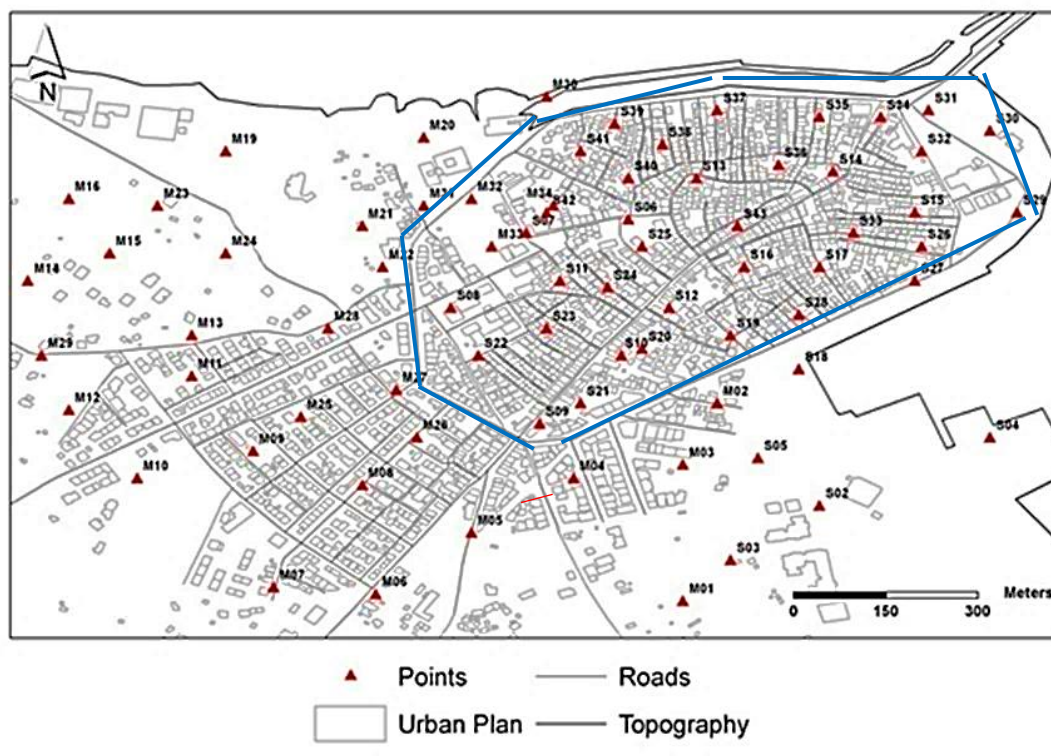
τιμή της V_s για συγκεκριμένο πάχος δεν εμπεριέχονται στους πίνακες (Bouckovalas et al., 2006).

8.2 Εκτίμηση της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών μέσω μετρήσεων μικροθορύβου

Οι μετρήσεις μικροθορύβου πραγματοποιήθηκαν το χρονικό διάστημα από 7 έως 12 Οκτωβρίου, 2007, στην πόλη της Λευκάδας, σε εβδομήντα οχτώ (78) επιλεγμένες θέσεις, ώστε να επιτευχθεί πυκνή διάταξη μετρήσεων (τουλάχιστον ανά 200 m) και να καλυφθεί ολόκληρη η πόλη της Λευκάδας (Kassaras et al., 2008). Η ακριβής επιλογή των θέσεων έγινε έτσι ώστε να αποφευχθούν, όσο περισσότερο γίνεται, ανθρωπογενείς και άλλοι ανεπιθύμητοι θόρυβοι και φυσικά να υπάρχει εύκολη πρόσβαση στην επιλεγμένη θέση. Οι μετρήσεις ανά θέση είχαν διάρκεια 20 τουλάχιστον λεπτών. Αυτό έγινε προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα, κατά την ανάλυση, απόρριψης τμημάτων με μεταπτώσεις του σήματος λόγω εξωγενών παραγόντων, αφού οι περισσότερες μετρήσεις έγιναν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Στον παρακάτω χάρτη (Σχ. 80) απεικονίζονται οι θέσεις όπου ελήφθησαν μετρήσεις. Για τη συγκεκριμένη διατριβή χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από 46 θέσεις εντός του μπλε πολυγώνου που βρίσκονται γεωγραφικά στην παλιά πόλη της Λευκάδας.

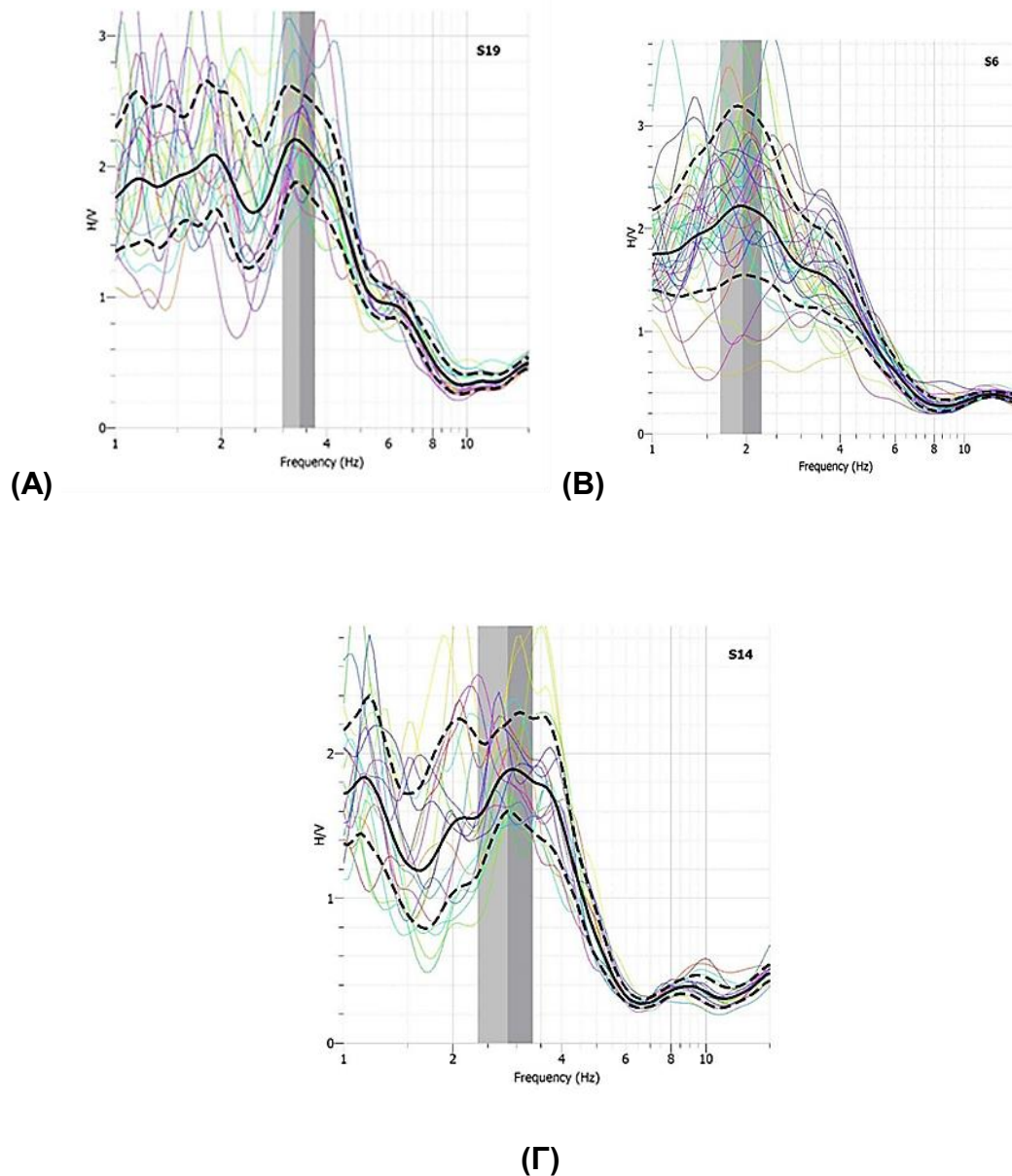
Για τη μέτρηση του εδαφικού θορύβου χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακοί σειсмоγράφοι τύπου REFTEK 72A, τριών συνιστωσών, σεισμόμετρα τύπου Guralp CMG40T, ιδιοσυχνότητας 1Hz και φορητός υπολογιστής για τον έλεγχο της λειτουργίας του σεισμογράφου. Η απόκριση του σεισμομέτρου κρίθηκε ικανοποιητική για τις καταγραφές του εδαφικού θορύβου, αφού το μικρό σχετικά πάχος των επιφανειακών σχηματισμών της πόλης δεν επιτρέπει τη διέγερση και ενίσχυση χαμηλών συχνοτήτων εκτός του εύρους απόκρισης του σεισμομέτρου που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 80 Θέσεις μετρήσεων μικροθούβου στην ευρύτερη περιοχή της πόλης της Λευκάδας

Κατά τη διάρκεια τόσο της εργασίας στο πεδίο, όσο και της ανάλυσης των δεδομένων, τηρήθηκαν οι προδιαγραφές πιστοποίησης ISO-9002, την οποία κατείχε το Εργαστήριο Σεισμολογίας και για κάθε μέτρηση συμπληρώθηκαν τα αντίστοιχα έντυπα. Η μετατροπή των δεδομένων και η αρχειοθέτησή τους στον Η/Υ του Εργαστηρίου έγινε μέσω του λογισμικού PASSCAL.

Οι καμπύλες οριζόντιων προς κατακόρυφης συνιστώσας (Horizontal to Vertical Spectral Ratio – HVSR) υπολογίστηκαν μέσω του λογισμικού προγράμματος GEOPSY το οποίο αναπτύχθηκε στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Προγράμματος SESAME (SESAME, 2005). Κατά την επεξεργασία των στοιχείων, κάθε μια από τις τρεις συνιστώσες μιας καταγραφής χωρίζεται σε χρονικά παράθυρα ίσης ή διαφορετικής διάρκειας τα οποία επιλέγονται βάσει διαδικασίας αντι-διέγερσης (anti-triggering) προκειμένου να απομονωθεί ο μη φυσικός θόρυβος.

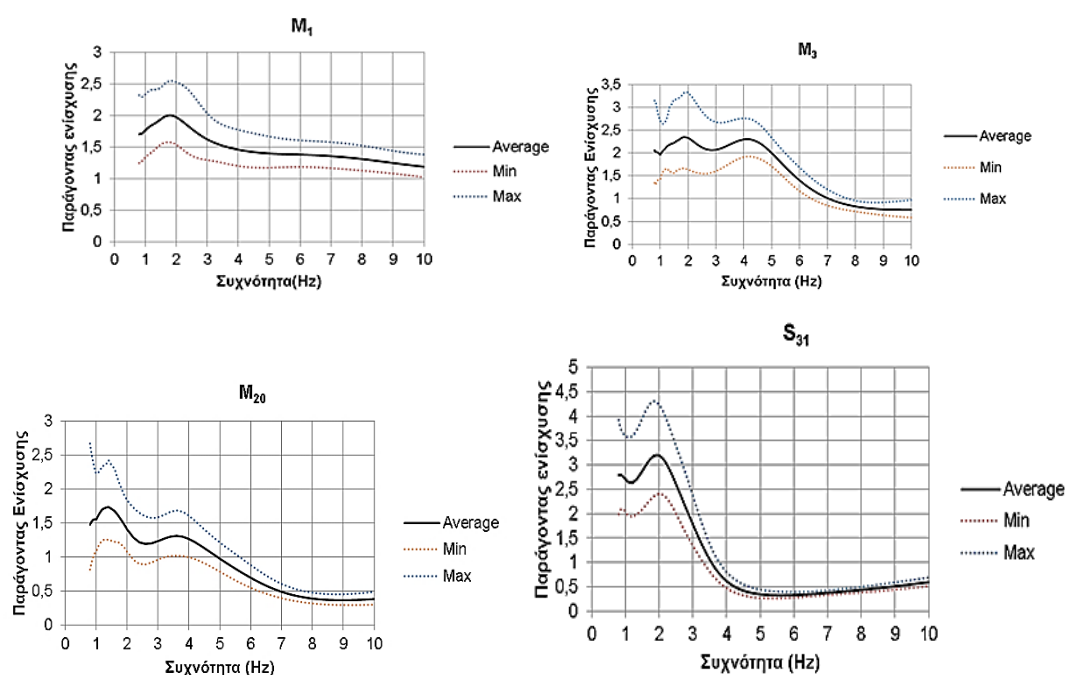


Σχήμα 81 Παραδείγματα καμπυλών φασματικών λόγων (HVSr) μετρήσεων μικροθορύβου, στις θέσεις : (A) S19, (B) S6, (Γ) S14 (Σχ. 80). Η μέση καμπύλη HVSr εμφανίζεται με μαύρη γραμμή, ενώ με τις διακεκομμένες παριστάνεται η τυπική της απόκλιση. Οι χρωματιστές γραμμές είναι οι επιμέρους καμπύλες που αντιστοιχούν στα επιλεγμένα χρονικά παράθυρα του σήματος.

Οι ακολουθίες Fourier υπολογίζονται για κάθε χρονικό παράθυρο και εξομαλύνονται με τη χρήση του λογαριθμικού φίλτρου εξομάλυνσης (Korhno and Ohmachi, 1998). Τα δύο οριζόντια φάσματα Fourier ενοποιούνται για

κάθε παράθυρο. Υπολογίζεται ο μέσος όρος των λόγων H/V για όλα τα παράθυρα με γεωμετρικό τρόπο και καταλήγουμε σε μία μοναδική H/V καμπύλη και την τυπική της απόκλιση. Αποτελέσματα της διαδικασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 81.

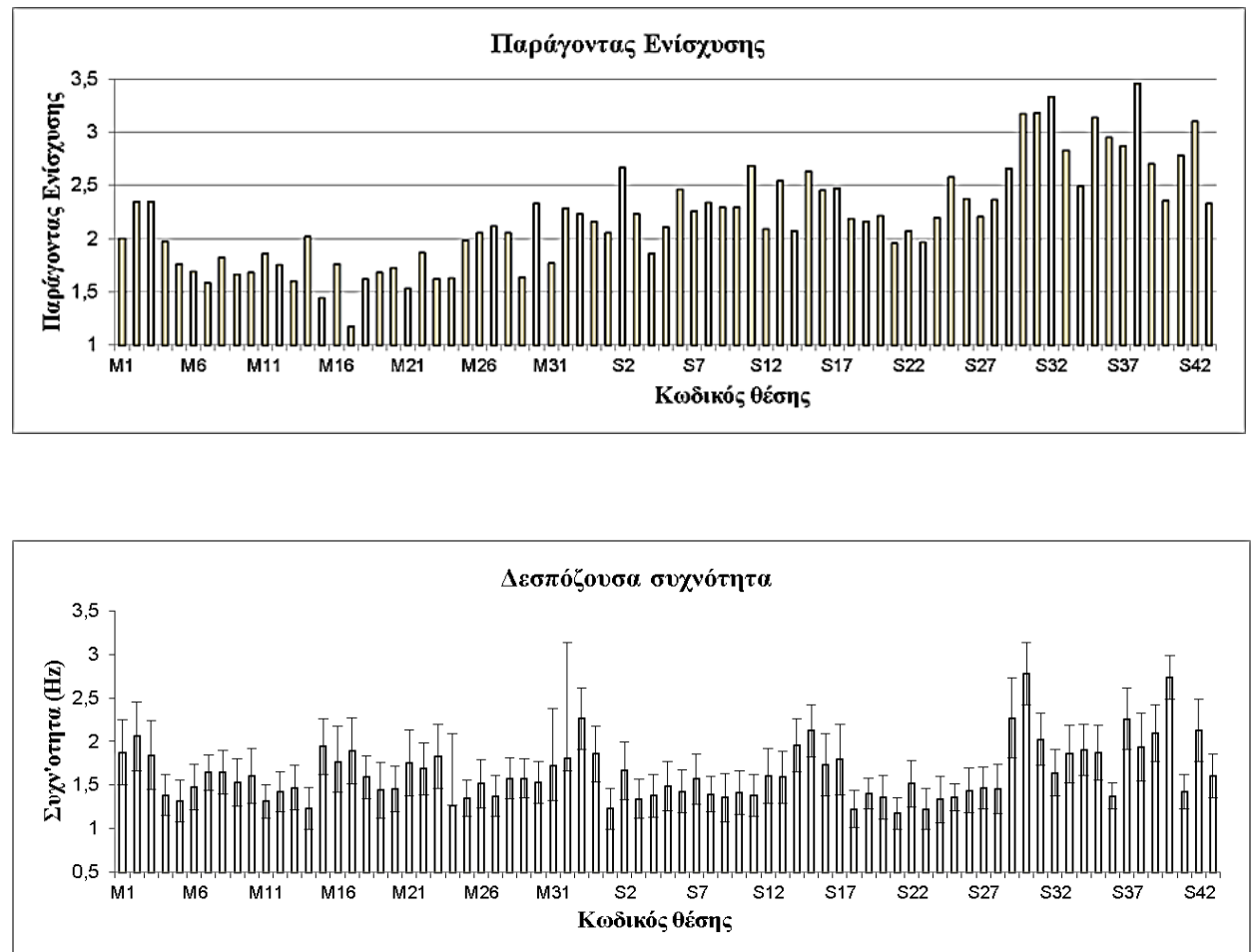
Οι φασματικοί λόγοι υπολογίστηκαν για το εύρος συχνοτήτων ενδιαφέροντος 0.5-15Hz. Το κατώτερο όριο επιλέχθηκε κοντά στη φυσική συχνότητα του αισθητήρα. Το ανώτερο όριο καθορίζεται από τη κατώτερη φυσική συχνότητα για τα χαρακτηριστικά των τοπικών συνθηκών, θεωρώντας τις μέγιστες συχνότητες 10-20 Hz (Kohler et al., 2004) (Σχ. 82).



Σχήμα 82 Διάγραμμα παράγοντα ενίσχυσης – συχνότητας σε κάποιες από τις 46 θέσεις

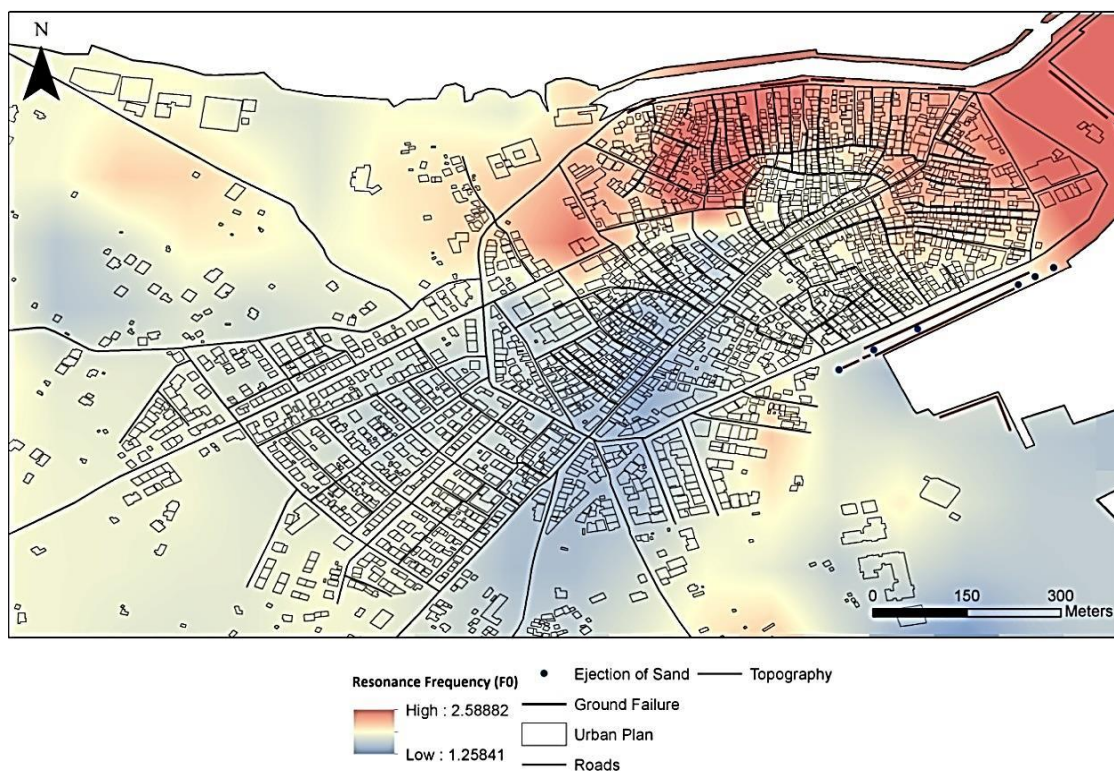
Η ανάλυσή έδειξε ότι οι παράγοντες ενίσχυσης ήταν συστηματικά ευαίσθητοι σε επιδράσεις εξωγενούς θορύβου, που συχνά επισκίαζαν τις κορυφαίες συχνότητες, ως εκ τούτου ο θόρυβος έπρεπε να αφαιρεθεί προσεκτικά από τις καταγραφές. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των καμπυλών HVSR έχουν μία κορυφή (Σχ. 81B), η οποία μερικές φορές διευρύνεται ή χωρίζεται σε δύο κορυφές με υψηλότερη συχνότητα (Σχ.81A, Γ). Λίγες μετρήσεις που βρίσκονται νότια παρουσιάζουν σχεδόν επίπεδη καμπύλη HVSR. Μετά την

απόρριψη κάποιων ακραίων αποτελεσμάτων, επιλέχθηκαν για κάθε θέση η δεσπόζουσα συχνότητα ενίσχυσης (f_0) και ο παράγοντας ενίσχυσης (A_0) (Σχ. 83).



Σχήμα 83 Διάγραμμα των δεσποζουσών συχνοτήτων και των παραγόντων ενίσχυσης στην πόλη της Λευκάδας.

Η κατανομή των δεσποζουσών συχνοτήτων και των παραγόντων ενίσχυσης στην παλιά πόλη προβλήθηκαν σε ψηφιακούς χάρτες (Σχ. 84 και 85).



Σχήμα 84 Κατανομή των δεσποζουσών συχνοτήτων (f_0)

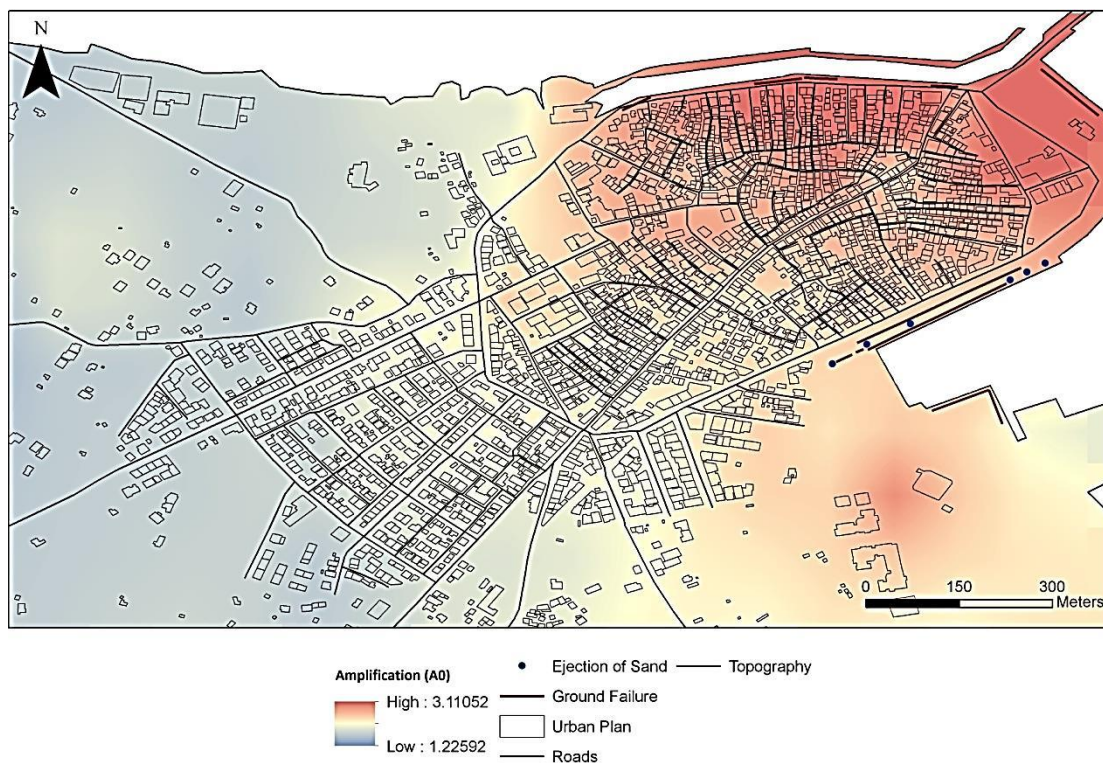
Επιγραμματικά διαπιστώνουμε τα εξής:

Το εύρος των δεσποζουσών συχνοτήτων (f_0) κυμαίνεται από 1.25Hz έως 2.59 Hz. Για βελτίωση της εποπτικότητας του χάρτη διαχωρίζουμε τις τιμές των συχνοτήτων σε τρεις ζώνες:

- A) Ζώνη Υψηλότερων τιμών: Παρατηρούνται στο βόρειο τμήμα της παλαιάς πόλης, καθώς και στο ανατολικό. Επίσης, μεμονωμένες τιμές εμφανίζονται νότια της περιοχής, καθώς και ΒΔ του χάρτη.
- B) Ζώνη Ενδιάμεσων τιμών: Εμφανίζονται στο κέντρο της παλαιάς πόλης και Δ-ΝΔ.
- Γ) Ζώνη Χαμηλότερων τιμών: Από Ν-ΝΔ και προχωρώντας προς το κέντρο της πόλης και με κάποιες ακόμα εμφανίσεις στα ΒΔ του χάρτη.

Οι τιμές του παράγοντα ενίσχυσης κυμαίνονται από 1.22 έως 3.11. Οι μικρότερες από αυτές παρατηρούνται κυρίως δυτικά. Ανατολικά εντοπίζονται μέσες και μεγαλύτερες τιμές συντελεστών, με τις πρώτες να κυριαρχούν στο

κέντρο της παλαιάς πόλης και στο ΝΑ κομμάτι του χάρτη και τις δεύτερες, στα Β-ΒΑ.



Σχήμα 85 Χάρτης με την κατανομή του συντελεστή ενίσχυσης (A_0), που αντιστοιχεί στη δεσπόζουσα συχνότητα της πόλης της Λευκάδας

Σε γενικές γραμμές οι δεσπόζουσες συχνότητες είναι σε συμφωνία με τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από καταγραφές ισχυρών κινήσεων (πειραματικές και συνθετικές) σε διάφορα σημεία της πόλης (Gazetas et al., 2004), καθώς και από καμπύλες HVSR που προέρχονται από σεισμικά δεδομένα και δεδομένα μετρήσεων μικροθορύβου (Triantafyllidis et al., 2006). Παρά την ποιότητα της ανάλυσης, οι παράγοντες ενίσχυσης θα πρέπει να εξεταστούν με προσοχή, καθώς οι τιμές από μετρήσεις μικροθορύβου έχουν αποδειχθεί χαμηλότερες από την ενίσχυση του εδάφους σε αρκετές περιπτώσεις.

8.3 Προσδιορισμός ελαστικών παραμέτρων της εδαφικής στήλης

Όπως έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3 (Μεθοδολογία), ο προσδιορισμός των ελαστικών ιδιοτήτων του εδαφικού υποβάθρου στην περιοχή της πόλης της Λευκάδας πραγματοποιήθηκε συγκρίνοντας τις υπολογισμένες σε κάθε θέση από την μελέτη μικροθορύβου καμπύλες HVSR, με ένα θεωρητικό μοντέλο. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ModelHVSR (Herak, 2008). Θεωρούμε ότι το εδαφικό μοντέλο αποτελείται από ιξωδοελαστικά στρώματα, όπου το καθένα καθορίζεται από το πάχος του, την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων χώρου, την πυκνότητά του και τον παράγοντα Q , ο οποίος εξαρτάται από τα ανελαστικά χαρακτηριστικά του εδάφους.

Υλοποιήθηκαν τα ακόλουθα:

Αντιστροφή των παρατηρούμενων φασμάτων HVSR εφαρμόζοντας την μέθοδο Monte Carlo, για την εύρεση του μοντέλου που επαληθεύει τις πειραματικές καμπύλες HVSR.

Υπολογισμός θεωρητικών καμπυλών (HVSR) για τα κύματα χώρου.

Εκτίμηση της ενίσχυσης εδαφικών παραμέτρων, (επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση) για τα υπολογισμένα εδαφικά μοντέλα.

Υπολογισμός των περιοχών εμπιστοσύνης για τις ανεστραμμένες παραμέτρους του μοντέλου.

Αρχικά αναγνωρίστηκαν πέντε διαφορετικές ομάδες καμπυλών HVSR με κριτήριο το σχήμα τους. Για κάθε ομάδα υπολογίστηκε μια μέση καμπύλη. Οι μέσες καμπύλες των ομάδων χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό πέντε αντιπροσωπευτικών γεωτεχνικών μοντέλων στην πόλη εφαρμόζοντας το λογισμικό ModelHVSR.

Για την αντιστροφή απαιτείται ένα αρχικό μοντέλο, οι παράμετροι του οποίου μεταβάλλονται τυχαία εντός προκαθορισμένων ορίων. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιλογές τιμών των παραμέτρων αυτών, τέθηκαν όρια σύμφωνα με θεωρητικούς περιορισμούς των φυσικών παραμέτρων και πολλές δοκιμές. Οι περιορισμοί που θέσαμε είναι οι ακόλουθοι:

α) Για τους παράγοντες Q_p και Q_s , χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τη βιβλιογραφία (Triantafyllidis et al., 2006).

β) Το ελάχιστο πάχος των στρωμάτων καθορίστηκε 1 m, σύμφωνα με το ελάχιστο μέσο πάχος των τεχνητών αποθέσεων (1,6 m). Δεδομένης της

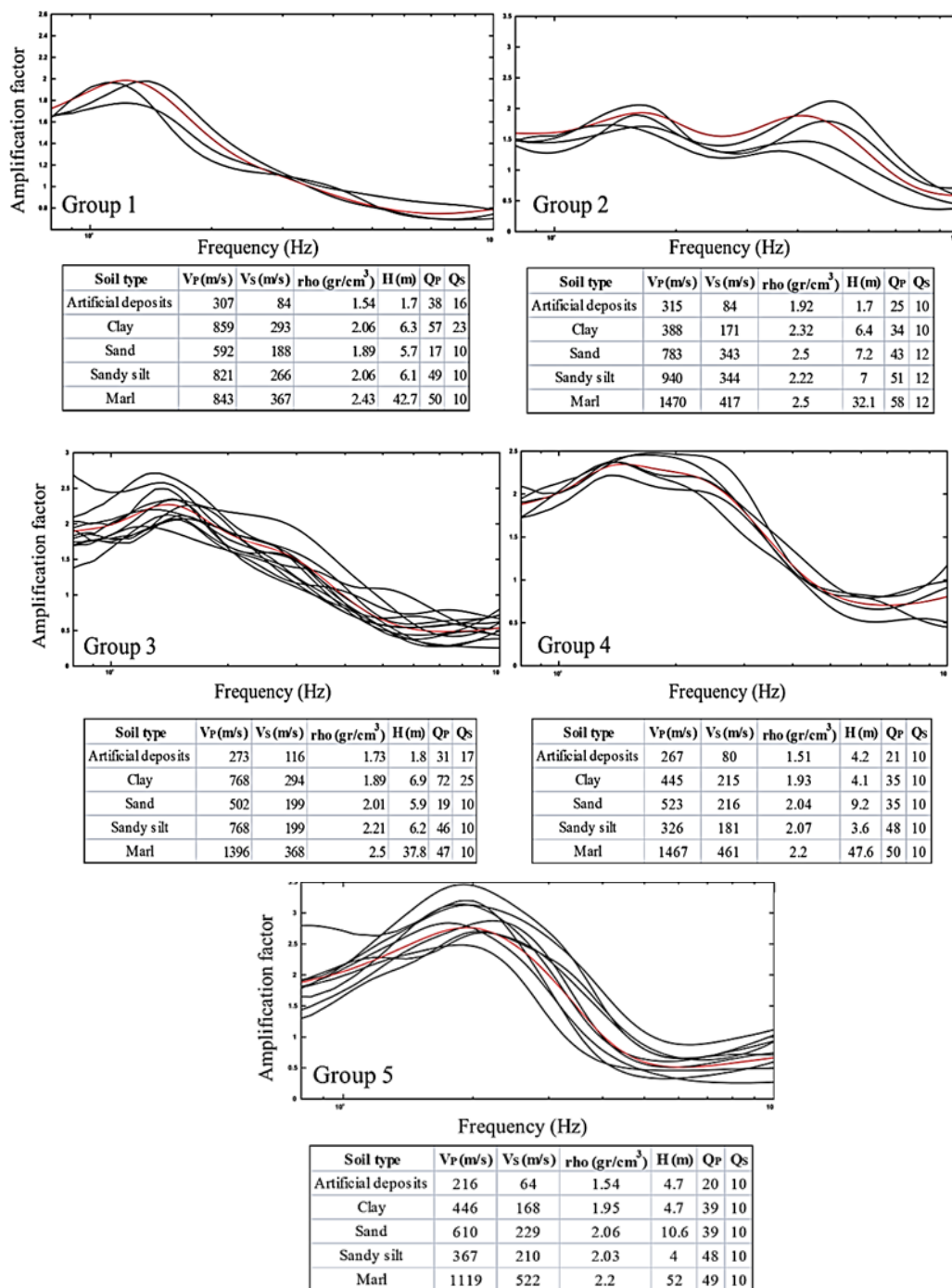
έλλειψης πληροφοριών σχετικά με την ταχύτητα των τεχνητών σχηματισμών, χρησιμοποιήθηκε η τιμή των 100 m / s βάσει βιβλιογραφίας.

γ) Το ελάχιστο όριο του λόγου των ταχυτήτων V_P / V_S ορίστηκε 1,73 (μέσο Poisson), ενώ ανώτατο όριο V_P / V_S ορίστηκε ίσο με 4. Η τιμή αυτή αφορά εδάφη επιρρεπή σε ρευστοποίηση, η οποία είναι πιθανό να συμβεί στην πόλη της Λευκάδας (Gazetas, 2004; Parathanassiou et al., 2005).

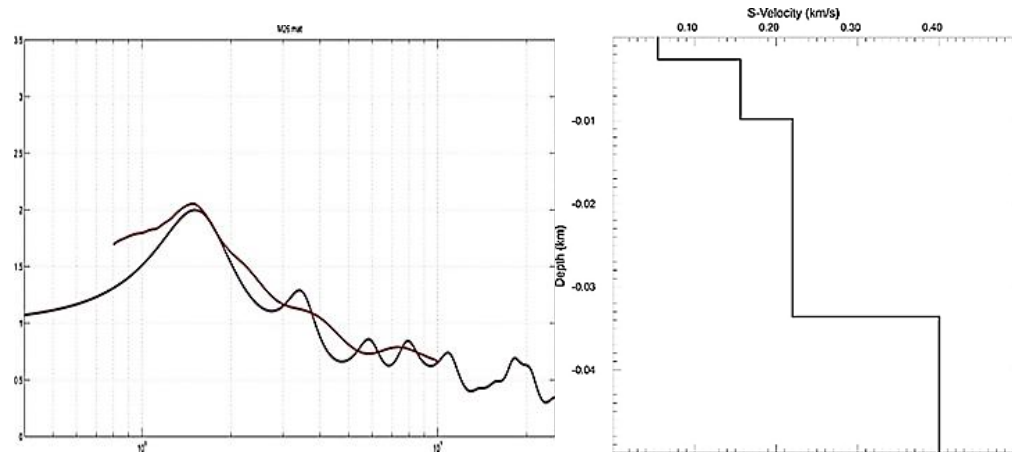
Το αρχικό μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την αντιστροφή των πέντε μέσων καμπυλών περιλαμβάνει 5 εδαφικά στρώματα με ταχύτητες διάδοσης σεισμικών κυμάτων (V_s), πυκνότητες (ρ_0) και πάχη (H) που προέρχονται από τα δεδομένα των γεωτρήσεων και συγκεκριμένα, τις μέσες τιμές των παραμέτρων όπως προσδιορίζονται στον Πίνακα 18.

Η αντιστροφή απέδωσε τα 5 καλύτερα μοντέλα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σαν αρχικά μοντέλα για την αντιστροφή μεμονωμένων καμπυλών HVSr που ανήκουν σε κάθε ομάδα (Σχ. 86). Έτσι καθορίστηκαν τα ελαστικά μοντέλα για 48 εδαφικές στήλες, (Σχ. 87). Σε δύο περιοχές τα εδαφικά μοντέλα αποδείχτηκαν ασύμβατα με τα γεωτεχνικά δεδομένα της περιοχής, ως εκ τούτου απορρίφθηκαν και τελικά 46 τοποθεσίες χρησιμοποιήθηκαν για περαιτέρω αναλύσεις. Για κάθε εδαφική στήλη δίνονται τα πάχη των στρωμάτων, οι πυκνότητες οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων και ο παράγοντας ενίσχυσης. Στο Σχήμα 88 φαίνεται η κατανομή των ομάδων των καμπυλών στην πόλη.

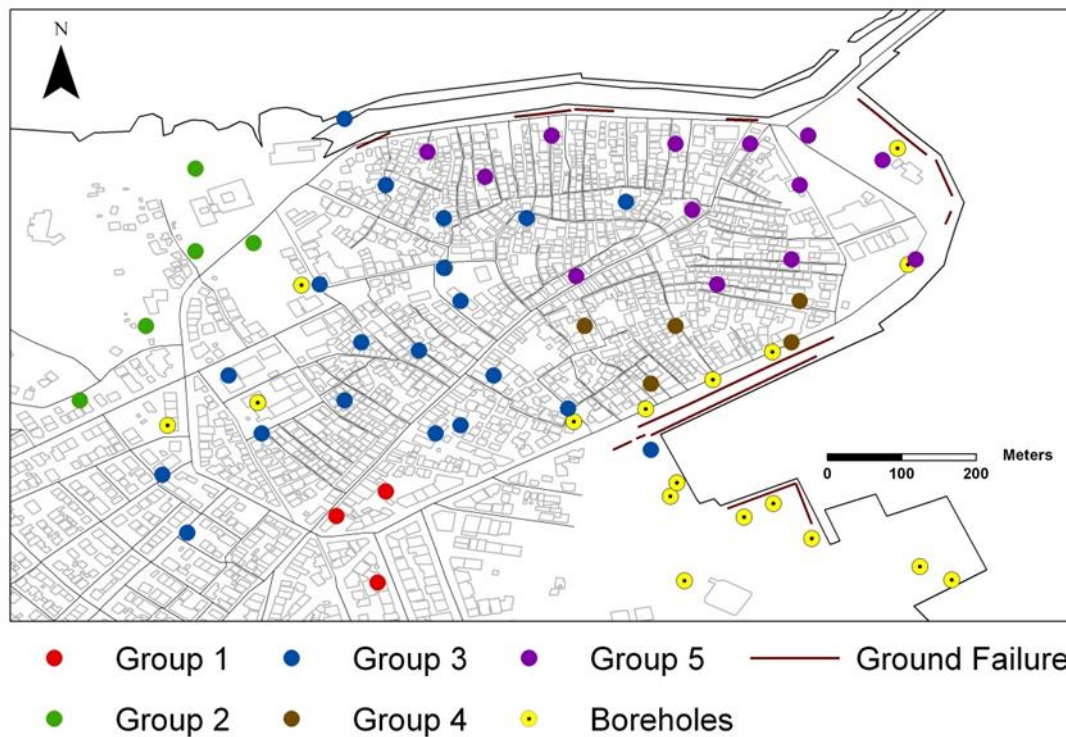
Όπως έχει αναφερθεί, το παραπάνω αναλυτικό πρόγραμμα βασίζεται σε θεωρητικές υποθέσεις, όπως της σύνθεσης του θορύβου από κύματα χώρου, της οριζόντιας διαστρωμάτωσης του εδάφους, της κάθετης διάδοσης των κυμάτων και άλλες. Όταν οι εν λόγω υποθέσεις παραβιάζονται σημαντικά, τα αποτελέσματα που προκύπτουν πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή (Herak, 2008). Κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί όταν ένα σημαντικό μέρος του περιβαλλοντικού θορύβου οφείλεται σε ανθρωπογενείς παράγοντες και οι τοπικές πηγές παράγουν κυρίως οριζόντιας διάδοσης, επιφανειακά κύματα (Bonnefoy-Claudet et al., 2006). Πρέπει να σημειωθεί ότι ο περιορισμός της κατακόρυφης διάδοσης των κυμάτων επιδρά στα αποτελέσματα όταν η διαφοροποίηση της ταχύτητας διάδοσης μεταξύ των χαλαρών εδαφικών στρωμάτων και του σκληρού βραχώδους υπόβαθρου είναι σημαντική.



Σχήμα 86 Κατηγοριοποίηση των HVSR καμπύλων της Λευκάδας με βάση την ομοιότητα του σχήματος. Η μέση καμπύλη παριστάνεται με κόκκινο και οι καμπύλες των διαφορετικών θέσεων με μαύρο για τις ομάδες 1 έως 5. Στους πίνακες κάτω από κάθε διάγραμμα εμφανίζονται τα γεωτεχνικά μοντέλα που προέρχονται από την αντιστροφή της μέσης καμπύλης κάθε ομάδας.



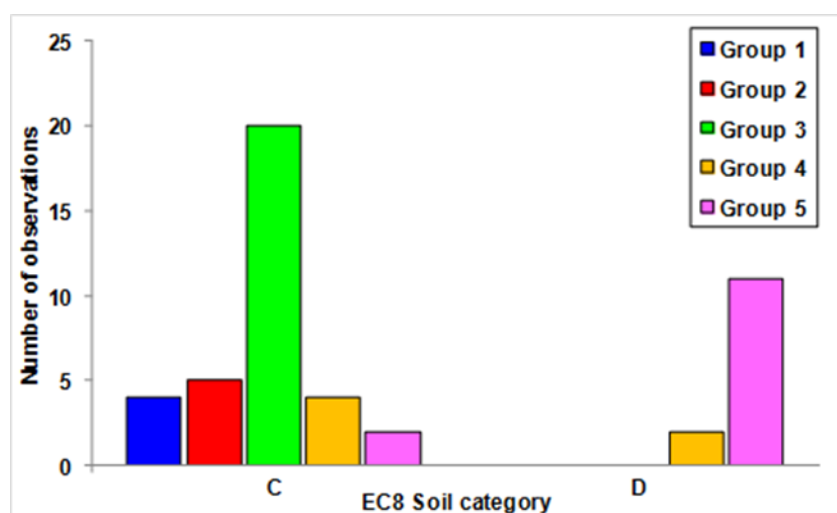
Σχήμα 87 Παράδειγμα αποτελέσματος του προγράμματος ModelHVSr. **Διάγραμμα συχνότητας – παράγοντα ενίσχυσης, καθώς και κατανομή της ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων με το βάθος συγκεκριμένης θέσης στην πόλη.**



Σχήμα 88 Χωρική κατανομή της κάθε ομάδας καμπυλών.

Η πιθανότητα τέτοια φαινόμενα να έχουν επηρεάσει τα αποτελέσματα της μελέτης ερευνήθηκε συσχετίζοντας τα ανεστραμμένα μοντέλα με αποτελέσματα γεωτρήσεων.

Γνωρίζοντας το γεωτεχνικό μοντέλο κάθε στήλης (πάχη στρωμάτων και ταχύτητα διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων εκάστου στρώματος), υπολογίσαμε την μέση ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων για πάχος 30 μ., (όπως την υπολογίσαμε και από τα δεδομένα των γεωτρήσεων). Οι τιμές κυμαίνονται μεταξύ των 145 και 285 m/s. Το είδος των εδαφών της πόλης όπως προκύπτει από τη μέθοδο της αναστροφής καμπυλών ταυτίζεται με εκείνο από τις γεωτρήσεις. (Σχ. 89)

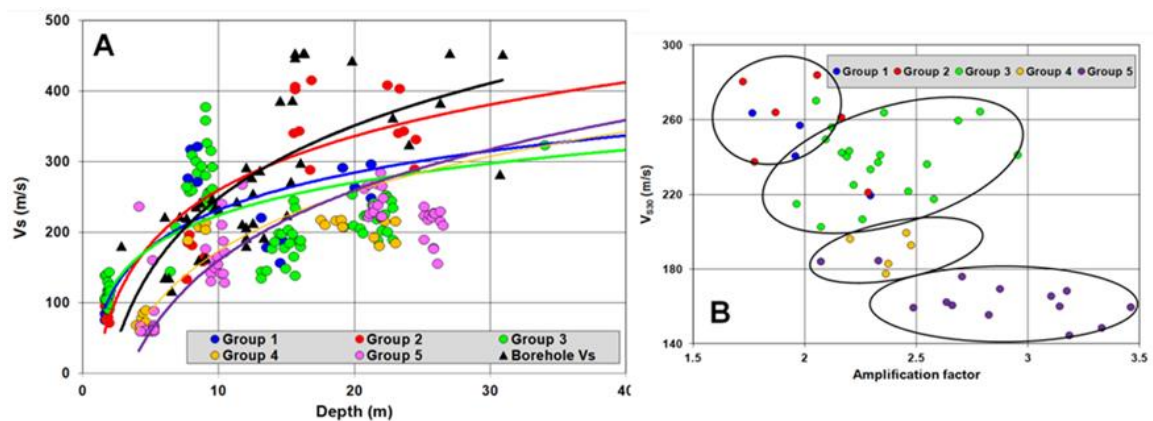


Σχήμα 89 Κατάταξη των εδαφών της πόλης της Λευκάδας από στοιχεία προερχόμενα από αναστροφή καμπυλών HVSR σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 8. Η θέση της κάθε ομάδας εμφανίζεται στο σχήμα 88.

Στο σχήμα 90(A) παρουσιάζεται η κατανομή των V_s από την αναστροφή καμπυλών και των υπολογισμένων V_s από μετρήσεις SPT, σε γεωτρήσεις διαφόρων βαθών. Κατά την εξέταση των επιμέρους παρατηρήσεων, διαπιστώθηκε αρχικά ασαφής σχέση μεταξύ τους. Για να διακρίνουμε πιθανές συστηματικές κατανομές, υπολογίσαμε τις βέλτιστες γραμμές τάσης για κάθε πληθυσμό παρατηρήσεων. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι υπολογισμένες από τις γεωτρήσεις V_s βρίσκονται εντός των ορίων αυτών που προέκυψαν από την αναστροφή καμπυλών εκτός από βάθη > 15 μ. Αυτό μπορεί να οφείλεται

στο γεγονός ότι σε αυτά τα βάθη συναντάμε το μαργαϊκό υπόβαθρο, όπου η έμμεση εκτίμηση της ταχύτητας διάδοσής του έγινε μέσω εμπειρικών σχέσεων.

Στη συνέχεια εξετάσαμε την πιθανότητα οι αποκλίσεις να συμβαίνουν λόγω της εμπέδησης ανάμεσα στις επιφανειακές και στις βαθύτερες δομές, οι οποίες σχετίζονται με χαμηλούς συντελεστές ενίσχυσης των καμπυλών HVSR. Στο σχήμα 90(B) προβάλλονται οι υπολογισμένες από αναστροφή V_{S30} σε σχέση με τους παράγοντες ενίσχυσης των αντίστοιχων καμπυλών HVSR.



Σχήμα 90 (Α) Σύγκριση μεταξύ V_S που προέρχονται από μοντελοποίηση HVSR και από μετρήσεις SPT, σε γεωτρήσεις διαφόρων βαθών. (Β) Σύγκριση μεταξύ κατανομής της ταχύτητας V_{S30} (από τα αποτελέσματα του αναλυτικού μοντέλου) με τον παράγοντα ενίσχυσης των αντίστοιχων καμπυλών HVSR. Οι καμπύλες αντιπροσωπεύουν τις γραμμές παλινδρόμησης, οι ελλείψεις περιέχουν τις ομάδες HVSR.

Παρατηρείται μείωση της διασποράς των τιμών V_{S30} με την αύξηση των συντελεστών ενίσχυσης. Διακρίνονται τρεις ομάδες εδαφικών στηλών, οι 3, 4 και 5. Οι ομάδες 1 και 2 παρουσιάζουν την μεγαλύτερη διασπορά V_{S30} και μια αρκετά ασαφή σχέση. Για τις ομάδες 3, 4 και 5, ο αριθμός παρατηρήσεων είναι αρκετά μικρός, ωστόσο συνδέονται με χαμηλούς συντελεστές ενίσχυσης,

που πιθανόν αποδίδονται στη χαμηλή εμπέδηση ή / και στην απόκλιση των κυμάτων από την κάθετη διάδοση τους

8.4 Αποτελέσματα

Από τις ταχύτητες κάθε στρώματος και του συνόλου των στρωμάτων σε βάθος 30 m για τις 46 θέσεις, υπολογίστηκε η κατανομή των ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων και των παχών για κάθε εδαφικό σχηματισμό σε όλη την πόλη, καθώς και η μέση ταχύτητα διάδοσης των εν λόγω κυμάτων για πάχος 30 μέτρων. Σχεδιάστηκαν αντίστοιχοι χάρτες.

Στον πρώτο χάρτη (Σχ. 91) παρατηρούμε την κατανομή του πάχους του πρώτου γεωλογικού στρώματος στην περιοχή της πόλης της Λευκάδας. Πιο συγκεκριμένα, βλέπουμε ότι το πρώτο στρώμα των τεχνητών αποθέσεων έχει μικρό πάχος στο δυτικό τμήμα της περιοχής (1.6 m) και μεγαλύτερο στο ανατολικό τμήμα (5.2 m).

Στο δεύτερο χάρτη (Σχ. 92) παρατηρούμε την κατανομή των ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στο πρώτο γεωλογικό στρώμα. Έχουμε ένα εύρος τιμών από 60 (κόκκινο) έως 143.45 (μπλε). Οι χαμηλές τιμές (κόκκινο ως κίτρινο) παρατηρούνται στο A-BA τμήμα της παλαιάς πόλης της Λευκάδας, καθώς και σε δύο ακόμη θέσεις στο ΝΔ και στο ΒΔ τμήμα. Οι υψηλές τιμές (γαλάζιο ως μπλε) παρατηρούνται κυρίως στον κεντρικό άξονα της πόλης.

Το δεύτερο στρώμα της αργίλου (Σχ.93) έχει μικρό πάχος στο ανατολικό τμήμα της περιοχής (3.8 m) και μεγαλύτερο στο δυτικό τμήμα (7.6 m). Οι ταχύτητες διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στο δεύτερο γεωλογικό στρώμα (Σχ. 94) παρουσιάζουν ένα εύρος τιμών από 130 (κόκκινο) έως 375 (μπλε). Χαμηλές τιμές (κόκκινο ως κίτρινο) παρατηρούμε στο A-BA τμήμα της παλαιάς πόλης της Λευκάδας, καθώς και σε μία ακόμη θέση στο ΒΔ τμήμα. Υψηλές τιμές (γαλάζιο ως μπλε) παρατηρούμε στον κεντρικό άξονα της πόλης, καθώς και στο ΝΔ τμήμα αυτής. Η κατανομή που συναντάμε στις ταχύτητες διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων των στρωμάτων I και II είναι σχεδόν όμοια, ενώ η κατανομή του πάχους των στρωμάτων αυτών είναι αντίστροφη μεταξύ τους.

Παρατηρούμε ότι αυτό το τρίτο στρώμα της άμμου (Σχ.95) έχει μικρό πάχος στο δυτικό τμήμα της περιοχής (5.3 m) και μεγαλύτερο στο ανατολικό τμήμα (11.7 m). Το εύρος των τιμών ταχυτήτων κυμαίνεται από 135 (κόκκινο) έως 406.5 (μπλε). Οι χαμηλές τιμές (κόκκινο ως κίτρινο) παρατηρούνται σχεδόν σε όλη την έκταση της παλαιάς πόλης της Λευκάδας, ενώ οι υψηλές τιμές (γαλάζιο ως μπλε) παρατηρούνται μόνο σε δύο θέσεις στο Α-ΒΑ κομμάτι της πόλης, καθώς και ΒΔ (Σχ.96). Παρατηρούμε ότι, στις θέσεις όπου το στρώμα έχει μικρότερο πάχος, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων αυξάνεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό.

Το τέταρτο στρώμα της αμμώδους ιλύος (Σχ.97) έχει μικρό πάχος στο ανατολικό τμήμα της περιοχής (3.6 m) και μεγαλύτερο στο δυτικό τμήμα (7.7 m). Το εύρος τιμών των ταχυτήτων διάδοσης κυμαίνεται από 156 (κόκκινο) έως 408.5 (μπλε). Χαμηλές τιμές (κόκκινο ως κίτρινο) παρατηρούνται σχεδόν σε όλη την έκταση της παλαιάς πόλης της Λευκάδας. Υψηλές τιμές (γαλάζιο ως μπλε) παρατηρούνται μόνο στο ΒΔ τμήμα της πόλης, καθώς και σε πολύ μικρή έκταση στο ΝΔ τμήμα (Σχ.98)

Η κατανομή των ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων στα στρώματα III και IV είναι σχεδόν όμοια, ενώ η κατανομή του πάχους των στρωμάτων αυτών είναι αντίστροφη μεταξύ τους.

Στο χάρτη κατανομής ταχύτητας του πέμπτου γεωλογικού στρώματος, (Σχ.99) παρατηρούμε αλλαγές μέσα στα όρια της παλαιάς πόλης. Το εύρος τιμών των ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στο μαργαϊκό στρώμα αυξομειώνονται από 327.4 (κόκκινο) έως 566.5 (μπλε). Οι χαμηλές τιμές (κόκκινο ως κίτρινο) παρατηρούνται στον κεντρικό άξονα, καθώς και στο δυτικό τμήμα της παλαιάς πόλης της Λευκάδας, ενώ οι υψηλές τιμές (γαλάζιο ως μπλε) στο ανατολικό τμήμα της πόλης, καθώς και σε μια θέση στο ΒΔ τμήμα. Το συγκεκριμένο στρώμα έχει μικρό πάχος στο δυτικό τμήμα της περιοχής (29 m) και μεγαλύτερο στο ανατολικό τμήμα (57.4 m), με κάποιες μικρές εμφανίσεις και στο κεντρικό και νότιο τμήμα (Σχ.100). Στις θέσεις που το σκληρότερο υπόβαθρο έχει μεγαλύτερο πάχος, η ταχύτητα διάδοσης των σεισμικών κυμάτων αυξάνεται σε αρκετά μεγάλο βαθμό, ενώ όταν το πάχος μικραίνει η ταχύτητα ακολουθεί αυτήν τη μείωση.

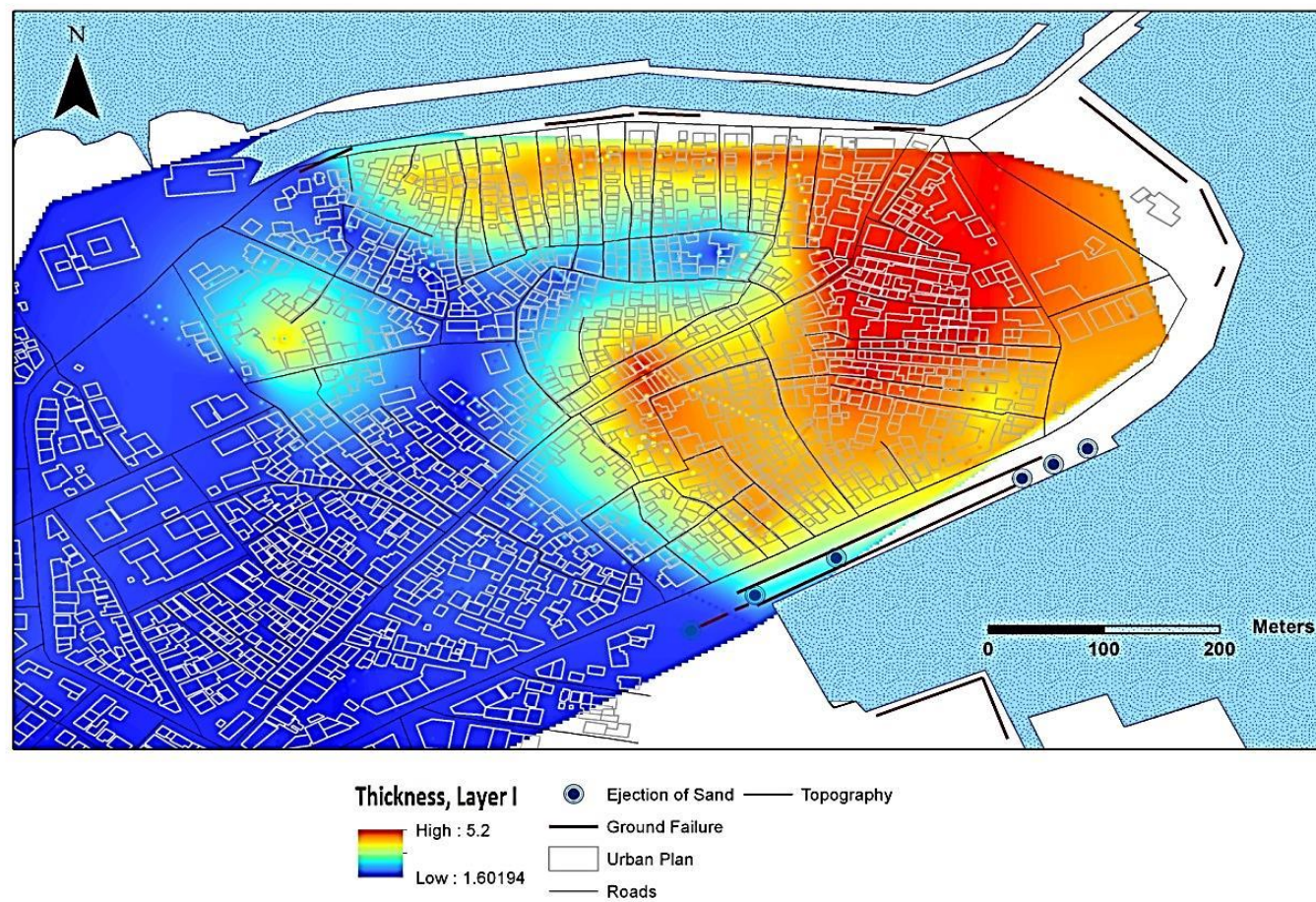
Στο χάρτη κατανομής V_{s30} στην πόλη της Λευκάδας (Σχ. 101), οι χαμηλότερες τιμές (κόκκινο ως κίτρινο) εμφανίζονται στην ανατολική πλευρά της πόλης, καθώς και σε θέσεις στα ΒΑ και ΝΑ της πόλης. Τέλος, οι υψηλές τιμές (γαλάζιο ως μπλε) εμφανίζονται μόνο ΒΔ και ΝΔ, καθώς και σε κάποιες θέσεις στο κέντρο της πόλης.

Προβάλλοντας τα κτίρια που υπέστησαν βαθμό βλάβης 3 ή 4 (όπως περιγράφεται στο προηγούμενο κεφάλαιο) κατά το σεισμό του 2003, στο χάρτη κατανομής της ταχύτητας διάδοσης των εγκαρσίων κυμάτων παρατηρούμε μεγαλύτερη συγκέντρωση στο βόρειο και βόρειο-ανατολικό τμήμα της πόλης. Εκεί οι τιμές ταχύτητας διάδοσης εγκαρσίων κυμάτων (V_s) παίρνουν τις χαμηλότερες τιμές.

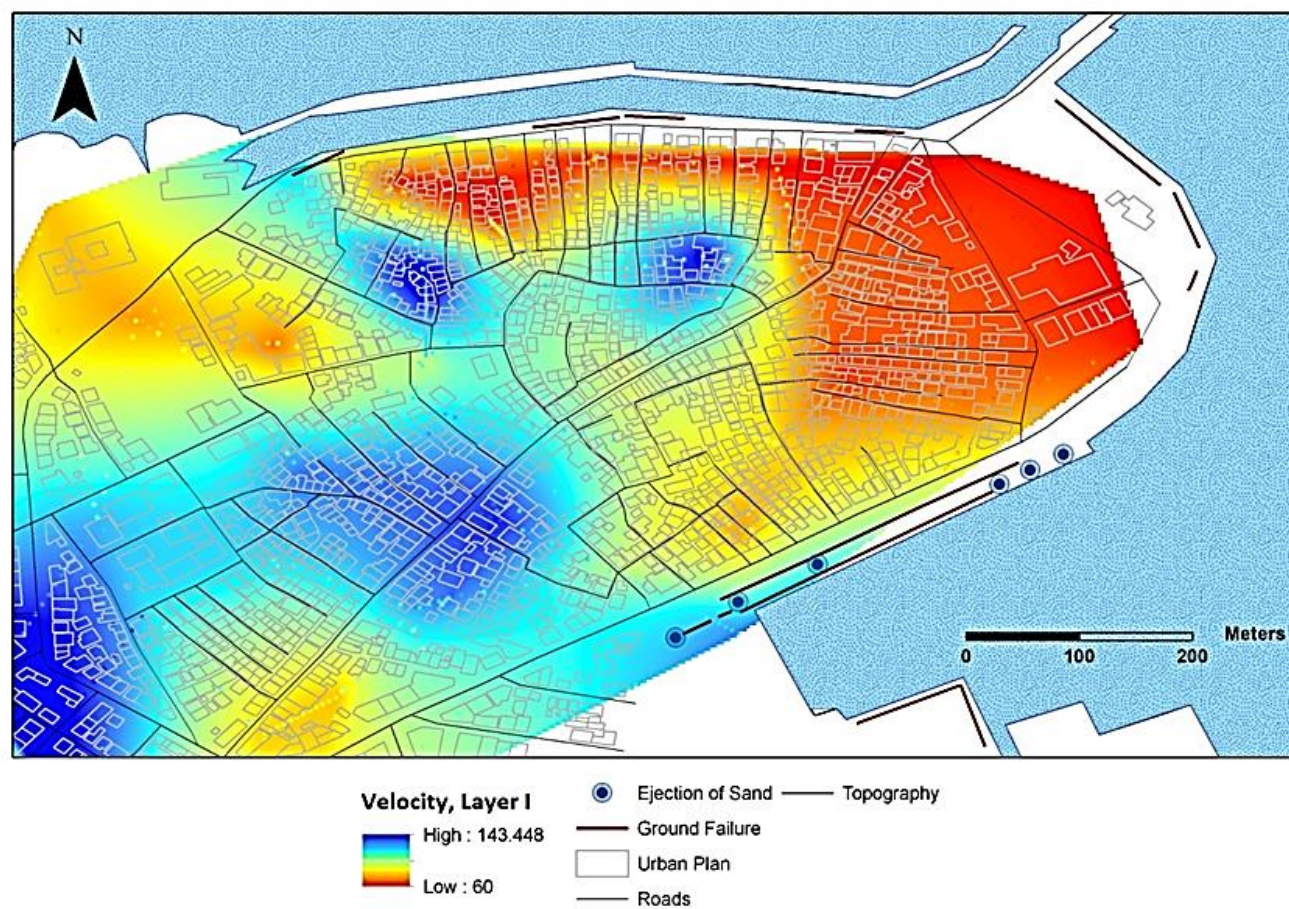
Στο σχήμα 102 προβάλλεται επίσης το υλικό κατασκευής των κτιρίων που έχουν υποστεί βλάβη. Τα περισσότερα είναι χτισμένα με παραδοσιακό τρόπο δόμησης. Στο χάρτη αυτό φαίνονται και τα μνημειακά κτίρια της πόλης, καθώς γνωρίζουμε το βαθμό βλάβης και το υλικό δόμησης. Αντίθετα στο χάρτη του σχήματος 103 δεν προβάλλονται οι βλάβες των μνημειακών κτιρίων. Στον εν λόγω χάρτη φαίνονται οι δείκτες τρωτότητας των κτιρίων που έχουν υποστεί βλάβη. Κάποια κτίρια κατά μήκος του εμπορικού δρόμου έχουν υποστεί βαθμό βλάβης 3 ή 4 παρόλο που είναι θεμελιωμένα σε εδάφη με μικρότερη V_s . Αυτό μπορεί να αιτιολογηθεί από τον υψηλό δείκτη τρωτότητας λόγω ασταθούς ορόφου στο ισόγειο.

Όπως φαίνεται, ο δείκτης τρωτότητας και η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων χώρου επηρεάζουν καθοριστικά τη σεισμική συμπεριφορά των κτιρίων.

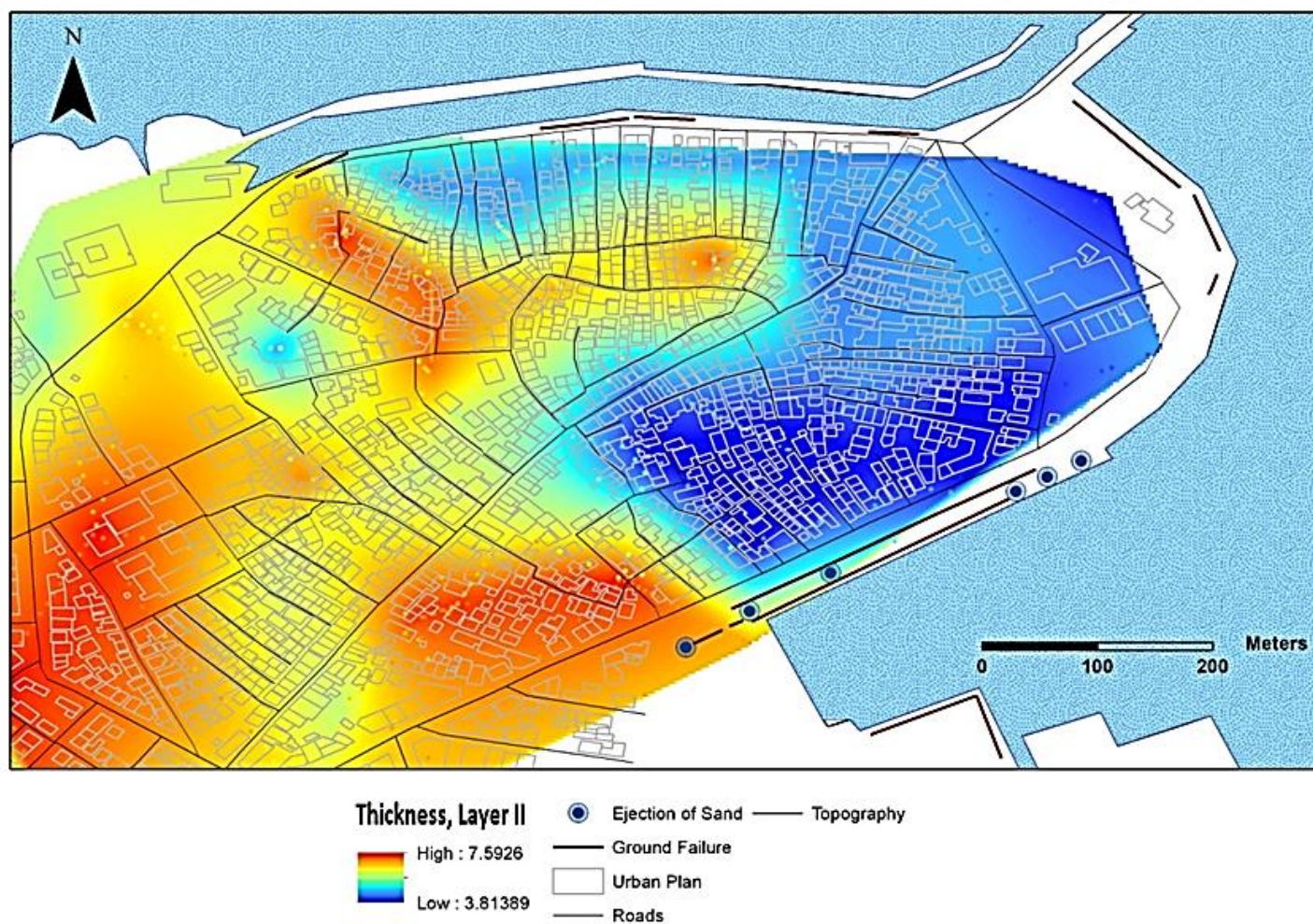
Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφεται η προσομοίωση της εδαφικής κίνησης για δεδομένο σεισμό λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα ελαστικά χαρακτηριστικά της εδαφικής στήλης σε κάθε θέση.



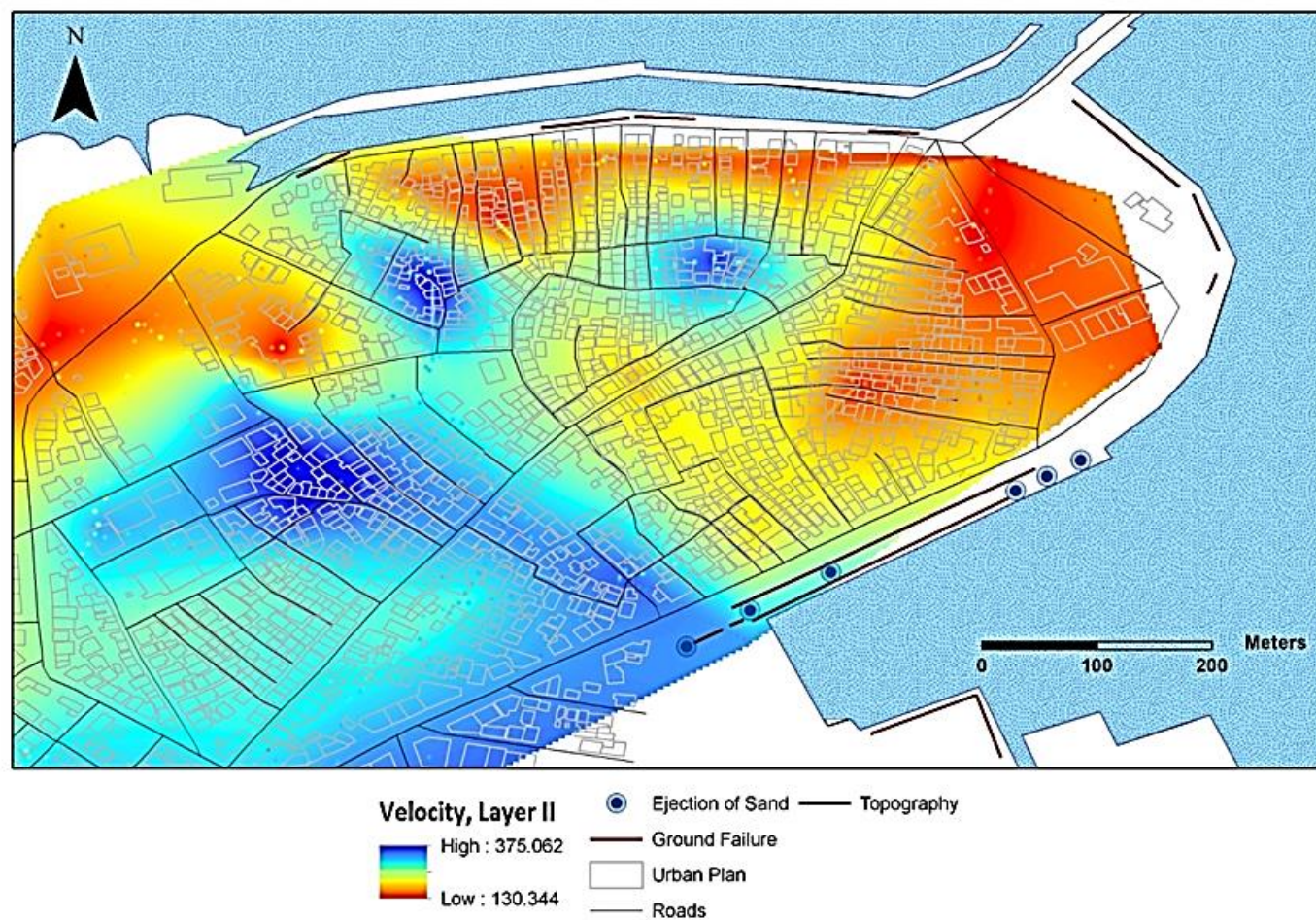
Σχήμα 91 Χάρτης κατανομής του πάχους του στρώματος από τεχνητές αποθέσεις (Πρώτο γεωλογικό στρώμα)



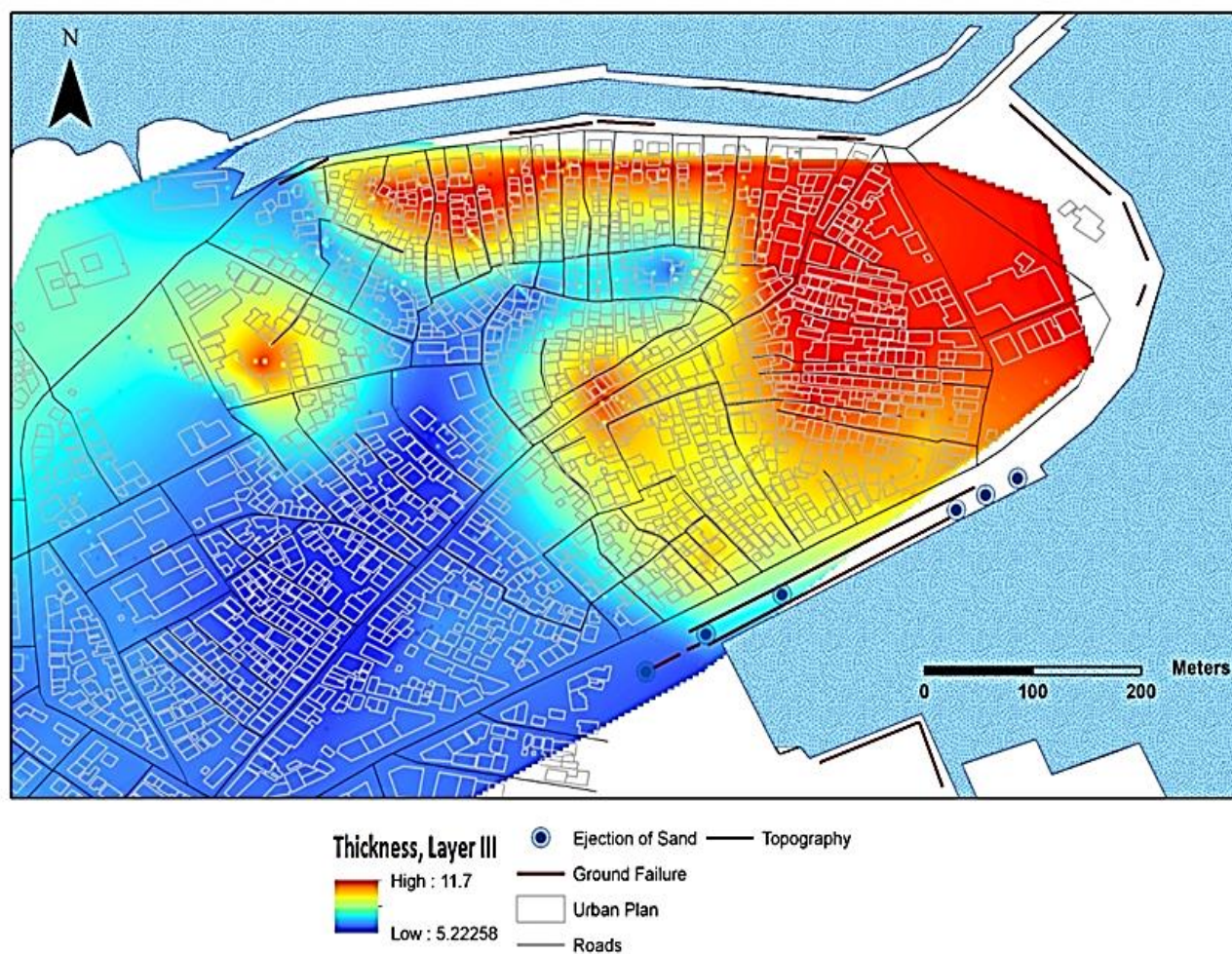
Σχήμα 92 Χάρτης κατανομής των ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στο πρώτο γεωλογικό στρώμα της περιοχής.



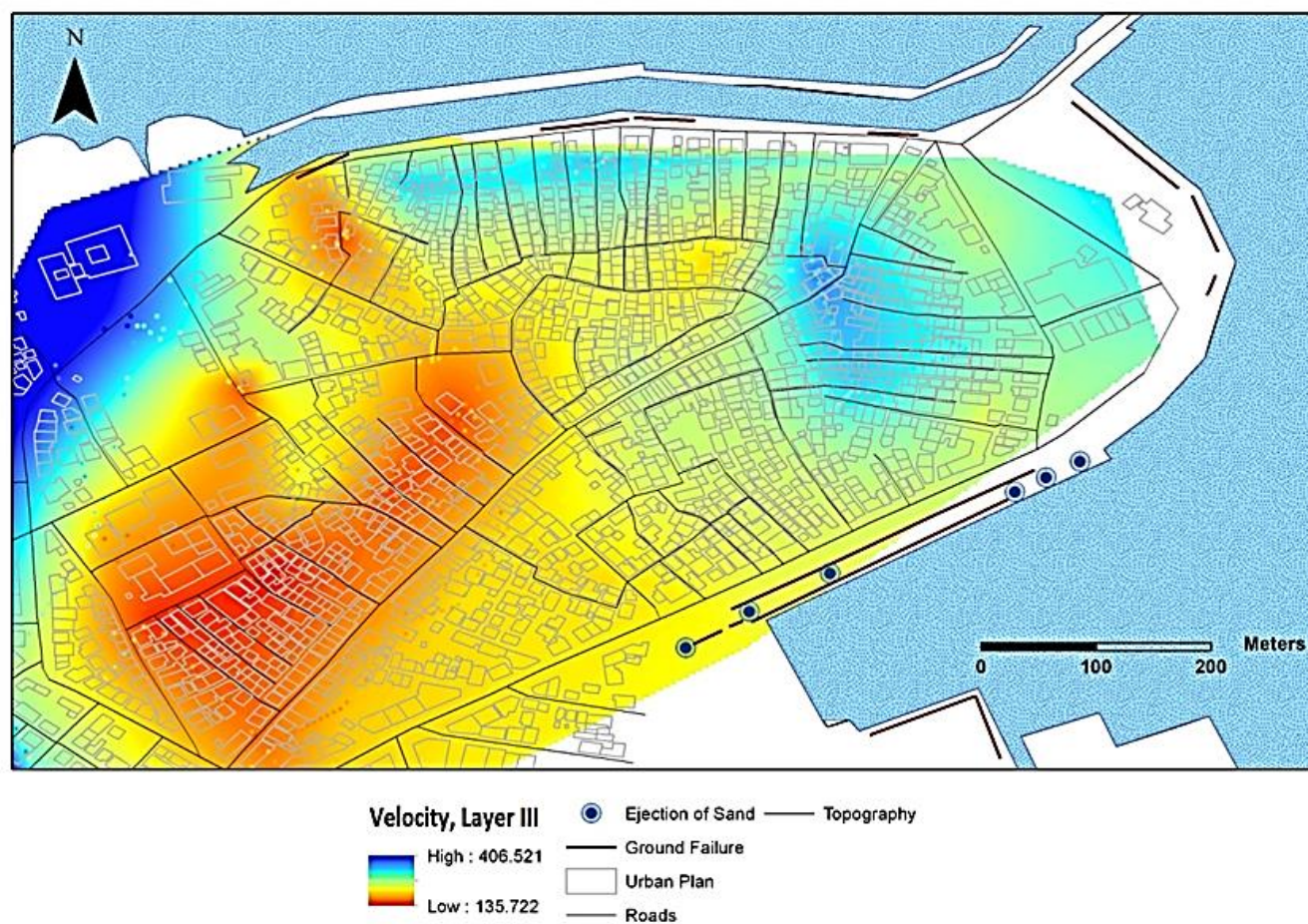
Σχήμα 93 Χάρτης κατανομής του πάχους του Αργιλικού γεωλογικού στρώματος (δεύτερο γεωλογικό στρώμα) .



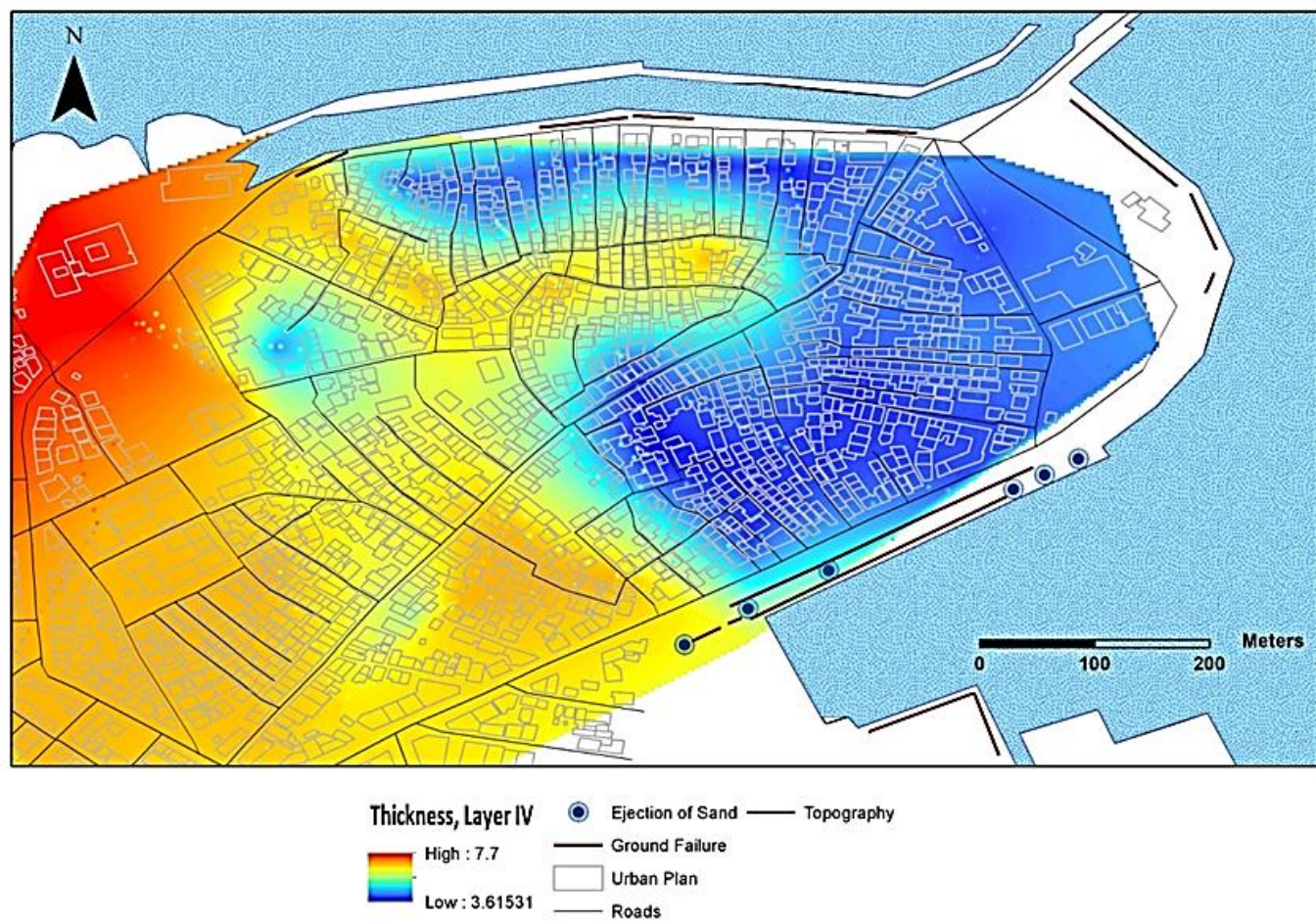
Σχήμα 94 Χάρτης κατανομής των ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στο δεύτερο γεωλογικό στρώμα της περιοχής.



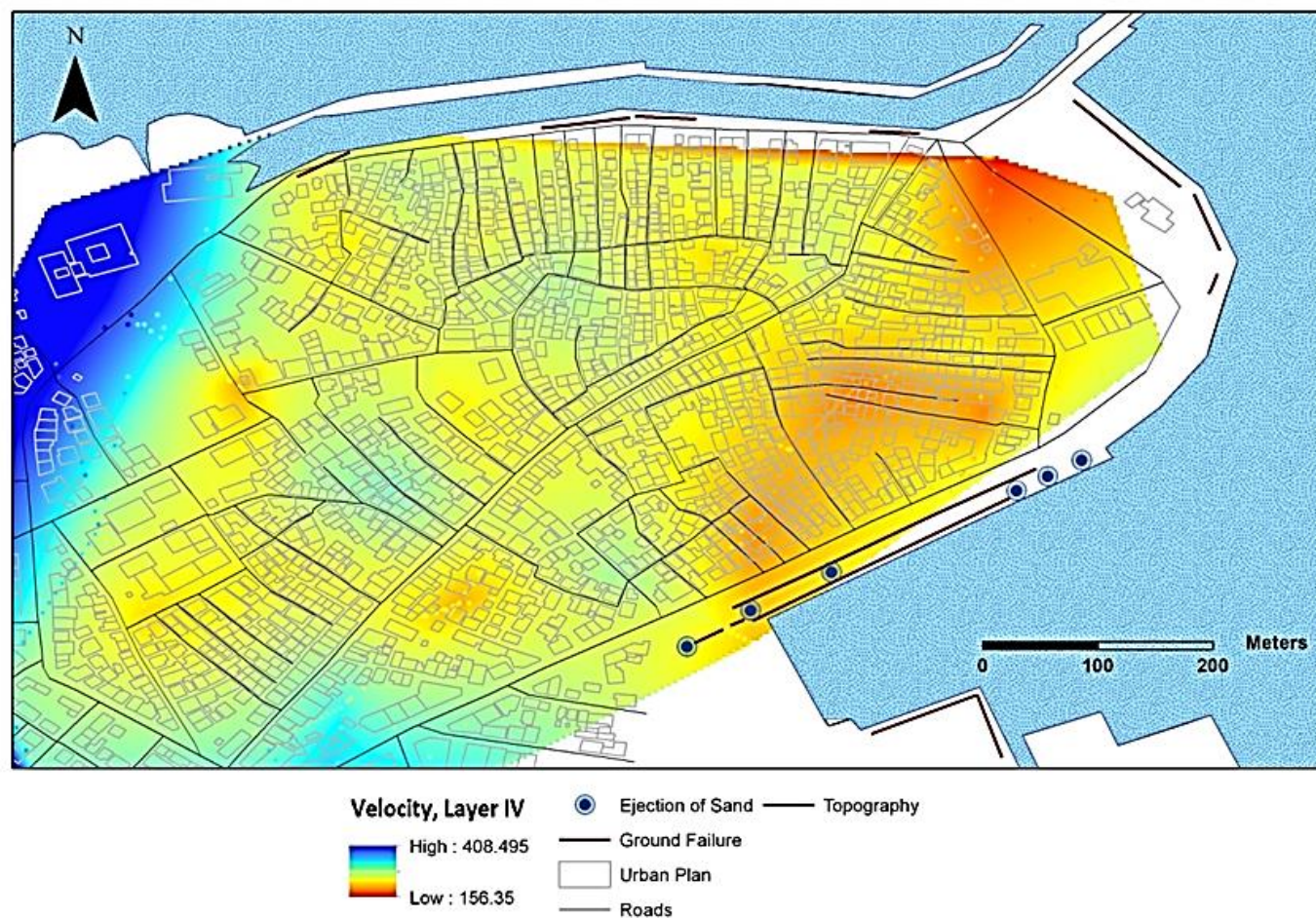
Σχήμα 95 Χάρτης κατανομής του πάχους του Αμμώδους γεωλογικού στρώματος (τρίτο γεωλογικό στρώμα)



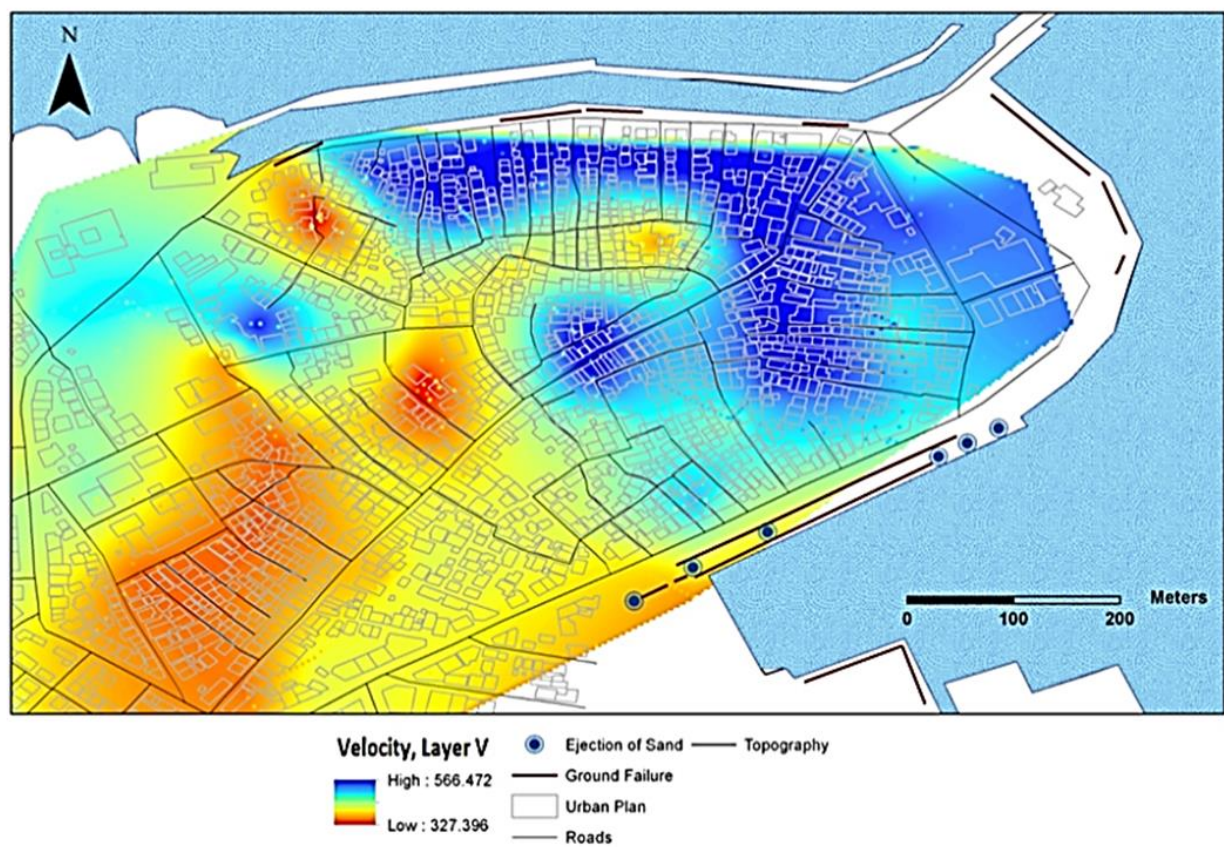
Σχήμα 96 Χάρτης κατανομής των ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στο τρίτο γεωλογικό στρώμα της περιοχής.



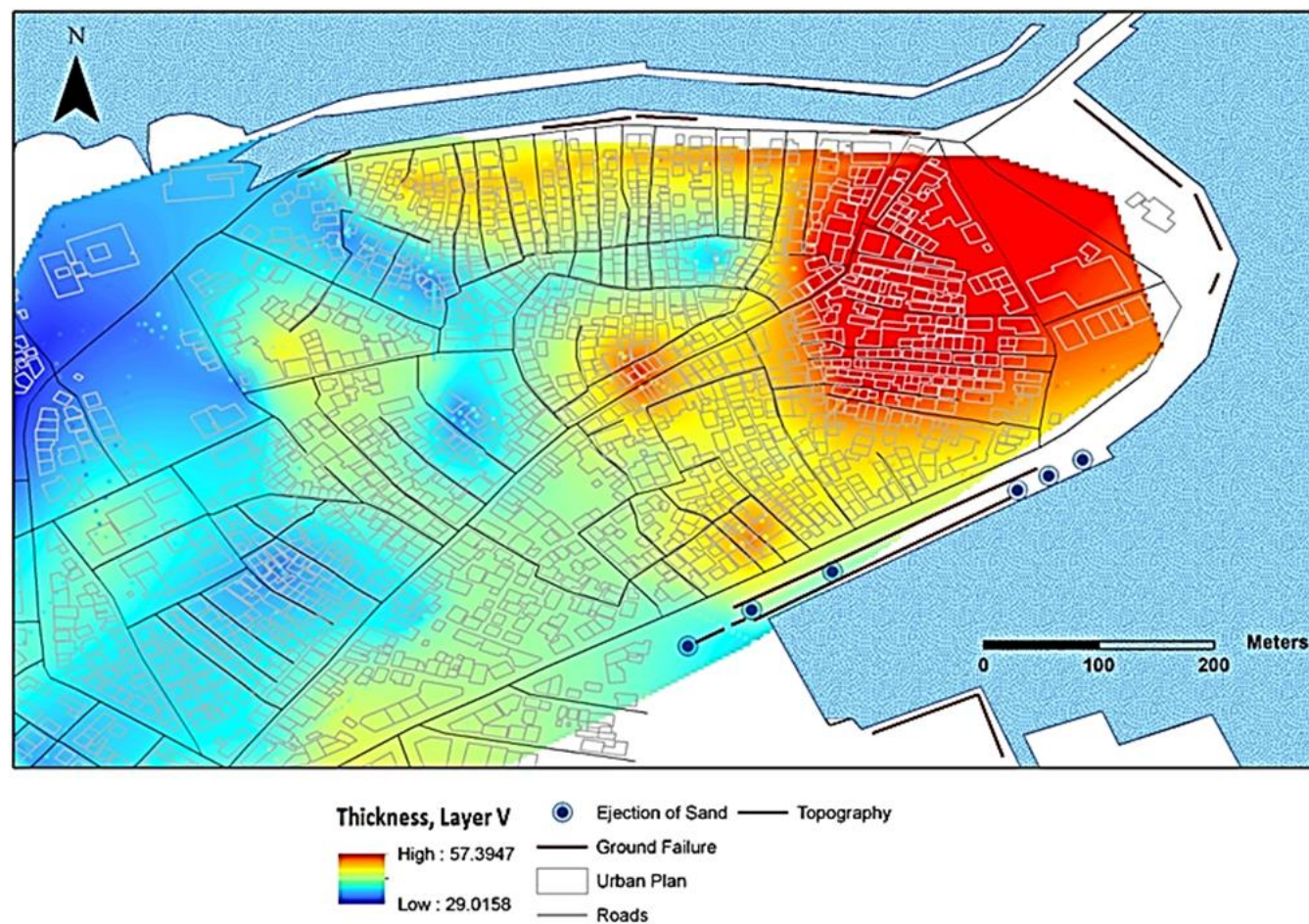
Σχήμα 97 Χάρτης κατανομής του πάχους του γεωλογικού στρώματος από αμμώδη ιλύ (τέταρτο γεωλογικό στρώμα)



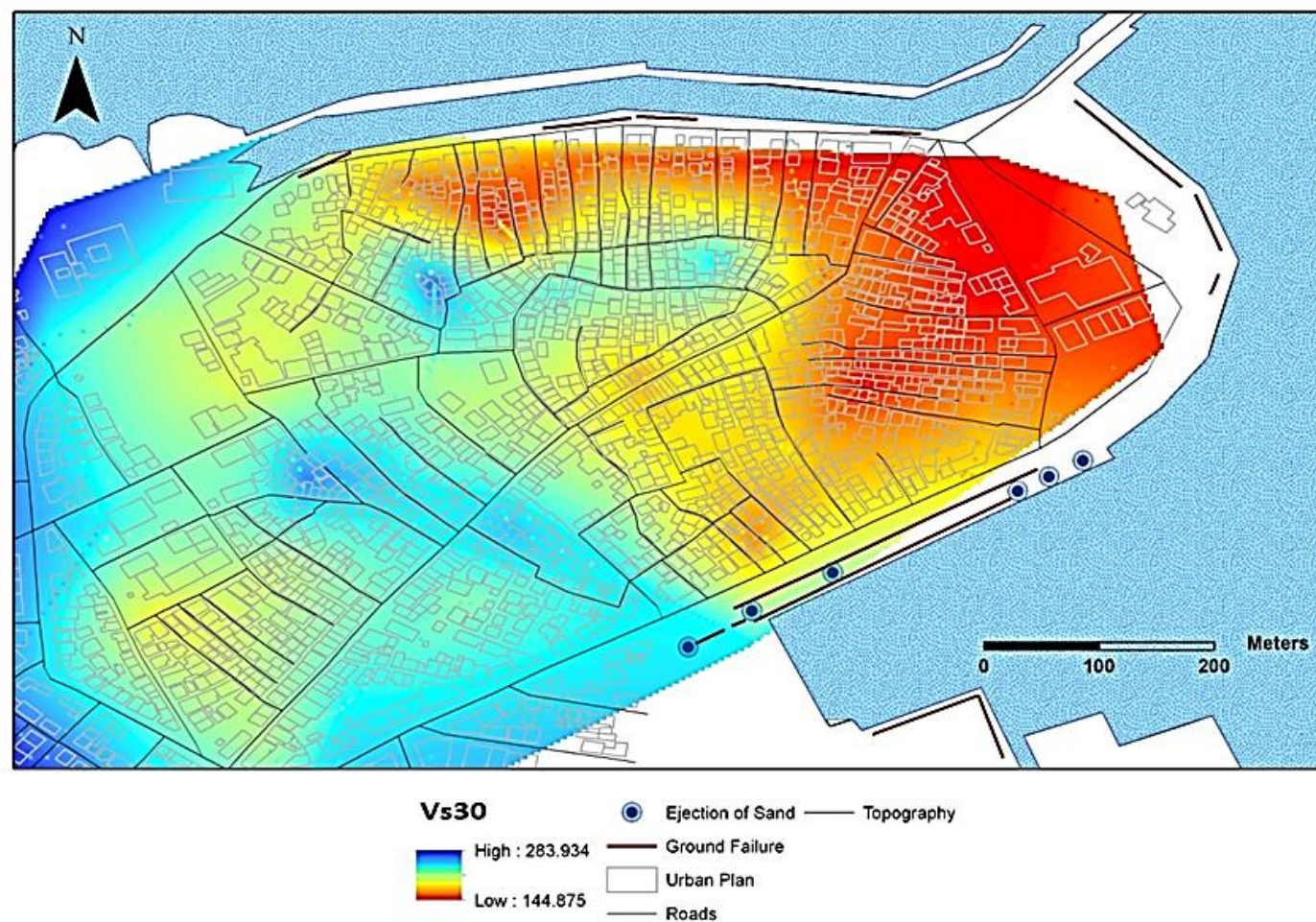
Σχήμα 98 Χάρτης με την κατανομή των ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στο τέταρτο γεωλογικό στρώμα της περιοχής.



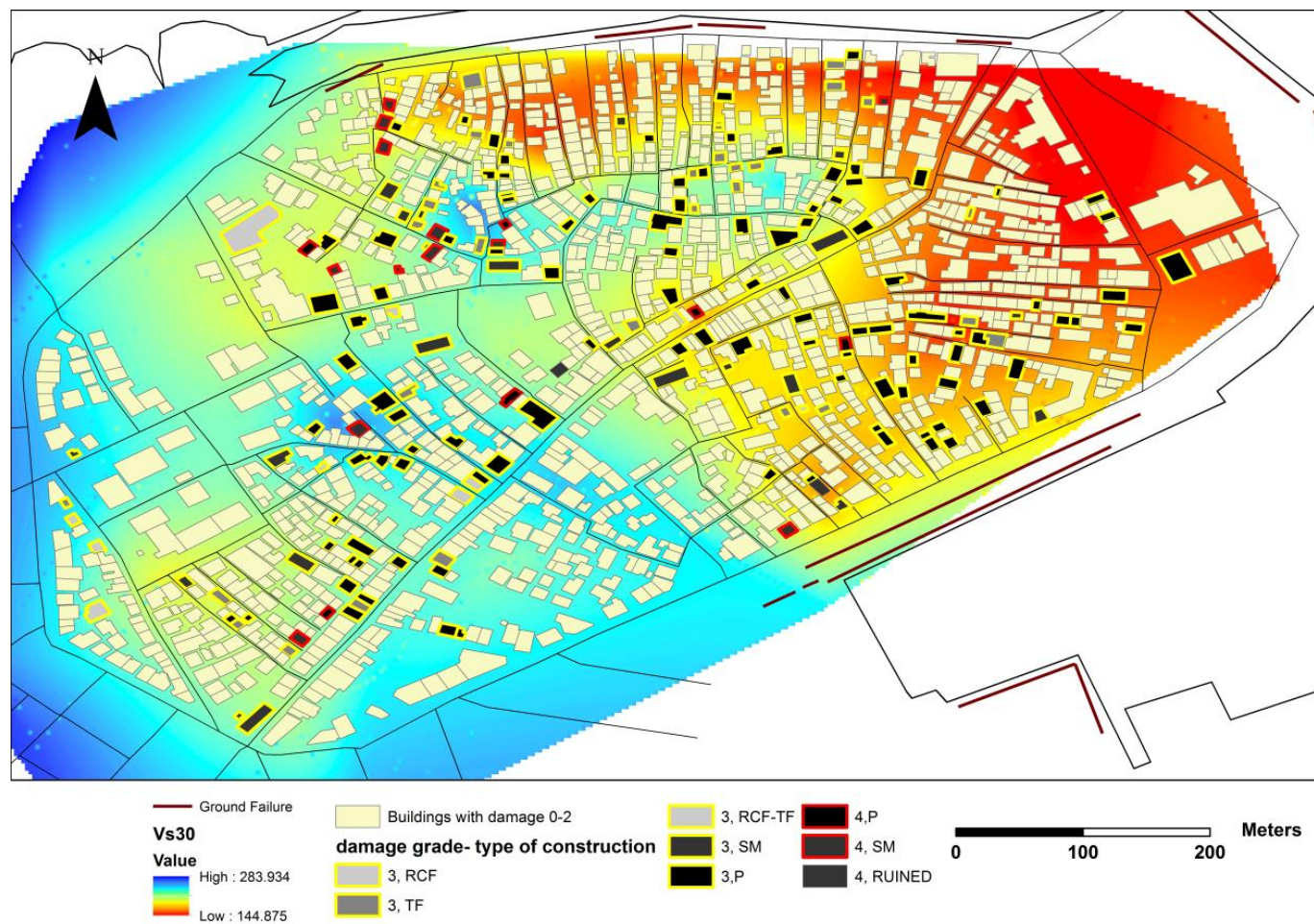
Σχήμα 99 Χάρτης με την κατανομή των ταχυτήτων διάδοσης εγκάρσιων σεισμικών κυμάτων στο πέμπτο γεωλογικό στρώμα τη περιοχής.



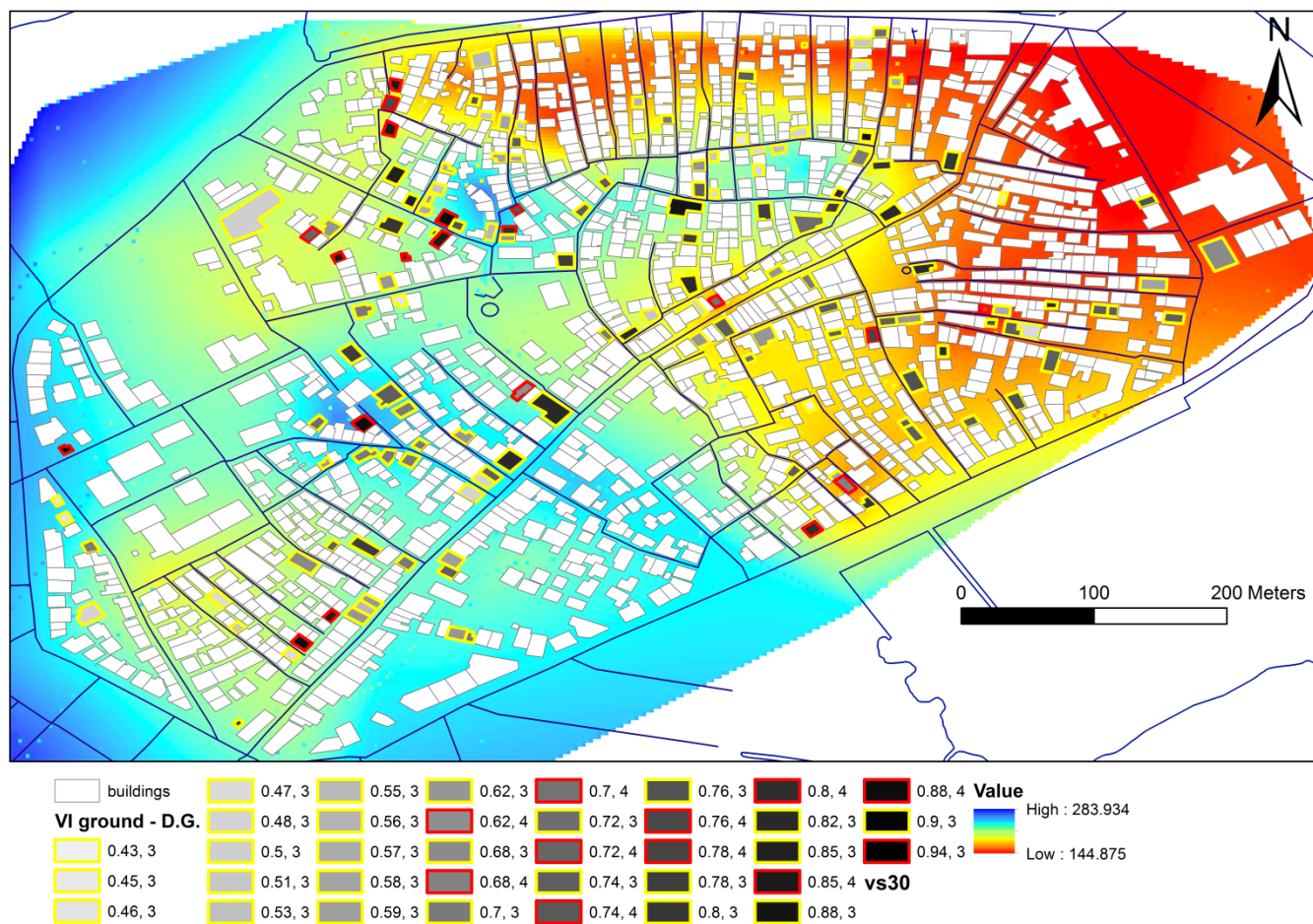
Σχήμα 100 Χάρτης με την κατανομή του πάχους του μαργαϊκού γεωλογικού στρώματος (πέμπτο γεωλογικό στρώμα).



Σχήμα 101 Χάρτης κατανομής της Vs30 στην πόλη της Λευκάδας



Σχήμα 102 Χωροταξική κατανομή των βλαβών σε σχέση με τον τύπο κατασκευής και τις τιμές ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων.



Σχήμα 103 Χωροταξική κατανομή των βλαβών σε σχέση με το δείκτη τρωτότητας και τις τιμές ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

Προσομοίωση Ισχυρής Εδαφικής Κίνησης.

9.1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η ανάλυση των μεθόδων προσομοίωσης που εφαρμόστηκαν για τον υπολογισμό υψίσυχνων συνθετικών χρονοσειρών επιταχύνσεων στην πόλη της Λευκάδας. Στην υπό μελέτη περιοχή δεν υπάρχουν διαθέσιμες καταγραφές για το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος σεισμού. Η προσομοίωση ισχυρών εδαφικών κινήσεων αποτελεί προϋπόθεση για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου σε αντίστοιχες περιπτώσεις όπου καταγραφές μεγάλων σεισμών δεν είναι διαθέσιμες.

Για την προσομοίωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης για μεγάλους σεισμούς εγγύς πεδίου εντός Λευκάδας χρησιμοποιήθηκαν οι στοχαστικές μέθοδοι σημειακής πηγής και πεπερασμένου ρήγματος. Οι παράμετροι που περιλαμβάνονται σε αυτά τα μοντέλα είναι η γεωμετρία του ρήγματος που μπορεί να προκαλέσει ισχυρό σεισμό, σχέσεις απόσβεσης της εγγύτερης περιοχής (Boore, 2005) και η ενίσχυση της εδαφικής στήλης.

Η ισχυρή εδαφική κίνηση προσομοιώθηκε σε 46 θέσεις στην πόλη της Λευκάδας για 2 σεισμικά σενάρια. Το ένα σενάριο αφορά σεισμό μεγέθους M6.2, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά του σεισμού της 14.8.2003 και το δεύτερο, σεισμό μεγέθους M7 που, σύμφωνα με την πιθανολογική μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας (Kassaras et al., 2015), είναι το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος για την περιοχή. Τα αποτελέσματα του πρώτου σεναρίου χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της ορθότητας του προτεινόμενου μοντέλου, ενώ αυτά του δεύτερου, για την πρόβλεψη των μέγιστων πιθανών βλαβών που δύνανται να υποστούν μελλοντικά τα κτίρια της Λευκάδας.

9.2 Προσομοίωση του σεισμού του 2003

9.2.1 Μέθοδος σημειακής πηγής

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο σεισμός της 14^{ης} Αυγούστου 2003 είχε μέγεθος Mw 6.2. Έλαβε χώρα στο ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης της Λευκάδας με διεύθυνση N12° και κλίση 81° (Benetatos et al., 2005; Papadimitriou et al., 2006), σε βάθος 12 km και απόσταση 13 km από το κέντρο της Λευκάδας. (Πίνακας 22).

Το υπολογιστικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή της μεθόδου σημειακής πηγής είναι το Στοχαστικό Μοντέλο Προσομοίωσης (Stochastic Model SIMulation - SMSIM, Boore, 2003). Το επίκεντρο του σεισμού αποτελεί σημαντική παράμετρο που πρέπει να λάβουμε υπόψη κατά την προσομοίωση. Για την εφαρμογή της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε η υποκεντρική λύση που προτείνεται από τους Karakostas and Papadimitriou (2010). Το φάσμα της επιτάχυνσης εκφράζεται ως αποτέλεσμα συνέλιξης πηγής, διαδρομής και εδαφικών συνθηκών.

Το φάσμα της σεισμικής κίνησης προσομοιώνεται βάσει της ακόλουθης σχέσης (Joyner and Boore, 1988; Boore, 1996):

$$R(f) = CS(f)A(f)D(f)I(f) \quad (32)$$

όπου C ο παράγοντας κλίμακας, S(f) το φάσμα της πηγής, A(f) ο παράγοντας ενίσχυσης της θέσης, D(f) η συνάρτηση απόσβεσης και I(f) ένας παράγοντας που περιλαμβάνει την απόκριση του οργάνου και φίλτρα που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία.

Το σχήμα και το πλάτος του φάσματος της πηγής καθορίστηκε από το μοντέλο που προτείνει ο Haddon (1996) (two source model). Η παράμετρος που ελέγχει το σχήμα του φάσματος της πηγής S(f) είναι η πτώση τάσης ($\Delta\sigma$), όπου

$$S(f) = M_0 / [1 + (f/f_0)^2] \text{ και} \quad (33)$$

$$f_0 = 4.9 \cdot 10^6 \beta (\Delta\sigma / M_0)^{1/3} \quad (34)$$

όπου M_0 είναι η σεισμική ροπή και f_0 η γωνιακή συχνότητα (Margaris and Boore, 1998).

Η σχέση που επιλέχθηκε για τον υπολογισμό της απόσβεσης της εδαφικής κίνησης από την πηγή στη θέση ενδιαφέροντος είναι η ακόλουθη (Boore, 2005):

$$\exp(-\pi f r / Q(f) c_q) \quad (35)$$

Στη σχέση αυτή η συνάρτηση $Q(f)$ περιγράφεται από διάγραμμα του λογαρίθμου του παράγοντα Q , με το λογάριθμο των συχνοτήτων του διαστήματος, συνδυάζοντας τις ανελαστικές ιδιότητες των σχηματισμών μέσω των οποίων διαδίδεται το σεισμικό κύμα. Η παράμετρος c_q αφορά στην ταχύτητα διάδοσης. Οι τιμές επιλέχθηκαν από την παραμετροποίηση των Margaritis and Boore (1998) για την προσομοίωση σεισμών του Ελλαδικού χώρου.

Για την απόσβεση υψηλών συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε φίλτρο $D(f)$ της μορφής:

$$D(f) = \exp(-\pi k_0 f) \text{ (Anderson and Hough 1984).} \quad (36)$$

Η παράμετρος k_0 ελέγχει τις υψηλές συχνότητες της συνάρτησης απόσβεσης $D(f)$ και εξαρτάται από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες. Καθορίστηκε ίση με 0.08 μέσω βιβλιογραφικών δεδομένων για σεισμούς στον ελλαδικό χώρο (Margaritis and Boore, 1998) και δοκιμές αποδοχής-απόρριψης.

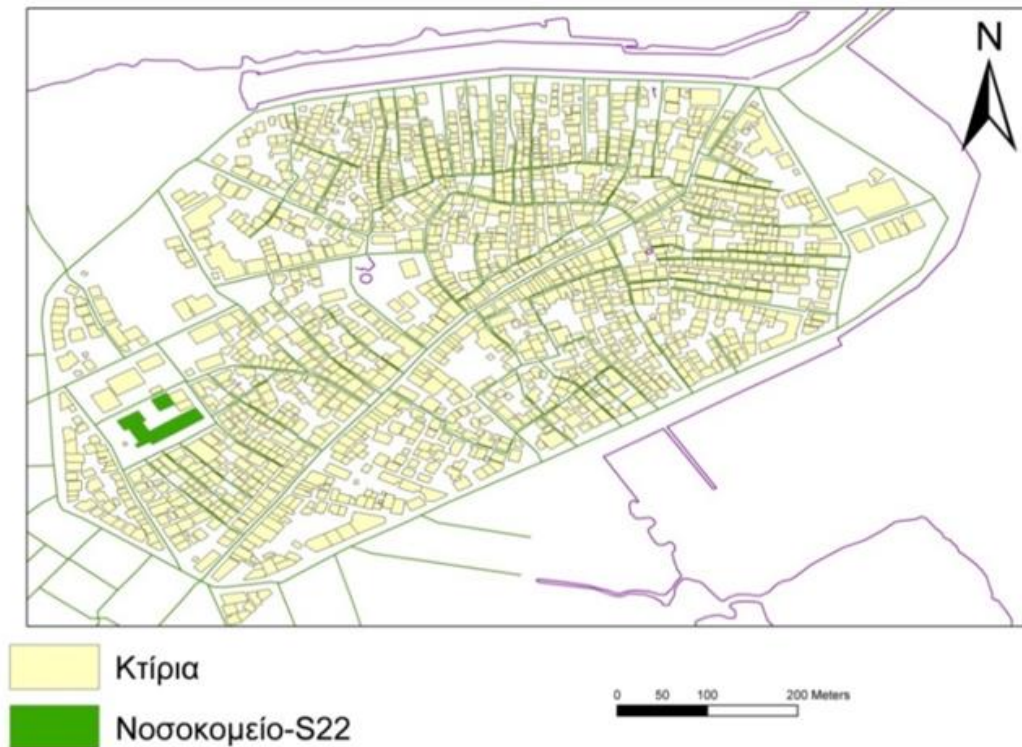
Το μήκος της διαδρομής καθορίζεται από την υποκεντρική απόσταση. Για απόσταση περίπου $R=13$ km η ενίσχυση της διαδρομής ρήγματος σεισμικού υποβάθρου θεωρήθηκε ότι εξαρτάται από το αντίστροφο της απόστασης (R^{-1}) (Boore, 2005).

Η επίδραση των εδαφικών συνθηκών σε κάθε θέση καθορίστηκε από τα ελαστικά μοντέλα εδαφικής στήλης που υπολογίστηκαν από τις αντίστοιχες μετρήσεις μικροθορύβου.

Ως μέτρο αξιολόγησης των παραμέτρων της διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές καταγραφές της εδαφικής επιτάχυνσης του σεισμού της 14/8/2003 στο νοσοκομείο της πόλης (Θέση LEF, Σχ. 104).

Σχεδιάστηκαν οι συνθετικές χρονοσειρές επιτάχυνσης καθώς και τα φάσματα Fourier για το εδαφικό μοντέλο στη θέση θεμελίωσης του νοσοκομείου (Σχ. 105,106 κίτρινη γραμμή).

Η παραμετροποίηση για σεισμό αντίστοιχο με αυτό του 2003 απεικονίζεται στον πίνακα 22



Σχήμα 104 Θέση του νοσοκομείου της πόλης της Λευκάδας

Πίνακας 22 Παραμετροποίηση της διαδικασίας προσομοίωσης του σεισμού της 14 Αυγούστου, 2003.

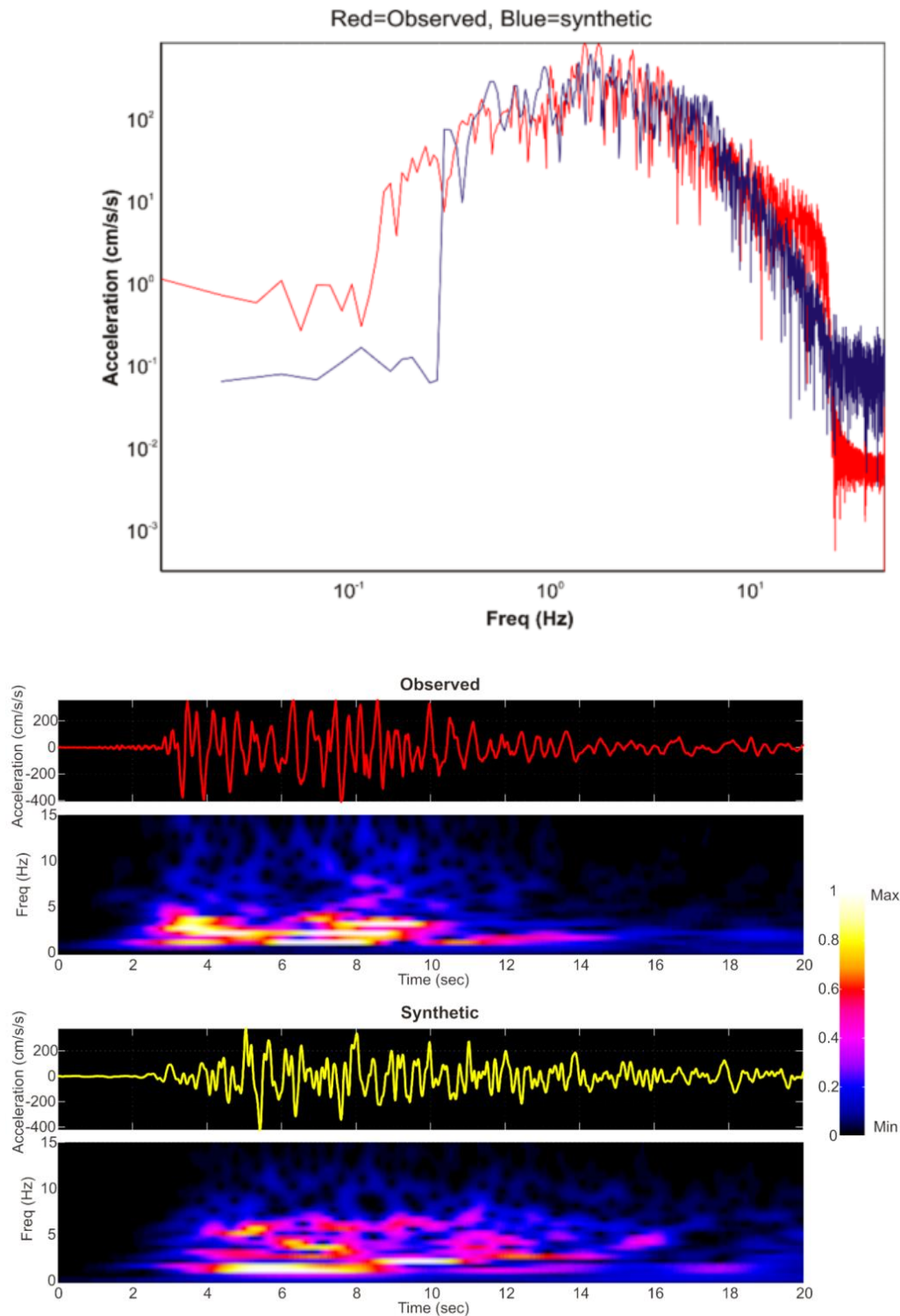
Μέγεθος σεισμού (Mw)	6.2	ΙΤΣΑΚ 2004
Γεωγραφικό μήκος	20.60°E	ΙΤΣΑΚ 2004
Γεωγραφικό πλάτος	38.76°N	
Εστιακό βάθος	12 km	Benetatos 2005
Διεύθυνση και κλίση ρήγματος	012° /81°	Benetatos 2005
Γωνία ολίσθησης	174°	
Μήκος ρήγματος	22 km	Benetatos 2005
Ταχύτητα διατμητικών κυμάτων	3 km/s	Boore 2005
Πυκνότητα στη θέση διάρρηξης	2.8 g/cm ³	Boore 2005
Παράγοντας εξασθένισης κ	0.03	Margaris and Boore 1998
Ανελαστική απόσβεση Q	275	Boore 2005
Γεωμετρική κατανομή	1	Boore 2005
Πτώση τάσης(Δσ)	80 bar	Scordilis et al., 1985; Hatzidimitriou et al.,1993; Tselentis, 1993; Margaris and Boore1998

Σχεδιάστηκαν οι συνθετικές χρονοσειρές επιτάχυνσης καθώς και τα φάσματα Fourier για το εδαφικό μοντέλο στη θέση θεμελίωσης του νοσοκομείου (Σχ. 105, 106 κίτρινη γραμμή).

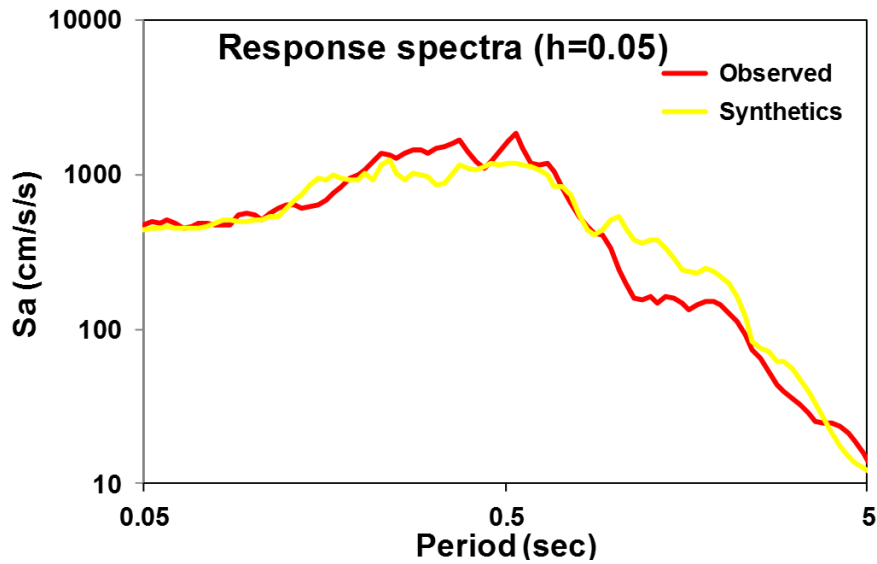
Όπως φαίνεται στο σχήμα 105 (με κόκκινο χρώμα) η μέγιστη επιτάχυνση ήταν 0.42 g, σημαντικά υψηλότερη από αυτή που προβλέπει ο Αντισεισμικός Κώδικας. Οι πραγματικές καταγραφές ισχυρής εδαφικής κίνησης παρουσιάζουν καλή συσχέτιση με τα συνθετικά τόσο στο πεδίο του χρόνου, όσο και στο συχνотικό πεδίο, επιβεβαιώνοντας έτσι την καταλληλότητα της παραμετροποίησης.

Διατηρώντας σταθερές όλες τις παραμέτρους και αλλάζοντας τις ελαστικές παραμέτρους της εδαφικής στήλης για κάθε θέση, όπου υπάρχουν μετρήσεις μικροθορύβου, υπολογίστηκαν 46 συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα και η μέγιστη επιτάχυνση σε κάθε θέση για σεισμό αντίστοιχο με αυτόν του 2003. Οι τιμές αυτές προβλήθηκαν μέσω γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών σε ψηφιακό χάρτη της πόλης (Σχ.107).

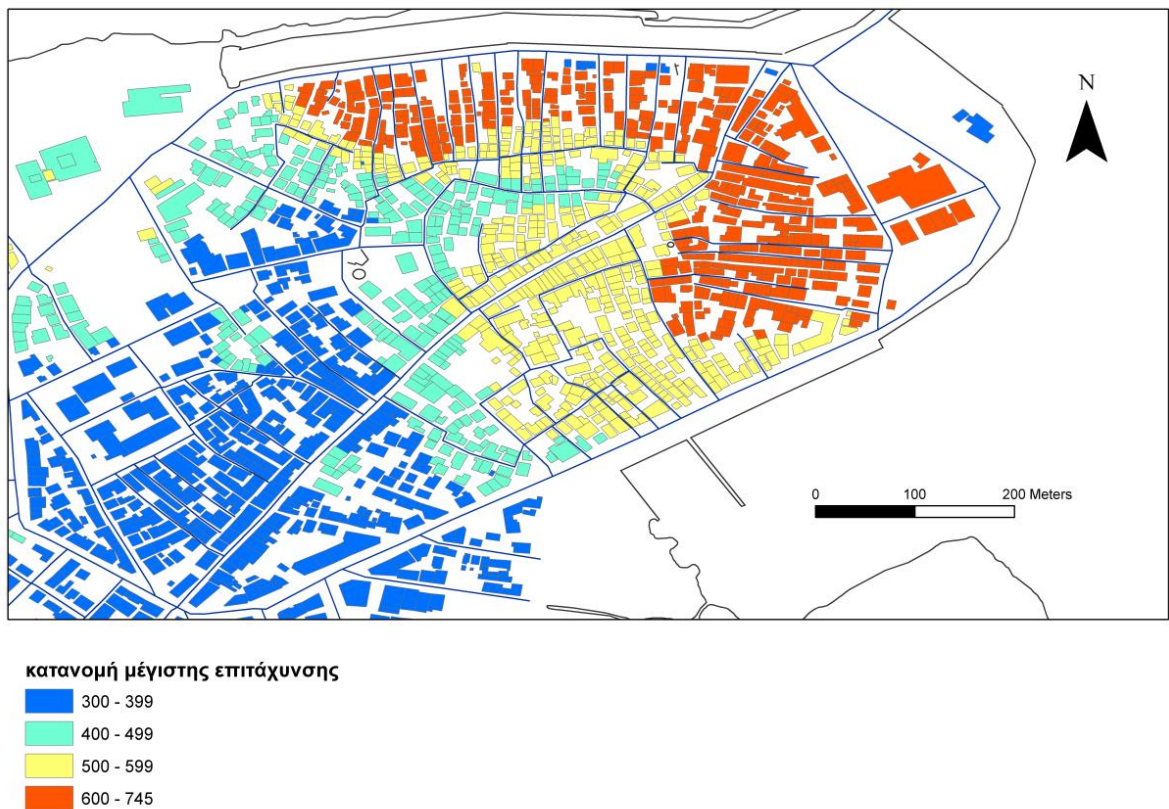
Οι τιμές της μέγιστης συνθετικής επιτάχυνσης κυμαίνονται από 290 έως 745 cm/s^2 με τις μέγιστες τιμές να παρατηρούνται στην ανατολική και βορειοανατολική πλευρά της πόλης, γεγονός συμβατό με την κατανομή των τιμών της ταχύτητας διάδοσης εγκάρσιων κυμάτων, η οποία υπολογίστηκε από την αντιστροφή των καμπύλων των φασματικών λόγων των καταγραφών μικροθορύβου (Κεφάλαιο 8).



Σχήμα 105 Σύγκριση πραγματικών με συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα



Σχήμα 106 Σύγκριση πραγματικής και συνθετικής φασματικής επιτάχυνσης.



Σχήμα 107 Κατανομή μέγιστης επιτάχυνσης ανά κτίριο για σεισμό M 6.2 με τη μέθοδο σημειακής πηγής.

9.2.2 Μέθοδος πεπερασμένου ρήγματος

Όπως ήδη αναφέρθηκε στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, για την προσομοίωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης στη Λευκάδα χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος FINSIM (Beresnev and Atkinson, 1997).

Τα χαρακτηριστικά του ρήγματος που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτά του ρήγματος οριζόντιας ολίσθησης της Λευκάδας με διεύθυνση 12° , κλίση 81° και γωνία ολίσθησης 174° (Benetatos et al., 2005).

Το ενεργοποιημένο τμήμα του ρήγματος της Λευκάδας έχει μήκος περίπου 22 χιλιόμετρα τιμή που είναι πολύ κοντά σε αυτή που προκύπτει για ένα σεισμό μεγέθους $M_w = 6.2$, από τη χρήση των εμπειρικών σχέσεων των Papazachos et al. 2004, ($L = 23$ km). Το πλάτος καθορίστηκε $W = 10$ χιλιόμετρα, τιμή που είναι σύμφωνη με τις εμπειρικές σχέσεις ($W = 9$ χιλιόμετρα) (Karakostas and Papadimitriou, 2010). Τα υπορήγματα καθορίζονται έτσι ώστε να έχουν ίδιο μήκος και πλάτος (Beresnev and Atkinson, 1998). Οι επιλεγθείσες διαστάσεις είναι 2×2 km, δηλαδή 12 υπορήγματα κατά μήκος της διεύθυνσης παράταξης και 5 κατά τη διεύθυνση της κλίσης.

Η σεισμική ροπή για κάθε υπορήγμα δίνεται από τη σχέση:

$$M_0 = \Delta\sigma \Delta l^3 \quad (37)$$

όπου $\Delta\sigma$ η πτώση τάσης και Δl το μήκος του υπορήγματος. Η τιμή της πτώσης τάσης καθορίστηκε 50 bars.

Η γωνιακή συχνότητα κάθε υπορήγματος συνδέεται με τις διαστάσεις μέσω του τύπου:

$$f_c = \frac{\left(\frac{\gamma z}{\pi}\right)\beta}{\Delta l} \quad (38)$$

όπου β είναι η ταχύτητα εγκάρσιου κύματος σε (km/s), γ ο λόγος της ταχύτητας διάρρηξης (km/s) προς την ταχύτητα εγκάρσιου κύματος β και το z συνδέεται με την μέγιστη ολίσθηση του ρήγματος. Η τιμή του z θεωρήθηκε ίση με 1.68, τιμή για μια τυπική διάρρηξη (Beresnev και Atkinson, 1997, 1998).

Η εξασθένηση των σεισμικών κυμάτων λήφθηκε ίση με

$$Q = 100f^{0.8} \quad (39)$$

η οποία θεωρείται ως αντιπροσωπευτική τιμή για την ευρύτερη περιοχή (Roumelioti et al., 2004).

Για την εξασθένιση των υψηλών συχνοτήτων χρησιμοποιήθηκε το φίλτρο Anderson και Hough (1984):

$$D(f) = \exp(-\pi k_0 f) \quad (40)$$

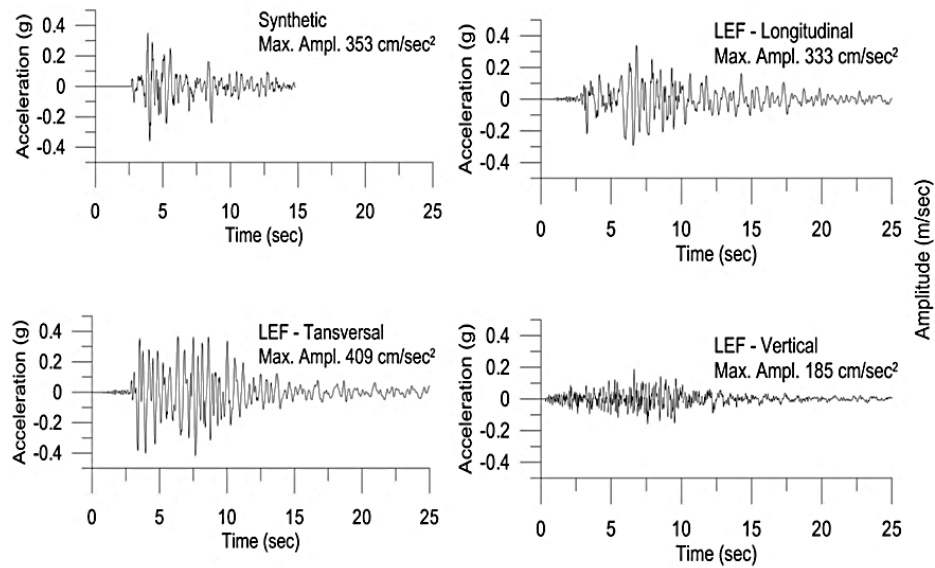
Όπως αναλύεται ήδη στο μοντέλο της σημειακής πηγής, η παράμετρος k_0 εξαρτάται από τον τύπο του εδάφους. Τέλος, η τιμή του παράγοντα s_{fact} , η οποία συνδέεται με την ταχύτητα διάρρηξης στο επίπεδο του ρήγματος, θεωρήθηκε ίση με 1.3 μέσω δοκιμής και απόρριψης προκειμένου να επιτευχθεί καλή συμφωνία μεταξύ του συνθετικού και του παρατηρούμενου φάσματος. Η ταχύτητα διάρρηξης θεωρήθηκε βάσει της μελέτης των Benetatos et al. (2007) $u=2.3-2.4$ km/s.

Πίνακας 23 Παραμετροποίηση της στοχαστικής μεθόδου του πεπερασμένου ρήγματος για προσομοίωση εδαφικής κίνησης σεισμού M6.2

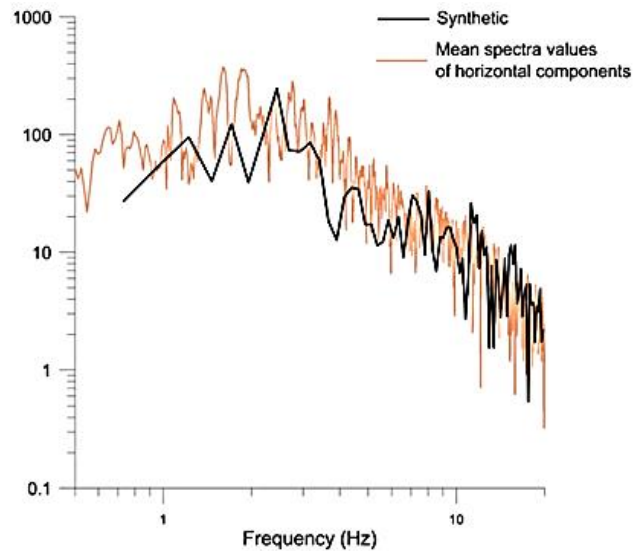
Παράταξη/Κλίση Ρήγματος	012° /81°
Γωνία ολίσθησης	174°
Βάθος ρήγματος	12 km
Μήκος ρήγματος	22 km
Πλάτος ρήγματος	10 km
Rupture/Vs	1.3/ 2.3-2.4 (km/s)
Γεωγραφικό μήκος	20.60° E
Γεωγραφικό πλάτος	38.76° N
Μήκος υπορήγματος	2 km
Πλάτος υπορήγματος	2 km
Μέγεθος σεισμού Mw	6.2
Πυκνότητα	2.8 gr/cm ³
Πτώση τάσης	50 bars

Λαμβάνοντας υπόψη το ελαστικό μοντέλο της εδαφικής στήλης στη θέση του σταθμού LEF, στο νοσοκομείο της πόλης της Λευκάδας, καθώς και την παραπάνω παραμετροποίηση, λάβαμε συνθετικές κυματομορφές που ήταν

συγκρίσιμες με τις τρεις συνιστώσες των καταγραφών του εν λόγω σταθμού τόσο για το μέγιστο εύρος όσο και τη φασματική ομοιότητα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στο Σχ.108



(A)

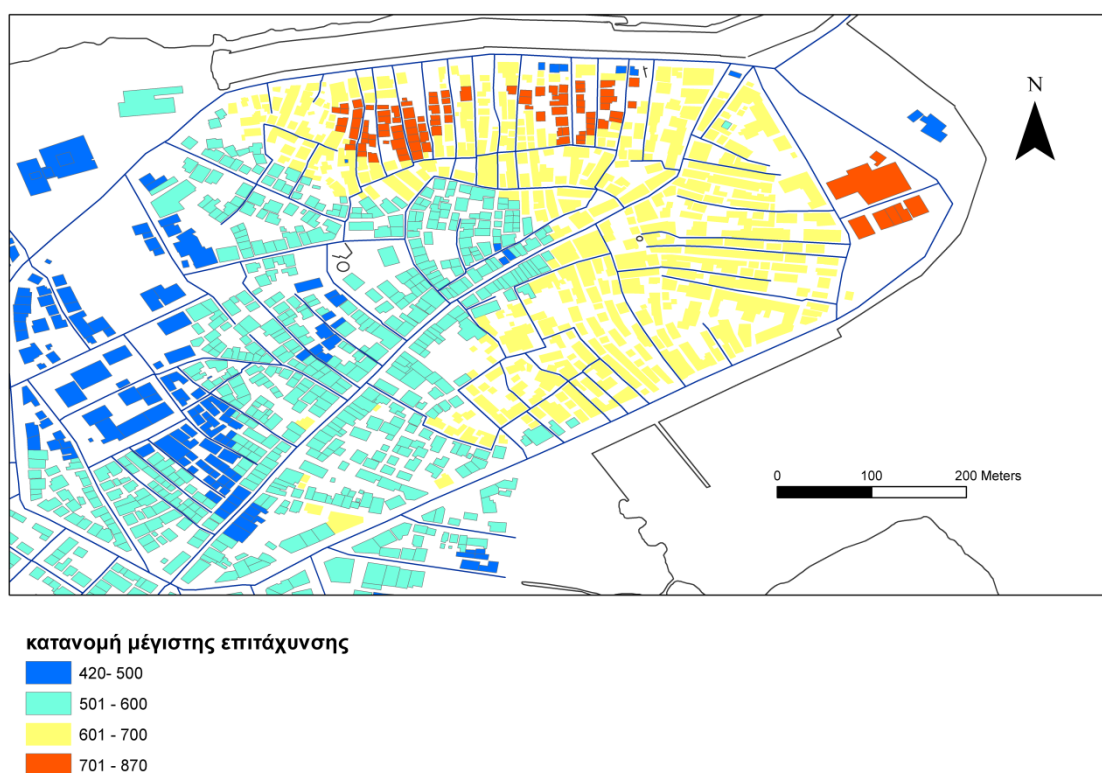


(B)

Σχήμα 108 Σύγκριση πραγματικών (A) και συνθετικών (B) κυματομορφών όπου φαίνεται καλή συμφωνία μεταξύ της μέγιστης τιμής της επιτάχυνσης της συνθετικής καταγραφής και εκείνων των παρατηρούμενων κυματομορφών.

Όπως και στη μέθοδο της σημειακής πηγής, η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε 46 θέσεις λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες ενίσχυσης των εδαφικών ελαστικών μοντέλων που προέκυψαν από την αντιστροφή καμπυλών οριζόντιων προς κατακόρυφη συνιστώσα. Υπολογίστηκαν οι τιμές μέγιστης επιτάχυνσης σε κάθε θέση και προβλήθηκε η χωρική κατανομή τους σε ψηφιακό χάρτη (Σχ.109).

Οι τιμές μέγιστης επιτάχυνσης κυμαίνονται από 435 έως 865 cm/s^2 . Οι υψηλότερες τιμές παρατηρούνται στο βόρειο, ανατολικό και νότιο τμήμα της πόλης.



Σχήμα 109 Κατανομή μέγιστης επιτάχυνσης ανά κτίριο όπως προέκυψε από τυχαία προσομοίωση ολίσθησης του σεισμού στις 14 Αυγούστου του 2003, με τη μέθοδο πεπερασμένου ρήγματος

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δυο μεθόδων προσομοίωσης για σεισμό με τα χαρακτηριστικά του σεισμού του 2003 τα συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα που προέκυψαν από τη μέθοδο σημειακής πηγής

παρουσίασαν μεγαλύτερη ομοιότητα με τα πραγματικά. Οι τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερες για τη μέθοδο πεπερασμένου ρήγματος από εκείνες της σημειακής πηγής.

9.3 Υπολογισμός του μέγιστου μεγέθους σεισμού

Το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος σεισμού προσδιορίστηκε από την πιθανολογική μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας που βασίζεται στη θεωρία των ακραίων τιμών (Gumbel 1958), καθώς και στο υπολογιστικό πρόγραμμα HAZAN (Makropoulos and Burton, 1986). Προαπαιτούμενα για την εφαρμογή της μεθόδου είναι κατάλογος σεισμών της περιοχής και σχέσεις απόσβεσης για τα μεγέθη εδαφικής κίνησης. Ο κατάλογος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ο αναθεωρημένος κατάλογος σεισμών του ελλαδικού χώρου από το 1900 και μετά (Makropoulos et al., 2012). Οι σχέσεις απόσβεσης που χρησιμοποιήθηκαν (Makropoulos, 1978), έχουν ευρύτατα εφαρμοστεί στην Ελλάδα (π.χ. Makropoulos and Burton, 1985b; Makropoulos et al., 2013; Kouskouna and Kaviris, 2014). Τα μέγιστα μεγέθη υπολογίστηκαν για πιθανότητα μη υπέρβασης 90% στα επόμενα 100 και 50 έτη και πιθανότητα μη υπέρβασης 60% στα επόμενα 50 και 25έτη, με αντίστοιχες περιόδους επανάληψης 950, 475, 98 και 49 ετών. Ο πίνακας που ακολουθεί δίνει τις υπολογισμένες μέγιστες τιμές εδαφικής κίνησης κάθε περίπτωσης (Kassaras et al., 2015). Όπως προκύπτει το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος σεισμού είναι M7 (για 950 έτη).

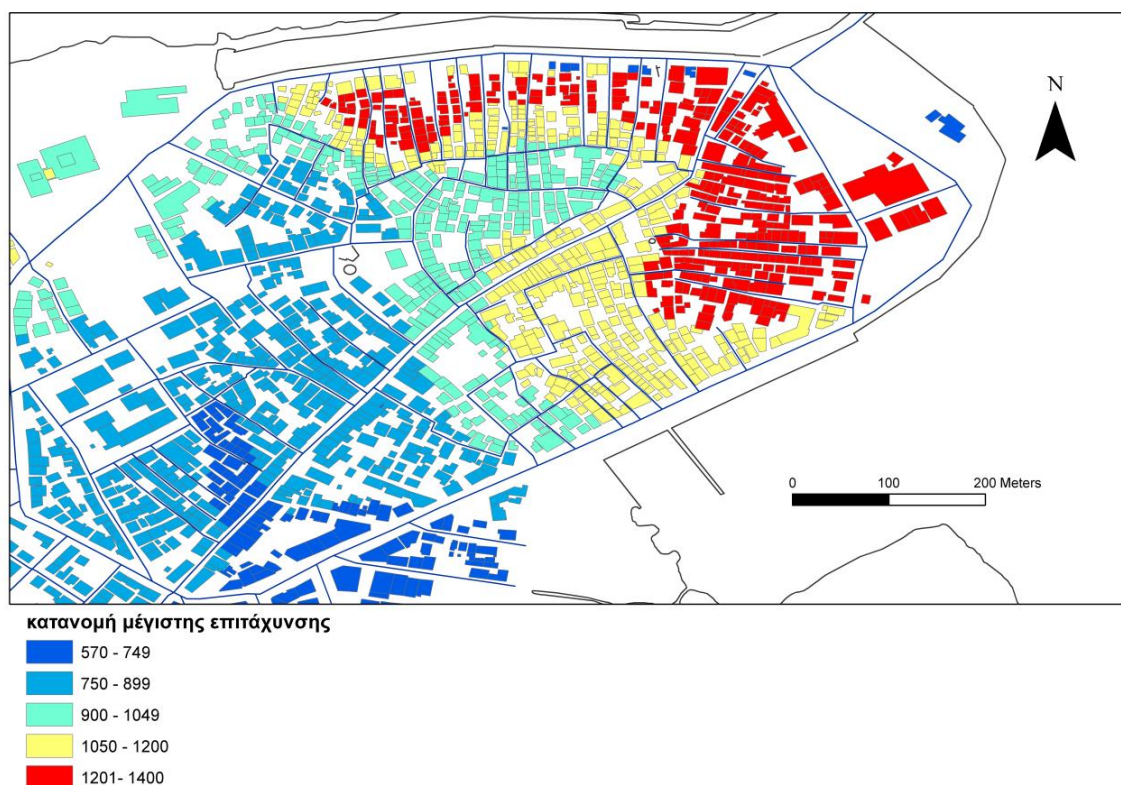
Πίνακας 24 Μέγιστες αναμενόμενες τιμές μεγέθους σεισμού, επιτάχυνσης, ταχύτητας μετατόπισης για τέσσερις περιόδους επανάληψης στην πόλη της Λευκάδας, σύμφωνα με μελέτη των Kassaras et al., 2015.

Περίοδος Επανάληψης (έτη)	Μέγιστο μέγεθος	Μέγιστες τιμές εδαφικής κίνησης στο βραχώδες υπόβαθρο			Μέγιστες τιμές εδαφικής κίνησης στο έδαφος σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση εδαφών του Ευρωκώδικα 8		
		A cm/sec ²	V cm/sec	D cm	A cm/sec ²	V cm/sec	D cm
950	7.0	306	30	4.6	432	45	7.3
475	6.9	275	27	4.1	389	40	6.6
98	6.6	206	17	3.0	290	30	4.8
49	6.4	175	20	2.6	247	25	4.1

9.4 Προσομοίωση μέγιστου αναμενόμενου σεισμού

9.4.1 Μέθοδος σημειακής πηγής

Θεωρώντας ότι ο μέγιστος αναμενόμενος σεισμός έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά με τον σεισμό του 2003 (επικεντρική απόσταση, εστιακό βάθος) και προέρχεται από την ίδια ρηξιγενή ζώνη που, όπως έχει αναλυθεί, αποτελεί την σπουδαιότερη ζώνη διάρρηξης και την πιο επικίνδυνη για μεγάλους σεισμούς, εφαρμόσαμε την μέθοδο της στοχαστικής προσομοίωσης με τη μέθοδο της σημειακής πηγής για μέγεθος σεισμού M7. Οι τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης υπολογίστηκαν για τις 46 θέσεις στην πόλη που υπάρχουν διαθέσιμα τα ελαστικά μοντέλα εδαφικής στήλης. Η κατανομή των τιμών μέγιστης επιτάχυνσης προβλήθηκε επί ψηφιακού χάρτη της πόλης (Σχ.110). Οι μέγιστες τιμές επιτάχυνσης κυμαίνονται από 570 έως 1400 cm/s². Οι τιμές αυτές είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αναμενόμενες, λαμβάνοντας υπόψη τις καταγραφές ισχυρών εδαφικών κινήσεων. Καταγραφές σεισμών τόσο μεγάλου μεγέθους δεν υπάρχουν διαθέσιμες στην ευρύτερη περιοχή ώστε να εκτιμηθούν οι υπολογισθείσες.



Σχήμα 110 Κατανομή της μέγιστης επιτάχυνσης για σεισμό M7 ανά κτίριο στην πόλη της Λευκάδας με τη μέθοδο στοχαστικής προσομοίωσης σημειακής πηγής.

9.4.2 Μέθοδος πεπερασμένου ρήγματος

Για την προσομοίωση σεισμού μεγαλύτερου μεγέθους από M6.2 χρειάστηκε να τροποποιηθούν οι παράμετροι που αφορούν στις διαστάσεις του σεισμογόνου ρήγματος. Για την παραμετροποίηση αυτή χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία βάσης δεδομένων μοντέλων πεπερασμένου ρήγματος. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται από πραγματικούς σεισμούς σε όλο τον κόσμο (SRCMOD, 2014). Επιλέχθηκε ο σεισμός της Αϊτής (Mw 7) της 12ης Ιανουαρίου 2010, ο οποίος είναι ίδιου μεγέθους με τον μέγιστο αναμενόμενο για τη υπό μελέτη περιοχή. Η παραμετροποίηση ακολουθεί το μοντέλο ολίσθησης των Calais et al., 2010. Το γεωδυναμικό καθεστώς της περιοχής είναι παρόμοιο με αυτό της Λευκάδας. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 25) παρουσιάζονται οι τροποποιήσεις παραμετροποίησης που πραγματοποιήθηκαν.

Πίνακας 25 Παραμετροποίηση της στοχαστικής μεθόδου του πεπερασμένου ρήγματος για προσομοίωση εδαφικής κίνησης σεισμού M7

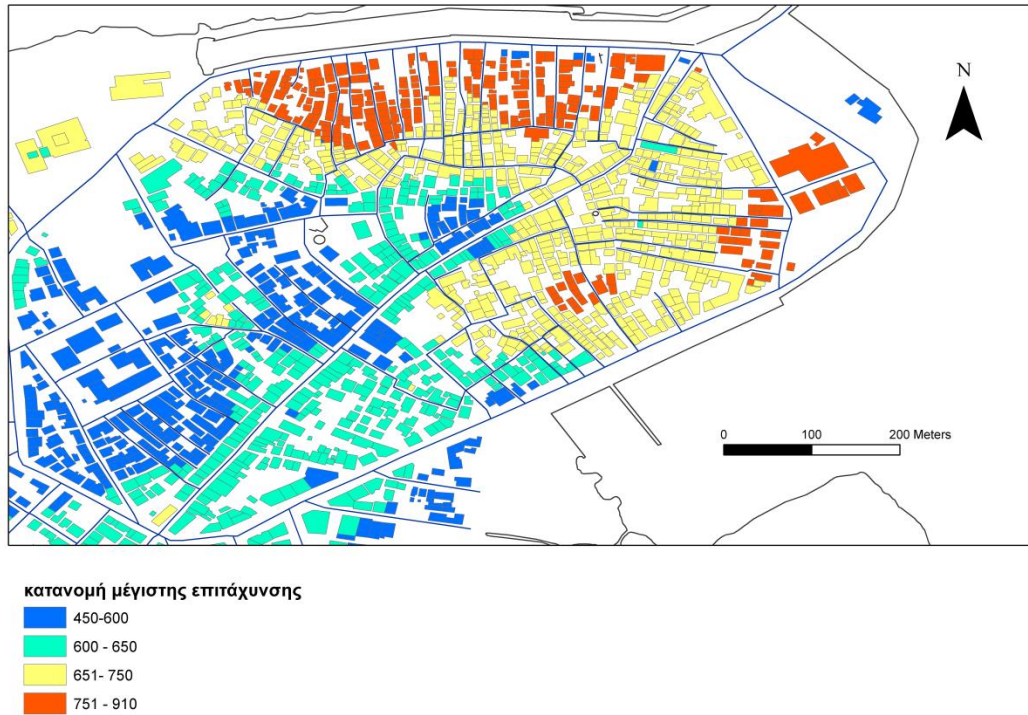
Παράταξη/Κλίση Ρήγματος	257.93° /59.99°
Γωνιά ολίσθησης	31.59°
Βάθος ρήγματος	12.93 km
Μήκος ρήγματος	50km
Πλάτος ρήγματος	24 km
Γεωγραφικό μήκος	-72.64° E
Γεωγραφικό πλάτος	18.51° N
Μήκος υπορήγματος	2 km
Πλάτος υπορήγματος	2 km
Mw	7
Πυκνότητα	2.8 gr/cm ³
Πτώση τάσης	60 bars

Όσον αφορά τις σχέσεις απόσβεσης και εδαφικής ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκε η παραμετροποίηση της προσομοίωσης του σεισμού του 2003.

Η μέθοδος του πεπερασμένου ρήγματος λαμβάνει υπόψη περισσότερα στοιχεία που αφορούν τη γεωμετρία και τη διάδοση της διάρρηξης (Beresnev and Atkinson, 1997; 1998), επομένως η προσομοίωση σεισμών μεγάλου μεγέθους δίνει τιμές εδαφικής κίνησης πιο συμβατές με τις πραγματικές.

Οι τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο του πεπερασμένου ρήγματος είναι μικρότερες από εκείνες που προέκυψαν από τη μέθοδο της σημειακής πηγής κυμαινόμενες μεταξύ 460 και 910 cm/s² και πιο ρεαλιστικές (Σχ. 111).

Και στις δυο περιπτώσεις οι υψηλότερες τιμές επιτάχυνσης κατανέμονται στις B, BA, A και N περιοχές της πόλης.



Σχήμα 111 Κατανομή τιμών μέγιστης επιτάχυνσης ανά κτίριο σύμφωνα με σεισμό προσομοίωσης στην Αϊτή (2010)

Οι υπολογισθείσες τιμές των μέγιστων επιταχύνσεων με τα δύο μοντέλα προσομοίωσης και για τα δυο σενάρια σεισμών σε συνδυασμό με τους υπολογισθέντες δείκτες τρωτότητας όλων των κτιρίων της παλιάς πόλης χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση του πιθανότερου βαθμού βλάβης για κάθε κτίριο, όπως περιγράφεται στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

Σύνθεση Σεναρίων Σεισμικού Κινδύνου

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο υπολογισμός πιθανότερου βαθμού βλάβης για κάθε κτίριο βάσει δυο σεισμικών σεναρίων. Ο μέσος βαθμός βλάβης από τον οποίο απορρέει ο πιθανότερος βαθμός βλάβης, καθώς και η πιθανότητα αυτή να συμβεί, εξαρτάται από τη σεισμική ένταση και την τρωτότητα του κτιρίου (κεφάλαιο 3). Οι τιμές των επιταχύνσεων, όπως προέκυψαν από την προσομοίωση της εδαφικής κίνησης των δυο σεισμικών σεναρίων, χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της σεισμικής έντασης.

Συγκεκριμένα μελετάται η συσχέτιση των εξαγόμενων από την προσομοίωση του σεισμού του 2003 με τις πραγματικές βλάβες και αναπτύσσεται η εκτίμηση κινδύνου που διατρέχει κάθε κτίριο βάσει του δυσμενέστερου σεισμικού σεναρίου για την περιοχή.

10.1 Σχέση σεισμικής έντασης - μέγιστης επιτάχυνσης

Η σεισμική ένταση καθορίζεται από τα μακροσεισμικά αποτελέσματα. Επομένως εξαρτάται, εκτός από τη εδαφική κίνηση αυτή καθαυτή, από την τρωτότητα των κατασκευών. Σύμφωνα με το Wald (1999), οι σχέσεις σεισμικής έντασης - μέγιστης επιτάχυνσης ισχύουν για εντάσεις μεγαλύτερες του επτά. Εξορισμού, η μακροσεισμική ένταση δεν εκφράζεται σαν συνεχής μεταβλητή, όπως τα μεγέθη που καθορίζονται από την εδαφική κίνηση. Αντίθετα, η σεισμική ένταση που προκύπτει μέσω των παραμέτρων της εδαφικής κίνησης αποδίδεται σαν συνεχής μεταβλητή καθώς προκύπτει μέσω εμπειρικών σχέσεων, οι οποίες έχουν εξαχθεί από μακροσεισμικές παρατηρήσεις.

Υπάρχουν διάφορες εμπειρικές σχέσεις σεισμικής έντασης - μέγιστης επιτάχυνσης που έχουν προκύψει από τη μελέτη των αποτελεσμάτων πολυάριθμων σεισμών. Όπως ήδη αναφέρεται στο κεφάλαιο της μεθοδολογίας, για την εκτίμηση της σεισμικής έντασης σε αυτή τη διατριβή επιλέχθηκαν οι σχέσεις των (α) Wald et al. (1999), που αφορά σε σεισμούς

στην Καλιφόρνια της Αμερικής, (β) Margottini et al. (1992), που βασίστηκε σε σεισμούς στον ευρωπαϊκό χώρο και (γ) Tselentis and Danciu (2008), που προέκυψε ύστερα από επεξεργασία 310 χρονοιστοριών, από 89 σεισμούς στον ελλαδικό χώρο.

10.2 Ανάλυση σεισμικού σεναρίου για σεισμό μεγέθους M6.2

Εφαρμόζοντας τη συνάρτηση της πιθανότητας βήτα κατανομής, κατά την οποία περιγράφεται ικανοποιητικά η κατανομή βλαβών κατόπιν σεισμού (Giovinazzi and Lagomarcino 2004, Lantada et al., 2007, ATC-13), εκτιμήθηκε ο πιθανότερος βαθμός βλάβης για κάθε κτίριο κατά τεσσάρων κατανομών σεισμικής έντασης στις θέσεις θεμελίωσης.

Αρχικά εκτιμήθηκε η σεισμική ένταση σαν συνάρτηση των υπολογισμένων, μέσω στοχαστικής προσομοίωσης με τη μέθοδο της σημειακής πηγής, τιμών των μεγίστων επιταχύνσεων στη θέση θεμελίωσης κάθε κτιρίου για σεισμό M6.2, εφαρμόζοντας και τις τρεις προαναφερθείσες εμπειρικές σχέσεις:

α. $\log(PGA) = 0.358 + 0.258 \text{IMSK}$ (Margottini et al., 1992)

β. $I = 3.563 \log(PGA) - 0.946$ (Tselentis and Danciu, 2008)

γ. $I = 3.66 \log(PGA) - 1.66$ (Wald et al., 1999)

Η συνάρτηση των Tselentis and Danciu (2008), έδωσε τιμές σεισμικής έντασης πιο κοντά στην υπολογισμένη από τις πραγματικές βλάβες, μακροσεισμική ένταση (Karababa 2007). Η συνάρτηση αυτή είναι αντιπροσωπευτικότερη των τριών για τον ελλαδικό χώρο, αφού είναι εμπειρική σχέση που έχει προκύψει λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, αφενός των ελληνικών κτιρίων και αφετέρου, των εδαφοτεχνικών συνθηκών στην Ελλάδα. Για το λόγο αυτό επιλέχτηκε και εν συνεχεία εφαρμόστηκε κατά τον υπολογισμό των εντάσεων που αντιστοιχούν στις εξαγόμενες τιμές μέγιστης επιτάχυνσης (PGA) της στοχαστικής προσομοίωσης με τη μέθοδο του πεπερασμένου ρήγματος.

Στον πίνακα 26 παρατίθενται οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές έντασης για κάθε μια συνάρτηση. Μεγαλύτερη μέση τιμή προέκυψε από την προτεινόμενη συνάρτηση των Tselentis and Danciu (2008), όταν οι τιμές των μεγίστων

επιταχύνσεων έχουν υπολογιστεί με τη μέθοδο του πεπερασμένου ρήγματος, ενώ η μικρότερη είναι κατά Wald et al. (1999).

Πίνακας 26 Μέγιστες, ελάχιστες και μέσες τιμές έντασης για προσομοίωση του σεισμού του 2003 (M6.2)

Σεισμική Ένταση	Margottini et al. (1992)	Wald et al. (1999)	Tselentis and Danciu (2008) (PGA με τη μέθοδο σημειακής πηγής)	Tselentis and Danciu (2008) (PGA με τη μέθοδο του πεπερασμένου ρήγματος)
Μέγιστη	9.2	8.8	9.3	9.54
Ελάχιστη	8.3	7.5	8.0	8.42
Μέση	9.1	8.2	8.7	8.93

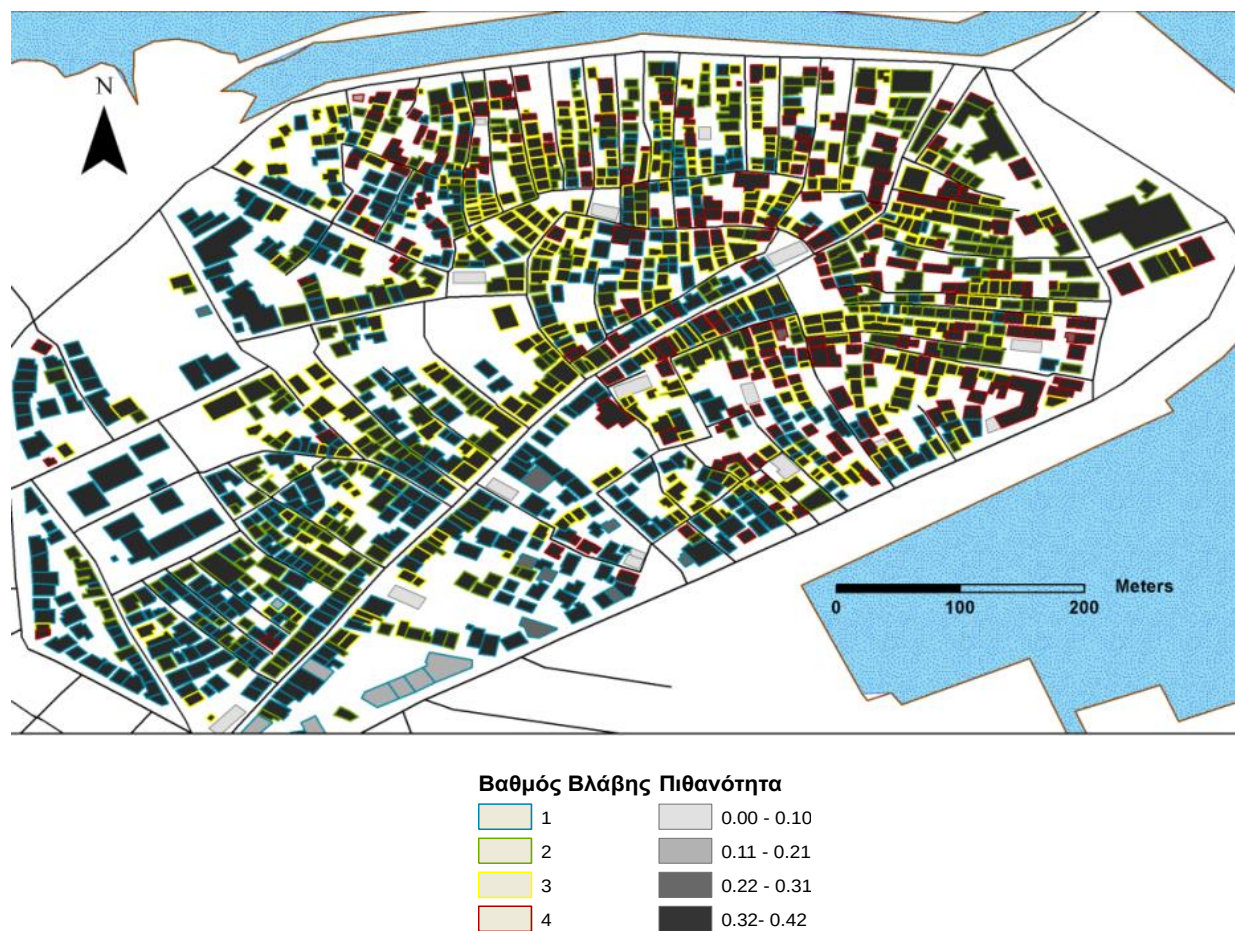
Οι δείκτες τρωτότητας των κτιρίων υπολογίστηκαν προσομοιώνοντας την κατάσταση των κτιρίων πριν το 2003, όπως περιγράφεται σε αντίστοιχη παράγραφο του έκτου κεφαλαίου και παραμένουν ίδιοι σε κάθε σενάριο σεισμικής έντασης. Υπολογίστηκε για κάθε κτίριο η πιθανότητα να υποστεί κάθε βαθμό βλάβης για όλες τις προαναφερθείσες κατανομές σεισμικής έντασης, όπως αναλύεται στο κεφάλαιο 3. Επιλέχθηκε ο πιθανότερος βαθμός βλάβης σε κάθε περίπτωση. Παρουσιάζουμε ενδεικτικά παρακάτω μικρό μέρος του πίνακα υπολογισμού για το σενάριο στο οποίο η ένταση υπολογίστηκε με τη σχέση των Tselentis and Danciu, 2008 και η εδαφική επιτάχυνση με στοχαστική μέθοδο προσομοίωσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης με τη μέθοδο της σημειακής πηγής (Πίνακες 27). Στον πίνακα καταγράφονται ο κωδικός του κτιρίου στον πολεοδομικό χάρτη της πόλης (id build), ο δείκτης τρωτότητας (V.I.), η μέγιστη επιτάχυνση στη θέση θεμελίωσης (PGA), η υπολογισθείσα σεισμική ένταση (I), ο μέσος βαθμός βλάβης (μ_D), ο πιθανότερος βαθμός βλάβης (D.G) και η πιθανότητα να συμβεί (Probability). Ο πιθανότερος βαθμός βλάβης τις περισσότερες φορές είναι παρόμοιος με την τιμή του μέσου βαθμού βλάβης.

Οι τιμές του πιθανότερου βαθμού βλάβης, καθώς και της πιθανότητας να συμβεί για κάθε κτίριο, απεικονίστηκαν σε ψηφιακούς χάρτες (Σχ. 112, 113, 114, 115). Ο πιθανότερος βαθμός βλάβης και η πιθανότητα αυτός να συμβεί

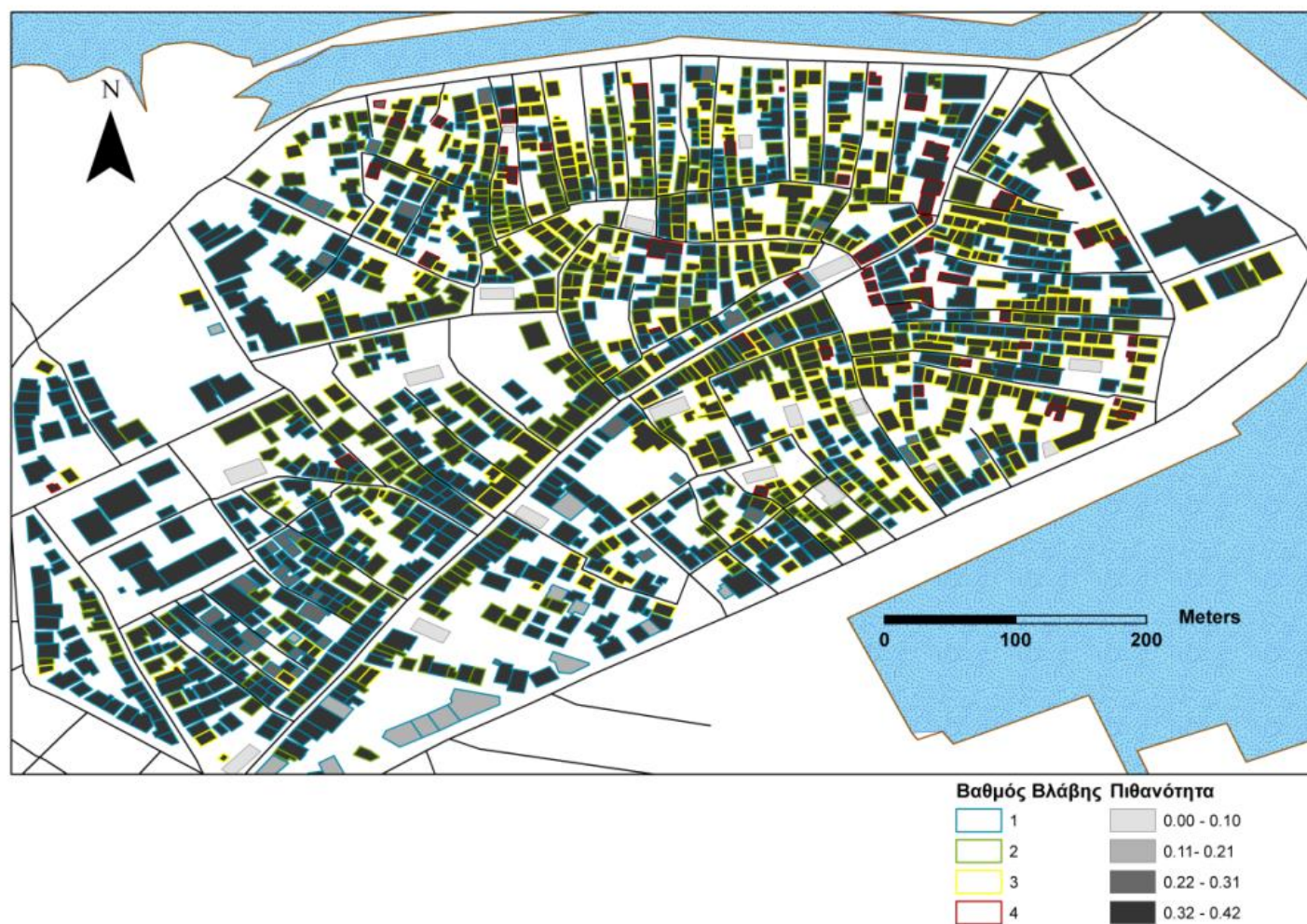
απεικονίζεται με χρωματική διαβάθμιση του περιγράμματος του κτιρίου και του εσωτερικού του, αντίστοιχα. Με βαθμό βλάβης (1) χαρακτηρίζονται τα κτίρια που θα υποστούν αμελητέα βλάβη, με βαθμό βλάβης (2) τα κτίρια που θα υποστούν μεσαία βλάβη, με βαθμό βλάβης (3) τα κτίρια που θα υποστούν ουσιώδη - σοβαρή βλάβη , με βαθμό βλάβης (4) τα κτίρια που θα υποστούν πολύ σοβαρή βλάβη, και με βαθμό βλάβης (5) τα κτίρια που θα καταρρεύσουν. Για κανένα από τα σενάρια δεν παρατηρήθηκε πιθανότερος βαθμός 5 (κατάρρευση).

Πίνακας 27 Τμήμα του πίνακα υπολογισμού πιθανότερου βαθμού βλάβης. Η ένταση υπολογίστηκε με τη συνάρτηση των Tselentis and Danciu, 2008 και η εδαφική επιτάχυνση με στοχαστική μέθοδο προσομοίωσης ισχυρής εδαφικής κίνησης με τη μέθοδο της σημειακής πηγής.

id build	V. I.	PGA	I	μ_D	D.G	Probability
694	0,740	478	8,601	2,637	3	0,352
832	0,900	527	8,752	3,761	4	0,409
904	0,474	458	8,535	0,994	1	0,409
963	0,504	458	8,535	1,130	1	0,411
964	0,504	491	8,642	1,214	1	0,400
1030	0,474	457	8,531	0,992	1	0,399
1096	0,720	459	8,538	2,433	2	0,355
1143	0,620	462	8,548	1,785	1	0,366
1171	0,880	456	8,528	3,457	3	0,349
426	0,464	541	8,792	1,136	1	0,401
455	0,720	547	8,809	2,727	2	0,339
462	0,464	503	8,680	1,052	1	0,409
153	0,700	680	9,146	2,952	3	0,360



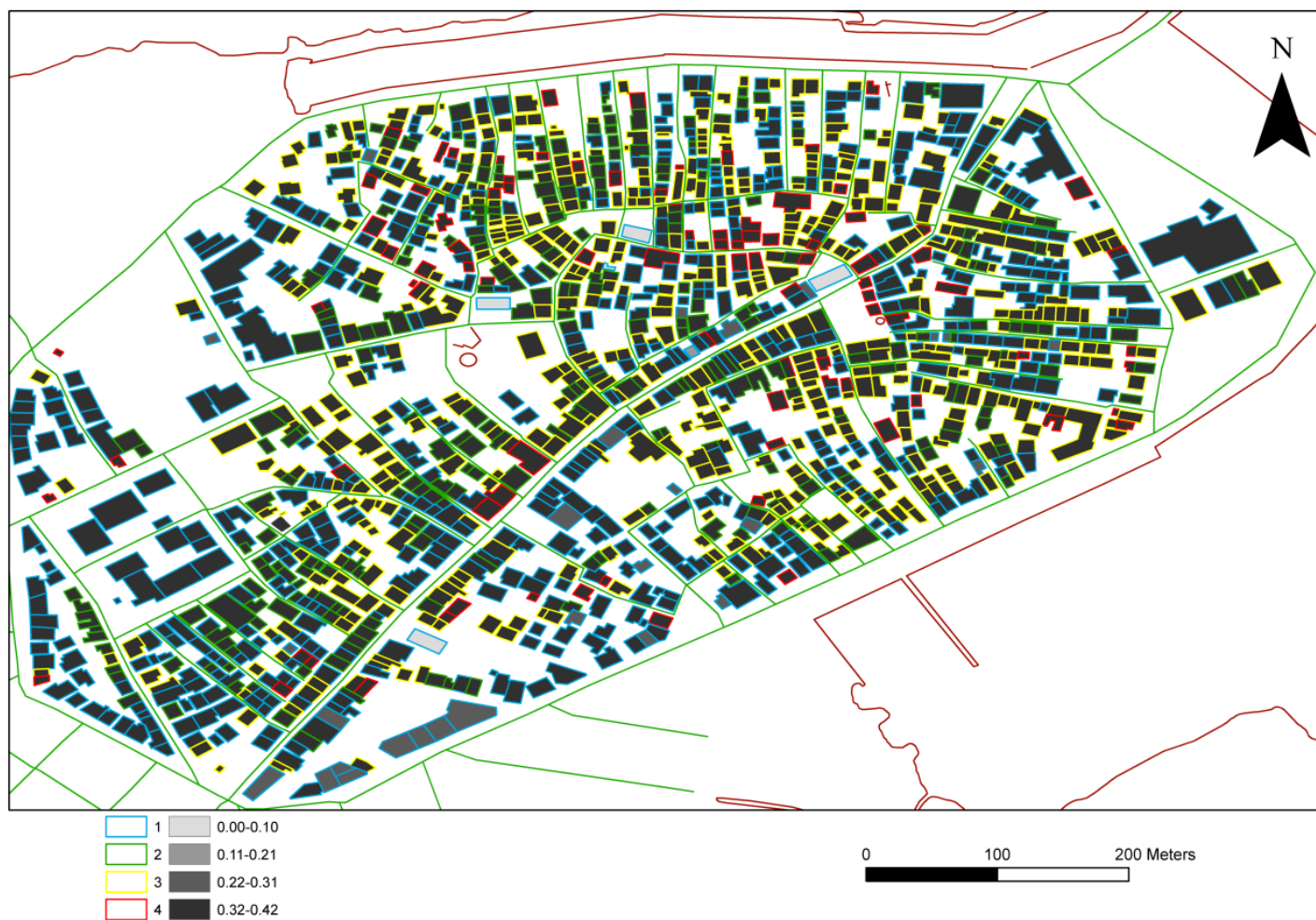
Σχήμα 112 Κατανομή βαθμού βλάβης κατά Margottini et al., 1992. Προσομοίωση σημειακής πηγής.



Σχήμα 113 Κατανομή βαθμού βλάβης κατά Tselentis and Danciu, 2008. Προσομοίωση σημειακής πηγής.



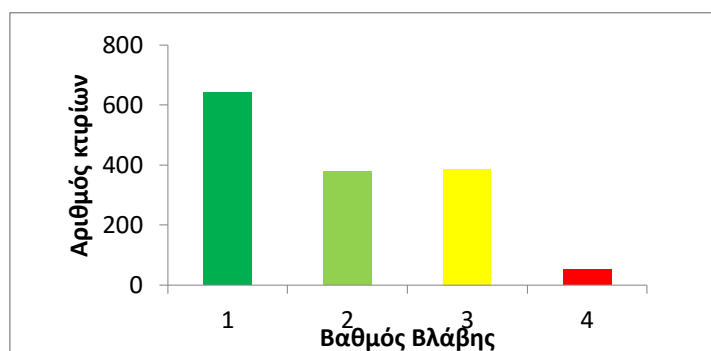
Σχήμα 114 Κατανομή βαθμού βλάβης κατά Wald et al., 1999. Προσομοίωση σημειακής πηγής.



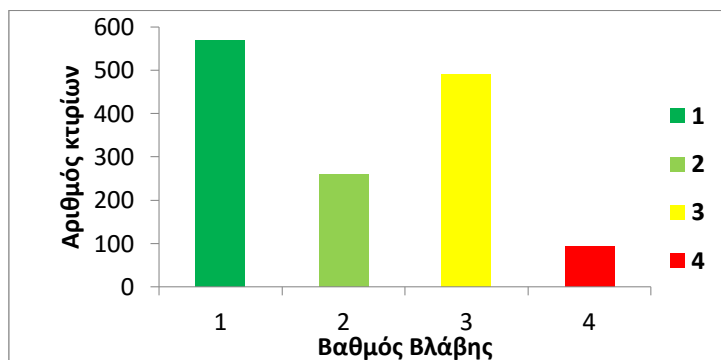
Σχήμα 115 Κατανομή βαθμού βλάβης κατά Tselentis and Danciu, 2008. Προσομοίωση πεπερασμένου ρήγματος

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των παραπάνω μοντέλων παρατηρούμε ότι η κατανομή των βλαβών που προκύπτει εφαρμόζοντας τη σχέση έντασης επιτάχυνσης των Margottini et al., 1992, έδειξε τον μεγαλύτερο αριθμό κτιρίων με τον υψηλότερο βαθμό βλάβης.

Διαπιστώνουμε επίσης ότι, μεταξύ των δύο μοντέλων κατά τα οποία η σεισμική ένταση υπολογίστηκε με τη σχέση των Danciou and Tselentis, οι πιθανότερες βλάβες είναι πολύ μεγαλύτερες όταν η προσομοίωση εδαφικής κίνησης πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο του πεπερασμένου ρήγματος (Σχ. 116). Αυτό εξηγείται από τις μεγαλύτερες τιμές εδαφικής επιτάχυνσης που υπολογίσθηκαν με αυτή τη μέθοδο.



(A)



(B)

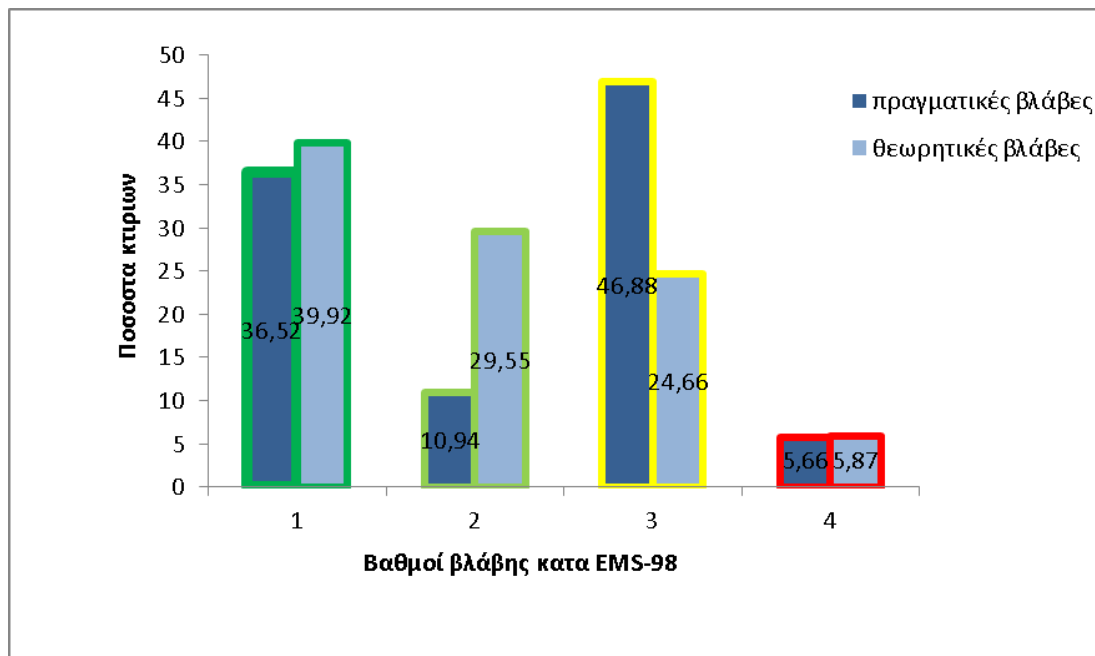
Σχήμα 116 Κατανομή του αριθμού των κτιρίων σύμφωνα με τον πιθανότερο βαθμό βλάβης. (A) Οι τιμές μέγιστης επιτάχυνσης έχουν υπολογιστεί με τη μέθοδο σημειακής πηγής. (B) Οι τιμές μέγιστης επιτάχυνσης έχουν υπολογιστεί με τη μέθοδο πεπερασμένου ρήγματος.

Η σεισμική ένταση έχει υπολογιστεί κάθε φορά με την σχέση των Tselentis and Danciu, 2008.

Για την επαλήθευση του προτεινόμενου μοντέλου, τα αποτελέσματα του σεισμού του 2003 συγκριθήκαν με τους προβλεπόμενους, πιθανότερους βαθμούς βλάβης.

10.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων προτεινόμενου μοντέλου με πραγματικές βλάβες

Τα αποτελέσματα των ενδεχόμενων βαθμών βλάβης για τα τέσσερα σενάρια υπολογισμού έντασης συγκρίθηκαν με το πραγματικό βαθμό βλάβης των κτιρίων. Συγκρίνοντας τους χάρτες των σχημάτων 112, 113, 114, 115 με το χάρτη του σχήματος 74 (κεφάλαιο 7), παρατηρούμε ότι η κατανομή με βάση τη σχέση των Tselentis and Danciu (2008) για μέγιστη επιτάχυνση από τη μέθοδο της σημειακής πηγής έδωσε αποτελέσματα εγγύτερα στα μακροσεισμικά. Η προτεινόμενη εμπειρική σχέση των παραπάνω συγγραφέων παρουσιάζει το πλεονέκτημα σε σχέση με τις άλλες, πως έχει προκύψει από σεισμούς στον ελλαδικό χώρο. Επομένως, οι σχέσεις αυτές επηρεάζονται από τους τύπους κατασκευών των περιοχών από τις οποίες προέρχονται τα δεδομένα και τα χαρακτηριστικά της σεισμικής επικινδυνότητας του ελλαδικού χώρου. Τα κτίρια της Καλιφόρνιας και της Ευρώπης διαφέρουν από τα αντίστοιχα του ελλαδικού χώρου, ιδιαίτερα από τα παραδοσιακά. Τα περισσότερα κτίρια από όσα ελέγχθηκαν παρουσίασαν τον πιθανότερο βαθμό που υπολογίσθηκε βάσει αυτής της σχέσης. Όπως φαίνεται στο σχήμα 117, τα πραγματικά και θεωρητικά ποσοστά κτιρίων ανά βαθμό βλάβης είναι συναφή. Ειδικότερα τα κτίρια με βαθμό βλάβης 1 και 4 παρουσιάζουν ελάχιστη απόκλιση, ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά για βαθμούς 2 και τρία παρουσιάζουν διαφορές. Παρόλα αυτά, το άθροισμά τους είναι σχεδόν το ίδιο. Ο διαχωρισμός των βαθμών 2 και 3 από τις περιγραφές των δελτίων συχνά δεν ήταν εύκολος. Μερικές φορές σύμφωνα με τους μηχανικούς της περιοχής, κάποιοι υπερέβαλαν σε κάποιες βλάβες ώστε να χαρακτηριστούν κίτρινα τα κτίρια, προσδοκώντας οι ιδιοκτήτες να λάβουν αποζημίωση για την επισκευή τους.



Σχήμα 117 Κατανομή ποσοστών των κτιρίων ανά βαθμό βλάβης από τη ανάλυση των δελτίων ζημιών μετά το σεισμό (πραγματικές βλάβες) και από τα αποτελέσματα του θεωρητικού μοντέλου (θεωρητικές βλάβες)

Η σύγκριση του πραγματικού με το θεωρητικό βαθμό βλάβης ανά κτίριο έδειξε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό ανά βαθμό βλάβης αντιστοιχεί στον πιθανότερο αναμενόμενο βαθμό βλάβης (Πίνακας 28)

Πίνακας 28 Σύγκριση πραγματικών με θεωρητικές τιμές βλάβης.

Υπολογισμένος Βαθμός Βλάβης	1	2	3	4
Πραγματικός Βαθμός Βλάβης				
1	46,77	30,11	20,43	2,69
2	38,1	42,86	14,29	4,76
3	26,47	28,24	38,82	6,47
4	5	15	50	30

Τα κτίρια για τα οποία δεν ζητήθηκε να γίνει έλεγχος από τους ιδιοκτήτες τους στην πλειοψηφία εκτιμήθηκαν με βαθμό βλάβης 1 (49,84%) ή 2 (24,87%) και λιγότερα 3 (22,33%) ή 4 (2,75%).

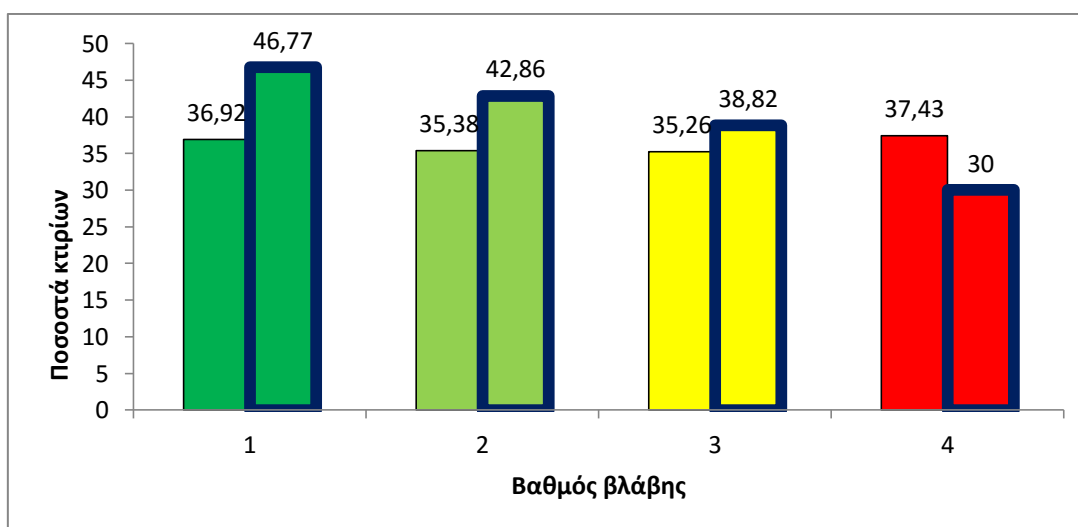
Όπως έχει ήδη αναπτυχθεί, το συγκεκριμένο πιθανολογικό μοντέλο δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την πιθανότητα να συμβεί κάθε βαθμός βλάβης και έτσι επιλέγεται ο πιθανότερος βαθμός βλάβης και η πιθανότητα να συμβεί.

Στον πίνακα 29 παρουσιάζεται ανάλυση των πιθανοτήτων ανά πιθανότερο βαθμό βλάβης

Πίνακας 29 Κατανομή πιθανότητας ανά βαθμό βλάβης

Βαθμοί βλάβης	Μέση τιμή	Τυπική Απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο
1	36.92	4.33	11.96	41.16
2	35.38	1.68	32.73	41.14
3	35.26	1.62	30.39	41.52
4	37.43	2.57	33.62	41.14

Συγκρίνοντας τη μέση τιμή πιθανότητας για κάθε βαθμό βλάβης με τα ποσοστά των κτιρίων που ο βαθμός βλάβης επιβεβαιώθηκε, παρατηρούμε ότι το δεύτερο ποσοστό είναι μεγαλύτερο σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από τα κτίρια που υπέστησαν βαθμό βλάβης 4, χωρίς να το ξεπερνά σημαντικά και σε αυτή την κατηγορία (Σχ. 118). Για μεγάλο ποσοστό αυτών των κτιρίων η πιθανότερη βλάβη ήταν 3. Η σύγκριση αυτή αποδεικνύει την καλή απόκριση και την αξιοπιστία του μοντέλου.



Σχήμα 118 Σύγκριση της μέγιστης πιθανότητας των κτιρίων να υποστούν συγκεκριμένο βαθμό βλάβης (στήλες χωρίς περίγραμμα) με το ποσοστό των παρατηρήσεων (στήλες με μπλε σκίαση), ανά βαθμό βλάβης

10.4 Ανάλυση σεισμικού σεναρίου για σεισμό μεγέθους M7

Μετά την εφαρμογή του μοντέλου για σεισμό αντίστοιχο του 2003, επαναλάβουμε την εφαρμογή για σεισμό μεγέθους M7, το μέγιστο δηλαδή μέγεθος που προέκυψε από την πιθανολογική μελέτη επικινδυνότητας της περιοχής.

Η ανάλυση των αναμενόμενων βλαβών του δομικού ιστού της πόλης της Λευκάδας για τον ισχυρότερο αναμενόμενο σεισμό εγγύς πεδίου πραγματοποιήθηκε για τις τιμές επιτάχυνσης και των δυο μοντέλων στοχαστικής προσομοίωσης ισχυρής εδαφικής κίνησης (μέθοδος σημειακής πηγής και μέθοδος πεπερασμένου ρήγματος). Οι τιμές της έντασης υπολογίστηκαν για και τις τρεις συναρτήσεις σεισμικής έντασης - επιτάχυνσης για κάθε σενάριο από τα παραπάνω. Οι τιμές επιτάχυνσης είναι μεγαλύτερες από αυτές του 2003 και αντίστοιχα και οι τιμές έντασης. Οι τιμές των δεικτών τρωτότητας αντιστοιχούν στα χαρακτηριστικά των κτιρίων σήμερα, βάσει της απογραφής των κτιρίων που έγινε στο πλαίσιο της διατριβής το 2012.

Οι συναρτήσεις υπολογισμού σεισμικής έντασης είναι κατά (Α) Tselentis and Danciu, 2008 (Β) Wald et al., 1999 (Γ). Margottini et al., 1992

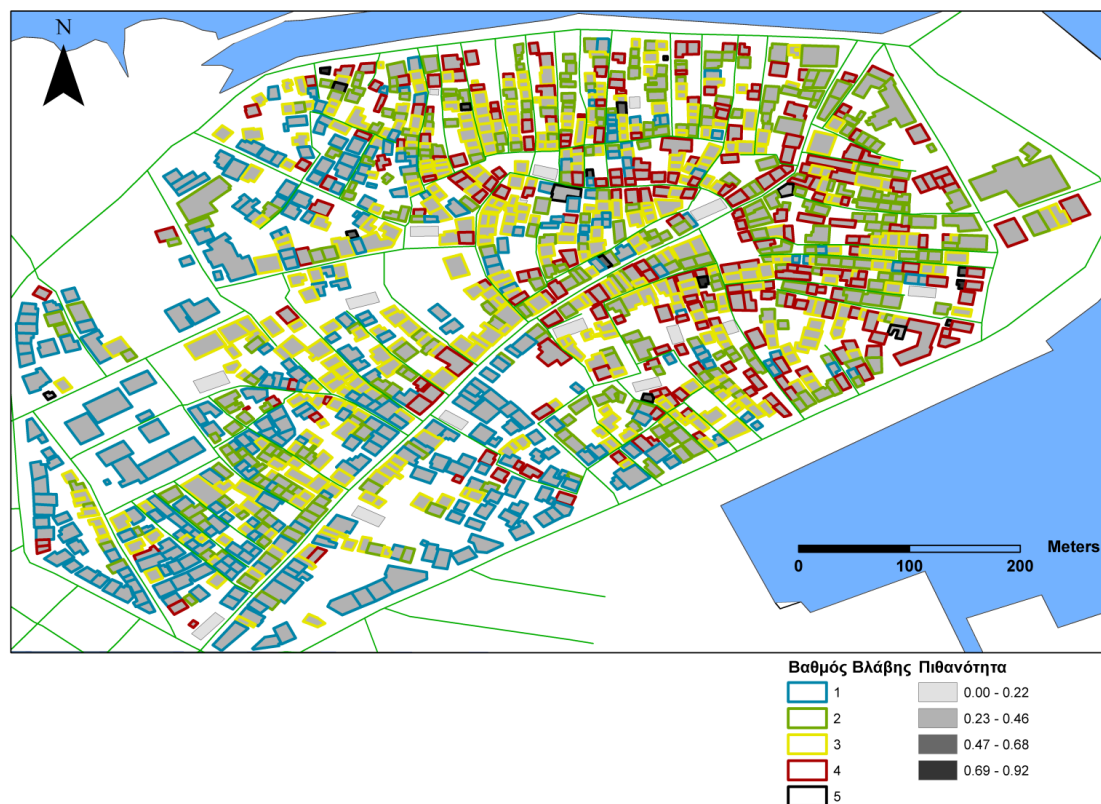
Σχεδιάστηκαν οι ψηφιακοί χάρτες κατανομής πιθανών βλαβών από τους αντίστοιχους πίνακες (Σχ. 119, 120, 121). Αντίστοιχα παρουσιάζονται οι χάρτες κατανομής πιθανότερων βαθμών βλάβης για τιμές μέγιστης επιτάχυνσης υπολογισμένες με τη μέθοδο πεπερασμένου ρήγματος (Σχ. 122, 123, 124).

Παρατηρώντας τους παρακάτω χάρτες βλέπουμε ότι τα σενάρια που βασίζονται σε προσομοίωση εδαφικής κίνησης με τη μέθοδο σημειακής πηγής δίνουν μεγαλύτερη πιθανότητα για περισσότερα κτίρια να υποστούν σοβαρές βλάβες ή να καταρρεύσουν. Το καταστροφικότερο σενάριο βασίζεται στον υπολογισμό της έντασης εφαρμόζοντας την σχέση των Margotini et al., 1992. Αντίθετα στο λιγότερο καταστροφικό, η επιτάχυνση έχει υπολογιστεί με τη μέθοδο πεπερασμένου ρήγματος και η σεισμική ένταση εκτιμήθηκε από τη συνάρτηση των Wald et al., 1999.

Ρεαλιστικότερο μοντέλο είναι αυτό που βασίζεται στη σχέση των Tselentis and Dansiu και στη μέθοδο του πεπερασμένου ρήγματος. (Σχ. 122)



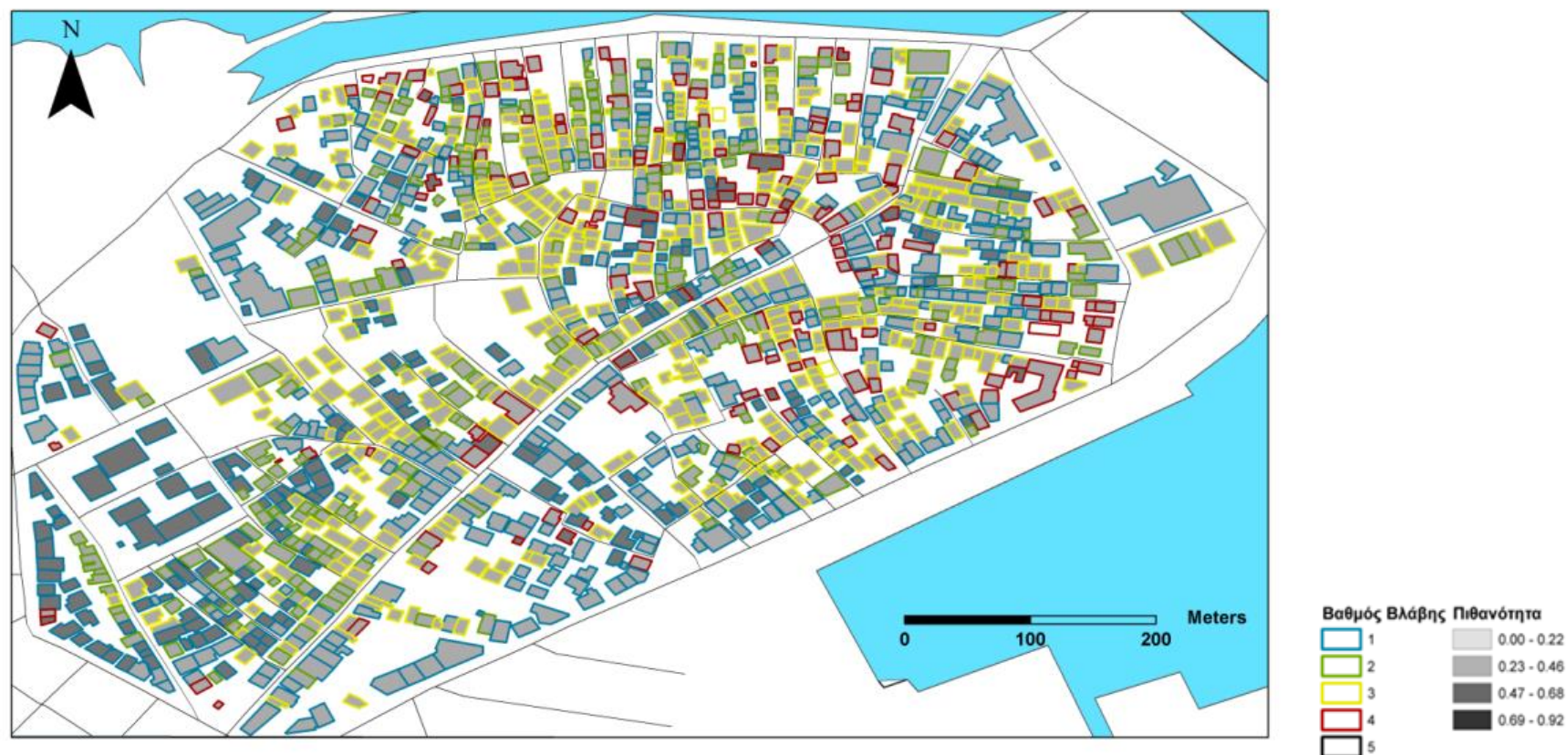
Σχήμα 119 Κατανομή βαθμών βλάβης για στοχαστική προσομοίωση σεισμού M7 με μέθοδο σημειακής πηγής. Η ένταση υπολογίστηκε κατά Tselentis and Danciu, 2008



Σχήμα 120 Κατανομή βαθμών βλάβης για στοχαστική προσομοίωση σεισμού M7 με μέθοδο σημειακής πηγής. Η ένταση υπολογίστηκε κατά Wald et al., 1999



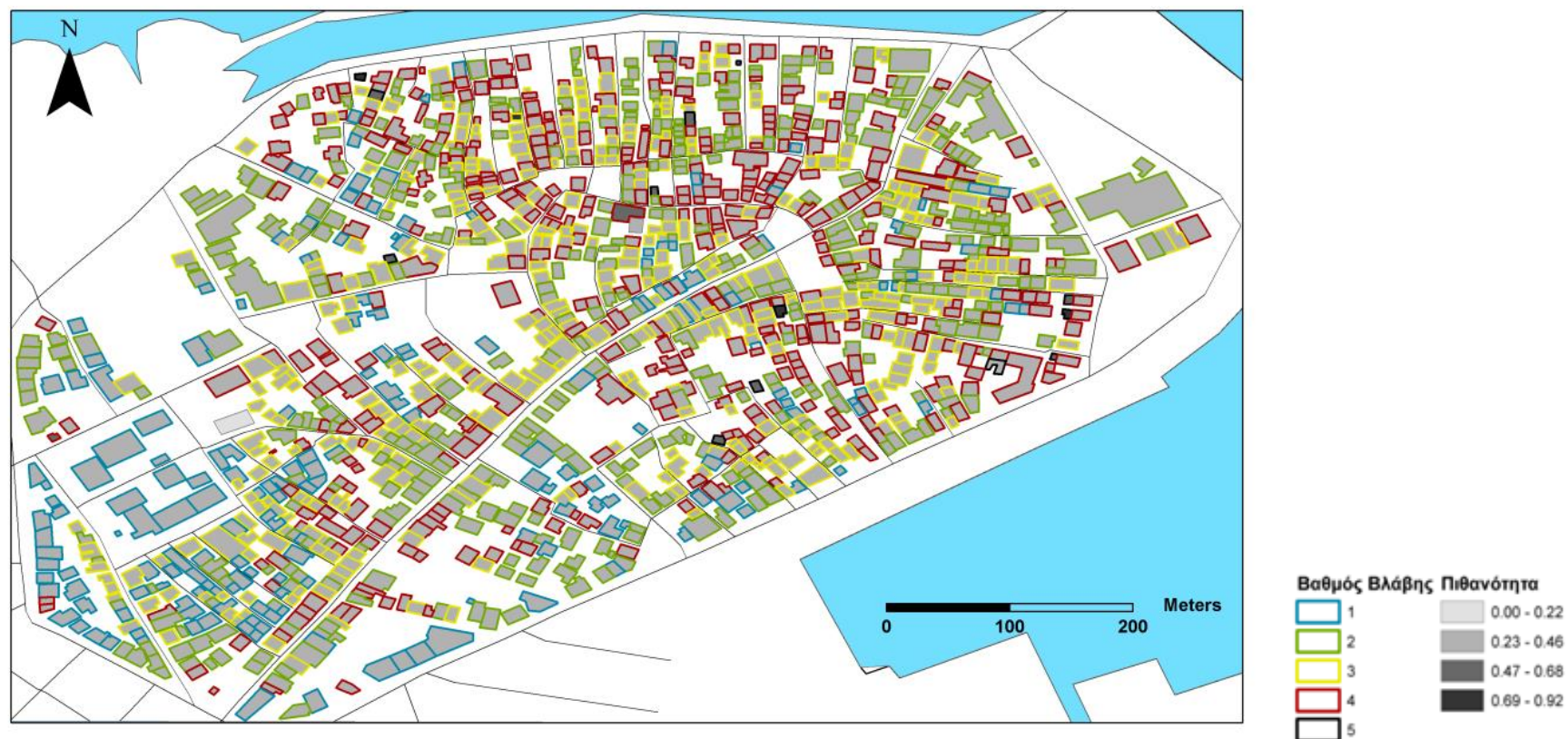
Σχήμα 121 Κατανομή βαθμών βλάβης για στοχαστική προσομοίωση σεισμού M7 με μέθοδο σημειακής πηγής. Η ένταση υπολογίστηκε κατά Margottini et al., 1992



Σχήμα 122 Κατανομή βλαβών για προσομοίωση σεισμικού σεναρίου με τη μέθοδο πεπερασμένου ρήγματος. Η ένταση υπολογίστηκε κατά Tselentis and Danciu



Σχήμα 123 Κατανομή βλαβών για προσομοίωση σεισμικού σεναρίου με τη μέθοδο πεπερασμένου ρήγματος. Η ένταση υπολογίστηκε κατά Wald et al. 1999



Σχήμα 124 Κατανομή βλαβών για προσομοίωση σεισμικού σεναρίου με τη μέθοδο πεπερασμένου ρήγματος. Η ένταση υπολογίστηκε κατά Margottini et al., 1992

Όπως προκύπτει από την παραπάνω ανάλυση, για αυτό σενάριο σεισμού ο μέγιστος βαθμός βλάβης είναι τέσσερα (4) με πιθανότητα που φτάνει έως περίπου 60% σε κάποιες περιπτώσεις. Ο αριθμός των κτιρίων με βαθμό βλάβης 4 είναι αυξημένος σε σχέση με τα αντίστοιχα κτίρια στο σεισμό του 2003.

Όπως φαίνεται από τον αντίστοιχο χάρτη (Σχ. 123), λίγα κτίρια δεν θα υποστούν βλάβες ή θα υποστούν μικρές βλάβες. Αυτά είναι τα νεότερα κτίρια της πόλης, εκ των οποίων τα περισσότερα είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τα παλαιότερα κτίρια που βρίσκονται στο κέντρο, βόρεια, νότια και νοτιοανατολικά, όπου και με το σεισμό του 2003 υπέστησαν ζημιές (βαθμός βλάβης 3), κινδυνεύουν πλέον με βαριές ζημιές (βαθμός βλάβης 4).

Σύμφωνα με το δυσμενέστερο σενάριο για επικείμενο σεισμό M7, το οποίο δεν μπορεί να αποκλειστεί, κάποια κτίρια κινδυνεύουν να καταρρεύσουν (βαθμός βλάβης 5) και πολλά από αυτά θα υποστούν βαριές βλάβες (βαθμός 4). (Σχ. 119, 120, 121, 124). Δυσμενέστερο σενάριο είναι αυτό που έχει εκπονηθεί με τη μέθοδο της σημειακής πηγής.

Το δομικό σύστημα της Λευκάδας, που έδειξε καλή συμπεριφορά σε σεισμό μεγέθους M=6.2, έχει σημαντική πιθανότητα να υποστεί μερική καταστροφή σε μεγαλύτερο σεισμό.

Για να αποτραπεί το σενάριο καταστροφών, θα πρέπει στα κτίρια που παρουσιάζουν αυξημένη πιθανότητα βλάβης να βελτιωθεί η τρωτότητά τους, δηλ. να συντηρηθούν καλύτερα, να ενισχυθούν τα ισόγεια όπου έχει αφαιρεθεί η εσωτερική τοιχοποιία, κλπ. Περαιτέρω, κάθε τύπος κτιρίου θα πρέπει να εξεταστεί ξεχωριστά, ώστε να καθοριστούν οι παράμετροι αυτές που αυξάνουν την τρωτότητά του και να ληφθούν τα απαραίτητα μέτρα ενίσχυσης και αποκατάστασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 11

Σύνοψη - Συμπεράσματα

11.1 Σύνοψη

Στόχος της διατριβής αυτής είναι η ανάπτυξη μοντέλου εκτίμησης του σεισμικού κινδύνου σε κλίμακα μεμονωμένου κτιρίου στην παλιά πόλη της Λευκάδας, περιοχή με πολύ υψηλή σεισμική επικινδυνότητα, χτισμένη σε χαλαρά εδαφικά ιζήματα, τα κτίρια της οποίας στην πλειοψηφία τους είναι χτισμένα με παραδοσιακό τρόπο δόμησης. Η καινοτομία της έγκειται στο ότι πρώτη φορά εκτιμάται ο σεισμικός κίνδυνος σε μικρή κλίμακα στον ελλαδικό χώρο και ιδιαίτερα σε περιοχή που παρατηρούνται πολλοί δομικοί τύποι κατασκευών.

Το προτεινόμενο μοντέλο βασίζεται αφενός, στην εκτίμηση σεισμικής τρωτότητας κάθε κτιρίου και αφετέρου, στην μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες εδαφικές συνθήκες της θέσης θεμελίωσης κάθε κτιρίου.

Πραγματοποιήθηκε απογραφή όλου του δομικού ιστού της πόλης, καταγράφοντας όλα τα δομικά και μη δομικά στοιχεία κάθε κτιρίου. Εκτιμήθηκε για κάθε κτίριο η τάξη και ο δείκτης τρωτότητάς του, εφαρμόζοντας την εμπειρική Μακροσεισμική μέθοδο (EMS-98) (Grünthal, 1998). Δημιουργήθηκε γεωβάση δεδομένων δίνοντας δυνατότητα προβολής της φωτογραφίας, των δομικών και μη δομικών χαρακτηριστικών και της τάξης τρωτότητας κάθε κτιρίου.

Εκτιμήθηκε η σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής με πιθανολογική και αιτιοκρατική προσέγγιση. Κατά την εφαρμογή της αιτιοκρατικής μεθόδου πραγματοποιήθηκε στοχαστική προσομοίωση της σεισμικής εδαφικής κίνησης με τις μεθόδους του σημειακού μοντέλου (Boore, 2005) και του πεπερασμένου ρήγματος (Beresnev and Atkinson, 1998) για δυο σενάρια σεισμών, αφενός το σεισμό που έπληξε το νησί στις 14 Αυγούστου 2003 και αφετέρου το μέγιστο αναμενόμενο σεισμό M7, όπως προκύπτει από πιθανολογική ανάλυση σεισμικής επικινδυνότητας (Kassaras et.al, 2015). Οι τοπικές εδαφικές συνθήκες στη θέση θεμελίωσης κάθε κτιρίου λήφθηκαν υπόψη κατά την

εφαρμογή της στοχαστικής προσομοίωσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις μικροθορύβου σε 46 θέσεις στην παλιά πόλη (Kassaras et al., 2008) και υπολογίστηκαν οι φασματικοί λόγοι οριζόντιων προς την κατακόρυφη συνιστώσα (Nakamura, 1998). Καθορίστηκαν σε κάθε θέση η δεσπόζουσα συχνότητα και ο οιονεί παράγοντας ενίσχυσης.

Το ιξωδοελαστικό εδαφικό μοντέλο σε κάθε μία από τις 46 θέσεις υπολογίστηκε από τη γραμμική αντιστροφή των καμπύλων φασματικών λόγων (Herak, 2008). Το αρχικό ελαστικό μοντέλο για τη διαδικασία αντιστροφής προέκυψε από την ανάλυση διαθέσιμων γεωτεχνικών γεωτρήσεων, όπου χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις δοκιμών πρότυπης διείσδυσης (N_{SPT}) σε γεωτρήσεις για τον υπολογισμό της ταχύτητας εγκαρσίων κυμάτων εφαρμόζοντας εμπειρικές σχέσεις.

Μέσω του στοχαστικού μοντέλου σεισμικής έντασης στην πόλη υπολογίστηκε ο πιθανότερος βαθμός βλάβης και η πιθανότητα να συμβεί για κάθε κτίριο για τα δυο σεισμικά σενάρια με εφαρμογή πιθανολογικού μοντέλου βασιζομένου στην παραδοχή ότι οι βλάβες των κτιρίων μετά από σεισμό ακολουθούν τη Βήτα κατανομή (Giovinazzi and Lagomarsino, 2004). Ο βαθμός βλάβης υπολογίστηκε ως συνάρτηση του δείκτη τρωτότητας κάθε κτιρίου και της θεωρητικής σεισμικής έντασης στη θέση θεμελίωσης.

Αναλύθηκαν οι βλάβες που υπέστησαν τα κτίρια της παλιάς πόλης μετά το σεισμό του 2003 και συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου για προσομοίωση του εν λόγω σεισμού, δείχνοντας ικανοποιητική συσχέτιση.

11.2 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη αποτελεί ένα βήμα προς τη ρεαλιστική εκτίμηση δυνητικών δομικών σεισμικών βλαβών και επομένως στη λήψη μέτρων για τη βελτίωση της αντοχής των κτιρίων, συμβάλλοντας έτσι στην προστασία ανθρώπινων ζών και περιουσιών. Για πρώτη φορά δημιουργείται ένα τόσο λεπτομερές μοντέλο πρόβλεψης βλαβών ανά κτίριο στην Ελλάδα. Οι μέθοδοι που εφαρμόστηκαν τόσο για την εκτίμηση της τρωτότητας όσο και της

αναμενόμενης ισχυρής εδαφικής κίνησης θεωρούμε ότι απέδωσαν ικανοποιητικά αποτελέσματα. Το προτεινόμενο μοντέλο θεωρούμε ότι μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου στην περιοχή μελέτης. Επιπλέον, η περιγραφείσα μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς εφόσον υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία. Συνοψίζουμε τα κυριότερα συμπεράσματα της μελέτης:

- Η παλιά πόλη της Λευκάδας είναι θεμελιωμένη σε χαλαρά ιζήματα τα οποία συμβάλλουν στην ενίσχυση της σεισμικής κίνησης. Το έδαφος της πόλης βρέθηκε ότι ανήκει στην κατηγορία C στην πλειοψηφία του ή D, σύμφωνα με την ταξινόμηση του EC8.
- Οι μέγιστες τιμές των δεσποζουσών συχνοτήτων που υπολογίστηκαν με τη συμβολή μετρήσεων μικροθορύβου, παρατηρούνται στα βόρεια, ανατολικά και νότια της πόλης.
- Η συχνότητα απόκρισης του εδάφους διαφέρει από τις ελαστικές ιδιοσυχνότητες των κτιρίων, γεγονός θετικό ως προς τη σεισμική φόρτιση των κτιρίων.
- Η σύγκριση των ταχυτήτων διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων μέσω της γραμμικής αντιστροφής των καμπύλων φασματικών λόγων, με τις αντίστοιχες υπολογισμένες από τις γεωτεχνικές γεωτρήσεις έδειξε ότι οι Vs των γεωτρήσεων βρίσκονται εντός των ορίων αυτών που προέκυψαν από την αναστροφή καμπυλών για βάθη < 15 m.
- Η απογραφή του 2001 από την Ελληνική Στατιστική Υπηρεσία δεν ήταν επαρκής για την εκτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών διότι, αφενός, τα κτίρια με διπλό τρόπο δόμησης άλλοτε συγκαταλέγονται στα πέτρινα, άλλοτε στα ξύλινα και άλλοτε χαρακτηρίζονται ως κατασκευασμένα από “άλλο” υλικό και αφετέρου, δεν καθορίζεται η ακριβής θέση των κτιρίων στο οικοδομικό τετράγωνο όπου ανήκουν. Αντιθέτως κατά την δική μας απογραφή το 2012, καταγράφηκαν λεπτομερώς τα δομικά και μη δομικά στοιχεία των κτιρίων που καθορίζουν την τρωτότητά τους, καθώς και η θέση τους στο οικοδομικό τετράγωνο.

Κατά την εκτίμηση της τάξης τρωτότητας των κτιρίων διαπιστώθηκε ότι τα πέτρινα κτίρια ανήκουν κυρίως στις κατηγορίες A και A – B. Τα κτίρια από ποντελάρισμα ανήκουν κυρίως στις κατηγορίες B και B – C. Τα κτίρια αυτά

είναι λιγότερο τρωτά από τα αντίστοιχα πέτρινα σύμφωνα με τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, διότι το μεγαλύτερο μέρος της μάζας τους κατανέμεται στο ισόγειο, καθώς οι τοίχοι του ισόγειου έχουν μεγάλο πάχος και οι επάνω όροφοι συμπεριφέρονται καλύτερα σε σεισμό λόγω της ελαστικότητας του ξύλινου σκελετού.

Ανάμεσα στα κτίρια με παραδοσιακό τρόπο δόμησης λιγότερο τρωτά αποδείχτηκαν τα ξύλινα κτίρια, που στην πλειοψηφία τους ανήκουν στην κατηγορία C - D και σε κάποιες περιπτώσεις στην κατηγορία D.

Καλύτερα όλων, είναι τα σύγχρονα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα, τα οποία ανήκουν στις τάξεις C-D, D, ακόμα και E. Κατά αντιστοιχία οι μεγαλύτερες τιμές δεικτών τρωτότητας αφορούν στα πέτρινα κτίρια και οι μικρότερες στα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η ανάλυση των βλαβών των κτιρίων μετά το σεισμό του 2003 επιβεβαίωσε, ότι τα παραδοσιακά κτίρια της Λευκάδας με ξύλινα δομικά στοιχεία συμπεριφέρθηκαν ικανοποιητικά.

Παρατηρήθηκε ότι:

- Τα πέτρινα κτίρια με τάξη τρωτότητας A ή A-B υπέστησαν τις περισσότερες βλάβες.
- Στα κτίρια με το διπλό τρόπο δόμησης (τάξη τρωτότητας B), των οποίων το ισόγειο έχει πενταπλάσια μάζα από αυτή των επάνω ορόφων, οι βλάβες επισημαίνονται κυρίως στην τοιχοποιία του ισόγειου και στις πλινθοδομές πλήρωσης του ξύλινου σκελετού των επάνω ορόφων.
- Η ενεργοποίηση του δευτερεύοντος δομικού συστήματος συνέβαλε στη διατήρηση της δομικής ευστάθειας.
- Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την καλύτερη τάξη τρωτότητάς τους σε σχέση με τα πέτρινα.
- Τα κτίρια που υπέστησαν τις σοβαρότερες βλάβες στην πλειοψηφία τους ήταν κακοσυντηρημένα ή κτίρια με ασταθή όροφο. Τις περισσότερες φορές ο ασταθής όροφος αφορά ισόγεια που έχουν μετατραπεί σε καταστήματα, μεγαλώνοντας ανοίγματα τοίχων ή κατεδαφίζοντας εσωτερικούς τοίχους.

- Τα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα δεν υπέστησαν σοβαρές βλάβες. Σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίζονται βλάβες σε κατακόρυφα στοιχεία λόγω της ασυμμετρικής κατανομής των τοίχων.

Η καλύτερη συμπεριφορά των παραδοσιακών κτιρίων σε σχέση με την αναμενόμενη θεωρούμε ότι οφείλεται:

- Στην καλή ποιότητα κατασκευής τους λόγω της εμπειρίας από τους πολυάριθμους σεισμούς που έχουν πλήξει το νησί.
- Στη μικρή μάζα στο ύψος και στο σχήμα τους που τείνει να μοιάζει με κύβο, ειδικά σε κάποια πέτρινα.
- Στον τρόπο θεμελίωσης, ένα σύστημα εσχάρας, το οποίο αποτελείται από κορμούς δέντρων τοποθετημένους σε επάλληλες στρώσεις. Αυτό το σύστημα θεμελίωσης σε συνδυασμό με τη μικρή μάζα των κατασκευών συνέβαλε στο να μην παρατηρηθούν καθιζήσεις.
- Στις ιδιοπερίόδους των κτιρίων που είναι μικρότερες από 0.2 s. Συγκρινόμενες με το φάσμα του σεισμού διαφαίνεται ότι δεν υπήρξαν φαινόμενα συντονισμού (Karakostas et al., 2005).

Επίσης διαπιστώθηκε ότι:

- Παρατηρώντας τη χωροταξική κατανομή των βλαβών διαπιστώνουμε ότι κατανέμονται κυρίως στις περιοχές που οι φασματικοί λόγοι HVSR παίρνουν τις μεγαλύτερες τιμές, καθώς και κατά μήκος του εμπορικού δρόμου της πόλης όπου κατασκευές με ασταθείς ορόφους είναι παρούσες, επαληθεύοντας την επίδραση τόσο της εδαφικής ενίσχυσης, όσο και των μη κατάλληλων πλειστάκις παρεμβάσεων στη δομική ευστάθεια, στις συνέπειες του σεισμού επί των κατασκευών.
- Η προσομοίωση της μέγιστης εδαφικής κίνησης εκφράστηκε με τον υπολογισμό της μέγιστης επιτάχυνσης η οποία δεν περιλαμβάνει πληροφορίες για τη διάρκεια, την ενέργεια και το συχνотικό περιεχόμενο της εδαφικής κίνησης, πράγμα που μπορεί να συνδέεται με την απόκριση των κατασκευών (Pomonis et al., 1992; Koliopoulos et al., 1998). Παρόλα αυτά, στις μικρές περιόδους απόκρισης των κατασκευών που μελετάμε (<0.2 sec,

Karakostas et al., 2005), το εξαχθέν μοντέλο είναι αντιπροσωπευτικό ως προς το θέμα της αλληλεπίδρασης εδάφους-κτιρίου.

- Η εφαρμογή της μεθόδου μικροθορύβου, παρότι δίνει συναφή αποτελέσματα ως προς τη συχνότητα ενίσχυσης, θεωρείται ότι υποτιμά το βαθμό της ενίσχυσης, ιδιαίτερα λόγω μη γραμμικής απόκρισης του εδάφους στην ισχυρή σεισμική κίνηση. Η καλή συσχέτιση που παρατηρείται στην κατανομή θεωρητικών και πραγματικών βλαβών δείχνει ότι για ένα αντίστοιχο σεισμικό μέγεθος, η μέθοδος των μετρήσεων μικροθορύβου δίνει ρεαλιστικά αποτελέσματα. Για μεγαλύτερα μεγέθη θα πρέπει να υπάρχει σχετική επιφύλαξη, καθώς αναλυτικά στοιχεία για μεγαλύτερους σεισμούς από αυτόν του 2003 δεν υπάρχουν
- Οι στοχαστικές μέθοδοι προσομοίωσης έδωσαν τιμές μέγιστης επιτάχυνσης πολύ μεγαλύτερες από τα φάσματα κανονισμού δόμησης τα οποία βασίζονται σε πιθανολογικές μελέτες εκτίμησης σεισμικής επικινδυνότητας. Οι πιθανολογικές μελέτες βασίζονται σε συνδυασμό σεισμών διαφορετικών μεγεθών και από διαφορετικές αποστάσεις που είναι στατιστικά δυνατό να επηρεάσουν μια περιοχή σε ορισμένο χρονικό διάστημα. Οι στοχαστικές μέθοδοι που εφαρμόσαμε αντιστοιχούν σε συγκεκριμένο σεισμικό σενάριο (μέγιστο μέγεθος σεισμού με την μικρότερη επικεντρική απόσταση). Επίσης τα φάσματα κανονισμού αφορούν εκτεταμένες περιοχές και όχι περιοχές σε μικρή κλίμακα όπως μια μικρή πόλη. Η επίδραση του εδάφους θεμελίωσης εκτιμάται με βάση την κατάταξη του σε κατηγορίες.
- Τα εκτιμώμενα σενάρια σεισμικού κινδύνου και οι παρατηρηθείσες βλάβες κατά τον σεισμό του 2003 συσχετίζονται καλά για μεγάλο αριθμό κτιρίων, ειδικά για τα κτίρια που ελέγχθηκαν από τον αρμόδιο φορέα. Το ποσοστό των κτιρίων για τα οποία επαληθεύτηκε το μοντέλο είναι μεγαλύτερο από την αντίστοιχη υπολογισθείσα πιθανότητα. Επίσης, η κατανομή των υπολογισθέντων από πραγματικές βλάβες σεισμικών εντάσεων ακολουθεί τις υπολογισμένες από το μοντέλο καμπύλες τρωτότητας.
- Παρόλο που η μέθοδος της σημειακής πηγής έδωσε τα πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα για προσομοίωση σεισμού M6.2 θεωρούμε ότι η μέθοδος του πεπερασμένου ρήγματος δίνει πιο αποδεκτές τιμές εδαφικής επιτάχυνσης

για σεισμό M7, όπως αναλύεται στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επομένως περισσότερο ρεαλιστικό μοντέλο είναι αυτό που βασίζεται στη σχέση των Tselentis and Dansiu και στη μέθοδο του πεπερασμένου ρήγματος. (Σχ.123)

- Σύμφωνα με το δυσμενέστερο σενάριο αναμενόμενου σεισμού κοντινού πεδίου ($M_w=7$), παρόλη την καλή αντισεισμική συμπεριφορά του δομικού ιστού, αναδεικνύεται σημαντικός κίνδυνος αυτός να υποστεί σοβαρές βλάβες, γεγονός που σε κάποιες περιπτώσεις καθιστά αναγκαία την λήψη μέτρων.
- Γενικά, τα παλαιότερα παραδοσιακά κτίρια της πόλης πρέπει να συντηρούνται επαρκώς, ειδικά τα ξύλινα μέρη τους που είναι ευάλωτα στις κλιματολογικές και άλλες συνθήκες.

Μελλοντικές προοπτικές

Η βάση δεδομένων, η οποία οργανώθηκε σε Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών, περιλαμβάνει για όλα τα κτίρια της παλιάς πόλης της Λευκάδας τα δομικά και μη δομικά χαρακτηριστικά τους, την περίοδο κατασκευής τους την κατηγορία και τον δείκτη τρωτότητας τους (σύμφωνα με την EMS-98), το βαθμό βλάβης που υπέστησαν κατά το σεισμό του 2003 καθώς και φωτογραφίες υψηλής ανάλυσης. Η βάση αυτή συμπληρώνει τις απογραφές της Ελληνικής Στατιστικής Υπηρεσίας και του Εθνικού Κτηματολογίου και είναι διαθέσιμη στην επιστημονική κοινότητα.

Όπως ήδη αναλύθηκε, θα πρέπει να υπάρχει σχετική επιφύλαξη στα αποτελέσματα μελέτης της σεισμικής απόκρισης του εδάφους με μέθοδο που βασίζεται σε μετρήσεις μικροθορύβου. Προτείνεται να πραγματοποιηθεί ανάλυση της σεισμικής απόκρισης του εδάφους λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των επί τόπου δοκιμών πρότυπης διείδυσης και δοκιμών cross hole καθώς και των εργαστηριακών δοκιμών που έχουμε στη διάθεσή μας από τις γεωτεχνικές γεωτρήσεις στην παλιά πόλη της Λευκάδας. Τα αποτελέσματα των δυο μεθοδολογιών μπορούν να συγκριθούν.

Προτείνεται η εφαρμογή ημιεμπειρικών μεθόδων εκτίμησης της τρωτότητας στο μέλλον, μέσω εκτίμησης των ιδιοσυχνοτήτων αντιπροσωπευτικών κτιρίων ή

συνεκτίμησης των καμπυλών τρωτότητας που έχουν σχεδιαστεί εφαρμόζοντας αναλυτικές μεθόδους, η οποία θα συμβάλλει στην καλύτερη εκτίμηση της αλληλεπίδρασης εδάφους-κτιρίου κατά το σεισμό.

Το μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί και για τα άλλα σενάρια σεισμών όπως για σεισμικά μεγέθη 6.9, 6.6, και 6.4 που υπολογίστηκαν για πιθανότητα μη υπέρβασης 90% στα 50 χρόνια και πιθανότητα μη υπέρβασης 60% στα επόμενα 50 και 25 έτη αντίστοιχα ώστε να συγκριθούν τα σεισμικά σενάρια μεταξύ τους.

Προτείνεται η οργάνωση ενός αυτοματοποιημένου συστήματος ικανού να παράγει χάρτες για την έγκαιρη και αξιόπιστη εκτίμηση σεισμικών βλαβών στο δομημένο περιβάλλον στη περίπτωση σεισμικών κρίσεων μπορεί να αποτελέσει πολύτιμο εργαλείο στα χέρια αρμόδιων φορέων.

Γλωσσάριο

Αθροιστική συνάρτηση της κατανομής βήτα (beta cumulative density function CDF): Η αθροιστική συνάρτηση της κατανομής βήτα χρησιμοποιείται εδώ για τον υπολογισμό της πιθανοτικής κατανομής του βαθμού βλάβης.

Αιτιοκρατική μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας (Deterministic seismic hazard analysis): μέθοδος μελέτης της σεισμικής επικινδυνότητας σύμφωνα με την οποία η μέγιστη αναμενόμενη εδαφική κίνηση σε μια θέση καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη το ευρύτερο γεωλογικό, τεκτονικό και σεισμοτεκτονικό καθεστώς.

Αλπικοί σχηματισμοί: Πετρώματα του Ελλαδικού χώρου ηλικίας από το Τριαδικό έως το κατώτερο Μειόκαινο, η δημιουργία των οποίων συνδέεται με την Αλπική ορογένεση.

Ανάλυση Fourier: Η διαδικασία λήψης του φάσματος συχνοτήτων (φάσμα Fourier) που απαρτίζουν κάθε χρονικά μεταβαλλόμενο σήμα. Τα σήματα που προκύπτουν είναι συνεχή και όχι σειρές διακριτών, αρμονικών συνιστωσών (σειρές Fourier).

Αναλυτική Μέθοδος: Μηχανική μέθοδος για την εκτίμηση της τρωτότητας.

Απόσβεση εδαφικής κίνησης: Η σταδιακή μείωση των ταλαντώσεων του εδάφους με το χρόνο. Εξαρτάται από το μέγεθος του σεισμού, την απόσταση μεταξύ της εστίας και της θέσης καταγραφής, καθώς και από τις τοπικές εδαφικές συνθήκες στη θέση καταγραφής.

Ασταθής όροφος: Ο όροφος που είναι πιο εύκαμπτος από τους υπόλοιπους ορόφους με αποτέλεσμα να απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό σεισμικής ενέργειας, παρουσιάζοντας εμφανή κίνδυνο αστοχίας στο συγκεκριμένο σημείο. Εμφανίζεται συνήθως στην μεγαλύτερου ύψους ισόγεια στάθμη μιας κατασκευής για την ανάγκη σχεδιασμού καταστημάτων με υαλοπετάσματα ή ανοιχτής pilotis, καθώς και στις ασυνέχειες των κατακόρυφων υποστυλωμάτων της κατασκευής.

Βαθμοί σεισμικής έντασης (I), κατά EMS-98: Διάκριση ενός σεισμού ανάλογα με τα μακροσεισμικά του αποτελέσματα σε I – μη αισθητό, II – ανεπαίσθητο, III – ασθενή, IV – ευρέως αισθητό, V – ισχυρό, VI – ελαφρά βλαβερό, VII – βλαβερό, VIII – βαριά βλαβερό, IX – καταστρεπτικό, X – πολύ καταστρεπτικό, XI – συντριπτικό και XII – ολοκληρωτικά συντριπτικό.

Βαθμός συμμετοχής (degree of membership): αριθμός που καθορίζει αν ένα στοιχείο ανήκει ή όχι σε ένα σύνολο βάσει του μέτρου διατεταγμένης κλίμακας.

Βήτα κατανομή (Beta distribution): Συνεχής κατανομή πιθανότητας, με

συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας $\frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} I_{(0,1)}(x)$

Γ Συνάρτηση (Gamma function): Η συνάρτηση γάμμα ορίζεται στο πεδίο

$H(0) = \{z : \text{Re}(z) > 0\}$ σύμφωνα με: $\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$.

Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών GIS (Geographic Information System GIS): Λογισμικά μέσω των οποίων γίνεται διαχείριση, παρουσίαση, ανάλυση και αποθήκευση δεδομένων και που εμπεριέχουν την έννοια της γεωγραφικής κατανομής.

Γεωμετρική διασπορά σεισμικών κυμάτων: Η εξασθένηση των σεισμικών κυμάτων κατά την εξάπλωσή τους στο εσωτερικό της Γης. Είναι ανεξάρτητη των ιδιοτήτων του μέσου διάδοσης. Αντιστοιχεί στη μέγιστη τιμή του φάσματος μιας χρονοσειράς. Συνήθως ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα του εδάφους, η οποία είναι συνάρτηση του πάχους του εδαφικού στρώματος και της ταχύτητας των εγκαρσίων κυμάτων.

Δείκτης τρωτότητας κτιρίων, VI (Vulnerability Index): Αριθμητική έκφραση της τρωτότητας ενός κτιρίου που καθορίζεται από το αλγεβρικό άθροισμα ενός δείκτη αντιπροσωπευτικού (VI*) της πιθανότερης τάξης τρωτότητας στην οποία ανήκει το κτίριο και ενός τροποποιητικού συντελεστή που προκύπτει από δομικά και άλλα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την τρωτότητα. Παίρνει τιμές από 0 για τα λιγότερο τρωτά κτίρια έως 1 για τα πιο τρωτά.

Διπλός τρόπος δόμησης (ποντελάρισμα) (dual load bearing system and timber frame structure): Παραδοσιακός τρόπος δόμησης σύμφωνα με τον οποίο το ισόγειο κατασκευάζεται από πέτρα και ο σκελετός των επάνω ορόφων από ξύλο.

Δοκιμή Cross-Hole: Η δοκιμή cross-hole χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των δυναμικών ιδιοτήτων του εδάφους. Η εκτέλεση της δοκιμής αποβλέπει στην ακριβή μέτρηση των ταχυτήτων διάδοσης των διατμητικών (V_s) και διαμηκών (V_p) κυμάτων στο έδαφος. Συμβάλει επίσης στην εκτίμηση των μέγιστων δυναμικών μέτρων διάτμησης και ελαστικότητας.

Δοκιμή πρότυπης διείσδυσης (SPT) (Standard Penetration Test): Γεωτεχνική δοκιμή πεδίου κατά την οποία μετράται ο αριθμός κρούσεων N , ο οποίος απαιτείται ώστε να διεισδύσει κατά 30 εκ. μέσα στο έδαφος ο πρότυπος δειγματολήπτης Terzaghi με μέγιστο αριθμό κρούσεων 50. Τα αποτελέσματά της χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό των εδαφών και την έμμεση εκτίμηση των ταχυτήτων V_s των εγκαρσίων κυμάτων.

Δοκιμή Στατικής Πενετρομέτρης (Cone Penetration Test) (CPT): Γεωτεχνική δοκιμή πεδίου με σκοπό τον επιτόπιο προσδιορισμό της αντίστασης που αναπτύσσεται σε ένα τυποποιημένο κώνο και σε ένα κυλινδρικό στέλεχος τριβής, που προωθούμενα στο έδαφος με υδραυλικά μέσα (προσομοίωση τυποποιημένου πάσσαλου υπό κλίμακα), προσδιορίζεται η μεταβολή των πιέσεων του νερού των πόρων.

Δυσκαμψία κατασκευής: Η αντίσταση που παρουσιάζει η κατασκευή στην παραμόρφωση κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής δόνησης. Εξαρτάται από τη δυνατότητα στροφής των υποστυλωμάτων στα άκρα τους.

Εγκάρσια κύματα S: Κύματα χώρου που σχετίζονται με την αντίδραση των πετρωμάτων στη μεταβολή του σχήματός τους.

Εδαφική στήλη: Στρωματογραφική στήλη γεωλογικών σχηματισμών που υπέρκειται του σεισμικού υποβάθρου.

Ελληνικό τόξο: Τεκτονική δομή που οφείλεται στην καταβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική.

Εμπειρική Μέθοδος: Μέθοδος εκτίμησης της τρωτότητας μέσω μακροσεισμικών εντάσεων και παρατηρήσεων πεδίου.

Ενίσχυση του εδάφους (site amplification): Η επίδραση («ενίσχυση») του εδάφους εκφράζεται ως ο λόγος ή το φάσμα μεταφοράς της σεισμικής κίνησης από το σεισμικό υπόβαθρο στην ελεύθερη επιφάνεια του εδάφους.

Ενίσχυση σεισμικής απόκρισης κτιρίων: Οι επεμβάσεις στα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής με στόχο την καλύτερη αντοχή της στην ανάληψη των σεισμικών φορτίων. Η αύξηση δηλαδή της φέρουσας ικανότητας ή πλαστιμότητας του δομήματος, τοπικά ή και καθολικά.

Ενίσχυση σεισμικών κυμάτων: Η συμβολή των σεισμικών κυμάτων που αυξάνει το πλάτος τους.

Ενοποιημένο Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (Unified Soil Classification System, USCS): Σύστημα κατάταξης των εδαφών το οποίο είναι αποδεκτό ως προδιαγραφή: α) από την Αμερικανική Εταιρεία Ελέγχου των Υλικών (ASTM-American Society for Testing Materials), β) το σύστημα της Αμερικανικής Ένωσης των Οδοποιών (AASHTO-American Association of State Highway and Transportation Officials), γ) το Βρετανικό Σύστημα Κατάταξης Εδαφών (BSCS-British Soil Classification System) και δ) το Σύστημα Κατάταξης κατά τους Γερμανικούς Κανονισμούς (DIN).

Εξομάλυνση φάσματος: Μαθηματικοί χειρισμοί με βάση την ανάλυση Fourier που τροποποιούν / φιλτράρουν επιλεγμένα τμήματα του φάσματος με πλήρη αποκοπή των μη επιθυμητών συχνοτήτων και τη διατήρηση των χρήσιμων, όπου και εμπεριέχεται η ζητούμενη πληροφορία του σήματος.

Επιμήκη κύματα P: Κύματα χώρου που αφορούν στη μεταβολή του όγκου των πετρωμάτων.

Επιταχυνσιογραφήματα: Χρονοσειρές επιτάχυνσης.

Επιταχυνσιογράφοι: Ειδική κατηγορία σειсмоγράφων. Οι καταγραφές των οργάνων αυτών δίνουν την σεισμική επιτάχυνση σε συνάρτηση με τον χρόνο.

Επιφανειακά κύματα: Σεισμικά κύματα που παράγονται στην επιφάνεια της Γης, καταγράφονται στους σταθμούς μετά τα χωρικά κύματα και έχουν μεγαλύτερα πλάτη και μεγαλύτερες περιόδους σε σχέση με αυτά.

Εστία / πηγή σεισμού: Σημείο στο εσωτερικό της Γης όπου αρχίζει η διάρρηξη.

Ευρωκώδικας: Ευρωπαϊκό Πρότυπο για τον σχεδιασμό των κατασκευών που αναπτύχθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN). Παρέχει ένα κοινό, Ευρωπαϊκό σύνολο μεθόδων για τον υπολογισμό της μηχανικής αντοχής των κατασκευών, με στόχο τη δημιουργία ενός κοινού πλαισίου εντός του Ευρωπαϊκού χώρου σχεδιασμού έργων.

Ζώνη Παξών ή Προαπούλια Ζώνη: Γεωτεκτονική ενότητα που ανήκει στις εξωτερικές ζώνες των Ελληνίδων οροσειρών και απαντάται στο δυτικότερο τμήμα της Ελλάδας.

Ζώνη σύγκλισης: Δύο πλάκες συγκλίνουν όταν κατά την κίνησή τους η μία κατευθύνεται προς την άλλη, με τη βαρύτερη πλάκα να βυθίζεται κάτω από την ελαφρύτερη. Η κατερχόμενη πλάκα ονομάζεται και ζώνη καταβύθισης.

Θεμελιώδης περίοδος κατασκευής: Παράμετρος της τεχνικής κατασκευής από την οποία εξαρτάται η απόκρισή της στη σεισμική κίνηση. Εκφράζεται σε μονάδες χρόνου και εξαρτάται από τη μάζα και το συντελεστή δυσκαμψίας της.

Θεωρία ασαφούς συνόλου (fuzzy set theory): Στατιστική μέθοδος που αποτελεί μια μορφή πλειονότιμης λογικής και προέρχεται από την ανάπτυξη της θεωρίας των ασαφών συνόλων. Χρησιμοποιεί την έννοια της συνάρτησης συμμετοχής σε ένα ασαφές σύνολο, δηλαδή σε τι ποσοστό μια μεταβλητή ανήκει στο σύνολο και θεωρείται καλά προσεγγιστική σε περιβάλλον αβεβαιότητας. Χρησιμοποιείται ευρέως από τους μηχανικούς για τον καθορισμό του δείκτη τρωτότητας των κτιρίων.

I_{max} : Μέγιστη τιμή μακροσεισμικής έντασης.

Ιόνια ζώνη: Γεωτεκτονική ενότητα που ανήκει στις εξωτερικές ζώνες των Ελληνίδων οροσειρών

Ισχυρή σεισμική εδαφική κίνηση: Η εδαφική κίνηση λόγω σεισμού που προκαλεί βλάβες στα δομικά στοιχεία μιας κατασκευής, καθώς και ανθρώπινες απώλειες.

Καμπύλες ευθραυστότητας: Καμπύλες που απεικονίζουν την πιθανότητα υπέρβασης κάθε στάθμης βλαβών σε συνάρτηση με την κορυφαία σεισμική επιτάχυνση PGA. Παράγονται από την αθροιστική συνάρτηση της κατανομής βήτα CDF.

Καμπύλες Τρωτότητας: Καμπύλες που αποδίδουν μια πρόβλεψη του ποσοστού του εκτιθέμενου κτιριακού αποθέματος σε κάθε κατάσταση βλάβης μετά από έναν σεισμό. Σχετίζουν την πιθανότητα υπέρβασης διάφορων καταστάσεων βλαβών συναρτήσει μιας παραμέτρου της εδαφικής κίνησης, απεικονίζοντας έτσι τον σεισμικό κίνδυνο.

Καμπύλες φασματικού λόγου οριζόντιων προς κατακόρυφη συνιστώσα (Horizontal to Vertical Spectral Ratio): Οι κορυφές των καμπύλες φασματικών λόγων οριζόντιας προς κατακόρυφη συνιστώσα της εδαφικής κίνησης προσεγγίζουν τη θεμελιώδη συχνότητα ενίσχυσης των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών, ενώ το πλάτος τους εκφράζει την ενίσχυση από το έδαφος.

Κανονικό ρήγμα: Το ρήγμα στο οποίο το πάνω τέμαχος της κεκλιμένης ρηξιγενούς επιφάνειας κινείται προς τα κάτω, δηλαδή όταν τα δύο τεμάχη απομακρύνονται το ένα από το άλλο.

Κατηγορίες τρωτότητας κατά EMS-98: Συνδέουν ποιοτικά την σεισμική ένταση με τις υφιστάμενες βλάβες μιας κατασκευής. Συμβολίζουν ως A – την καταστροφή, B – τις πολύ βαριές βλάβες, C – τις σημαντικές έως βαριές βλάβες, D – τις μέτριες βλάβες, E – τις αμελητέες έως ελαφρές βλάβες και F – τις ελάχιστες έως καθόλου δομικές και μη δομικές βλάβες.

Κροκαλοπαγές : Ιζηματογενές πέτρωμα, προϊόν μηχανικής αποσάθρωσης.

Κύματα χώρου: Κατηγορία σεισμικών κυμάτων. Διακρίνονται στα επιμήκη και στα εγκάρσια κύματα.

μ_D : Μέσος βαθμός βλάβης: Παράμετρος που εξαρτάται από την ένταση και την τρωτότητα.

Model HVSR: Λογισμικό για τον υπολογισμό της συνάρτησης μεταφοράς της εδαφικής στήλης ως προς το βραχύδες υπόβαθρο.

M_w : Μέγεθος σεισμικής ροπής.

Μακροσεισμική Ένταση I: Ένα μέτρο αξιολόγησης της σεισμικής δόνησης βάσει των αποτελεσμάτων του σεισμού σε έναν τόπο.

Μέγεθος (M) σεισμού: Εκφράζει την ενέργεια που εκλύεται στην εστία του σεισμού υπό τη μορφή σεισμικών κυμάτων.

Μέγιστη τιμή εδαφικής επιτάχυνσης PGA (Peak Ground Accelaration): Η μέγιστη απόλυτη τιμή της επιτάχυνσης της σεισμικής κίνησης. Αποτελεί μέτρο της σεισμικής επικινδυνότητας.

Μέθοδος πεπερασμένου ρήγματος (finite fault model): Μέθοδος προσομοίωσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης με βάση τη γεωμετρία του ρήγματος και την κατανομή της ολίσθησης.

Μέθοδος σημειακής πηγής (point source model): Μέθοδος προσομοίωσης της ισχυρής εδαφικής κίνησης σύμφωνα με την οποία η ενέργεια από ένα ρήγμα κατανέμεται τυχαία σε δεδομένο χρόνο, όπου η διάρκεια σχετίζεται με το μέγεθος της πηγής (διάρρηξης) και της απόστασης της πηγής από τη θέση ενδιαφέροντος.

Μεταλπικοί σχηματισμοί: Πετρώματα του Ελλαδικού χώρου νεότερης ηλικίας από το κατώτερο Μειόκαινο.

Μη γραμμική απόκριση εδάφους: Η δυναμική συμπεριφορά του εδάφους όταν έχει υποστεί μεγάλη παραμόρφωση κατά τη διάρκεια της σεισμικής φόρτισης.

Μη κανονικό κτίριο: Το κτίριο που δεν είναι κατά προσέγγιση συμμετρικό σε κάτοψη από γεωμετρική κατάσταση και που τα οριζόντια φορτία του δεν είναι συνεχή καθ' ύψος.

Μικροζωνική μελέτη: Μελέτη που προσδιορίζει τον σεισμικό κίνδυνο μιας περιοχής λαμβάνοντας υπόψη τη σεισμικότητά της και τις τοπικές γεωλογικές και εδαφοτεχνικές συνθήκες, έχοντας ως στόχο την αποτελεσματικότερη αντισεισμική προστασία.

Μικροθόρυβος: Είναι η δόνηση του εδάφους που προκαλείται φυσικά ή τεχνητά.

Μοντέλα Τρωτότητας: Μοντέλα εκτίμησης της συμπεριφοράς των δομικών κατασκευών σε μελλοντικούς σεισμούς.

Μοντέλα σεισμικού κινδύνου: Μοντέλα εκτίμησης σεισμικών βλαβών από μελλοντικούς σεισμούς.

Μοντέλο ανελαστικής εξασθένησης: Μοντέλο προσομοίωσης της απόσβεσης της εδαφικής κίνησης.

Μοντέλο στοχαστικής προσομοίωσης (Stochastic Model SIMulation SMSIM): Αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την προσομοίωση της ισχυρής εδαφικής κίνησης.

N_{SPT} : Ο αριθμός N των κρούσεων που απαιτείται στη δοκιμή SPT για διείδυση κώνου 30 cm.

Νεογενή: Εδαφικές αποθέσεις που έχουν δημιουργηθεί κατά την νεότερη περίοδο του Τριτογενούς.

Παράγοντας ενίσχυσης (amplification factor): Ορίζεται ως το πηλίκο τιμής παραμέτρου της εδαφικής κίνησης σε έδαφος προς την αντίστοιχη τιμή σε βράχο.

Παράγοντας εξασθένησης k (near-surface attenuation coefficient): Παράμετρος της στοχαστικής μεθόδου μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος, η οποία συνδέει τη φασματική γωνιακή συχνότητα των υπορηγμάτων με τις πεπερασμένες διαστάσεις τους και την ταχύτητα των εγκαρσίων κυμάτων.

Ελέγχει τον βαθμό ακτινοβολίας των υψηλών συχνοτήτων στην προσομοίωση του χρόνου.

Παραδοσιακά κτίρια: Κτίρια κατασκευασμένα με παραδοσιακές μεθόδους, τις περισσότερες φορές με τοπικό χαρακτήρα.

Πιθανολογική μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας (Probabilistic seismic hazard analysis): Μέθοδος μελέτης σεισμικής επικινδυνότητας κατά την οποία μελετώνται τα αποτελέσματα όλων των πιθανών σεισμών που μπορεί να προκληθούν από διαφορετικές πηγές κοντά στην υπό μελέτη περιοχή για συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Πίνακες πιθανότητας βλάβης DPM (Damage Probability Matrices DPM): Εμπειρικοί πίνακες βλαβών που υπολογίζουν την πιθανότητα ένα κτίριο να υποστεί έναν καθορισμένο βαθμό βλάβης λόγω της εδαφικής κίνησης συγκεκριμένης έντασης. .

Πυλωτή: Ο ελεύθερος, ανοιχτός, ισόγειος χώρος ενός οικοδομήματος που έχει ανεγερθεί επί υποστυλωμάτων. Επηρεάζει αρνητικά την κανονικότητα του κτιρίου.

Ρευστοποίηση: Μετατροπή των κορεσμένων με νερό, μη συνεκτικών εδαφών από τη στερεή στη ρευστή φάση λόγω της απώλειας της διατμητικής αντοχής τους.

Ρήγματα (ή ρηξιγενείς ζώνες) μετασχηματισμού (transform faults or fault zones): Είναι μεγάλης κλίμακας ενεργές τεκτονικές δομές που αποτελούν όρια τεκτονικών λιθοσφαιρικών πλακών. Η κίνηση μεταξύ τους χαρακτηρίζεται από οριζόντια ολίσθηση.

Ρηξιγενείς ζώνες: Συγκεκριμένες, στενές ζώνες, στις οποίες είναι συγκεντρωμένοι οι σεισμοί.

Ρηξιγενής ζώνη της Κεφαλονιάς (Cephalonia transform fault zone, CTFZ): Ρήγμα οριζόντιας ολίσθησης που ξεκινά νότια της Κεφαλονιά και φτάνει στη βόρεια Λευκάδα. Συνδέει δυο τεκτονικές επαφές πλακών.

Σεισμική επικινδυνότητα (Seismic Hazard): Η πιθανότητα μια εδαφική παράμετρος να ξεπεράσει μια τιμή σε συγκεκριμένη θέση λόγω σεισμού για δεδομένη περίοδο επανάληψης.

Σεισμική Τρωτότητα (seismic vulnerability): Ο βαθμός της βλάβης που προκαλεί στο κτίριο κάποιο σεισμικό φορτίο.

Σεισμικό υπόβαθρο (bedrock): Δύσκαμπτο ελαστικό μέσο επί του οποίου επικάθονται μαλακές επιφανειακές αποθέσεις στην ελεύθερη επιφάνεια του οποίου αναφέρεται η σεισμική διέγερση.

Σεισμικός κίνδυνος (seismic risk): Είναι η συνέλιξη της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών και της σεισμικής επικινδυνότητας μιας περιοχής. Ο σεισμικός κίνδυνος μπορεί να εκφραστεί ως το σύνολο των πιθανών βλαβών και των κοινωνικών και οικονομικών επιπτώσεων που προκαλεί ένας σεισμός στον πληθυσμό μιας περιοχής.

Σεισμός εγγύς πεδίου: Η εδαφική κίνηση κοντά στην περιοχή διάρρηξης ενός σεισμού που μπορεί να επηρεαστεί από τα αποτελέσματα κατευθυντικότητας της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων και από τη μόνιμη μετατόπιση λόγω των τεκτονικών παραμορφώσεων.

Σενάρια βλαβών: Αναπτύσσονται για την εκτίμηση των στάθμεων βλάβης και στη μέγιστη πιθανότητα πραγματοποίησης αυτών σε πιθανό σεισμό. Μπορούν να βασιστούν στη μελέτη ανά οικοδομικό τετράγωνο ή ανά κτίριο.

Στοχαστική μέθοδος προσομοίωσης εδαφικής κίνησης: Αιτιοκρατική μέθοδος που βασίζεται στο συνδυασμό παραμετρικών εξισώσεων που περιγράφουν το φάσμα πλάτους της εδαφικής κίνησης με ένα τυχαίο φάσμα φάσης κατάλληλα τροποποιημένο έτσι ώστε η εδαφική κίνηση να κατανέμεται σε τόσο χρόνο, όσος αναμένεται από το μέγεθος του σεισμού και την απόσταση από τη θέση προσομοίωσης.

Συνάρτηση της πιθανότητας Βήτα (Probability Density Function PDF) : Εξίσωση που εκφράζει την πιθανότητα της κατανομής βήτα.

Συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα: Η σύνθεση χρονοσειρών επιτάχυνσης των αναμενόμενων εδαφικών κινήσεων με βάση αιτιοκρατικά και πιθανοκρατία μοντέλα.

Συντελεστές βαρύτητας: Η απόδοση διαφορετικής βαρύτητας σε ένα σύνολο δεδομένων για την εκτίμηση του αριθμητικού μέσου τους.

Συχνότητα ενίσχυση: Η συχνότητα στην οποία αυξάνεται το πλάτος του σήματος.

Ταχεία οπτική εκτίμηση (Rapid Visual Screening - RVS): Μέθοδος γρήγορης αξιολόγησης της τρωτότητας των υφιστάμενων κατασκευών βάσει των δομικών τους χαρακτηριστικών.

Τοπικές εδαφικές συνθήκες (site effects): Εκφράζουν την εξάρτηση της σεισμικής κίνησης από τις μηχανικές ιδιότητες του εδάφους θεμελίωσης, από το πάχος και τη δυσκαμψία του επιφανειακού στρώματος, από την κλίση των στρωμάτων, την τοπογραφία, καθώς και από την περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό.

Υβριδική Μέθοδος: Συνδυασμός εμπειρικής και αναλυτικής μεθόδου για την εκτίμηση της τρωτότητας.

Φάσμα Απόκρισης: Περιγράφει τη μέγιστη απόκριση ενός συστήματος σε μία συγκεκριμένη κίνηση συναρτήσει της ιδιοπεριόδου (ή ιδιοσυχνότητας) και της απόσβεσης που χαρακτηρίζει το σύστημα. Εκτιμά τα τελικά χαρακτηριστικά της ισχυρής κίνησης λαμβάνοντας υπόψη και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά μιας κατασκευής.

Φάσμα τύπου ω^2 : Φασματικό μοντέλο σημειακής πηγής, συνέλιξη δύο ορθογώνιων παλμών. Για μεγάλες συχνότητες το φάσμα ελαττώνεται αντιστρόφως ανάλογα της γωνιακής συχνότητας ω^2 .

Φάσματα σχεδιασμού: Ο λόγος της φασματικής επιτάχυνσης (φάσμα απόκρισης) προς την επιτάχυνση του εδάφους.

Φασματική επιτάχυνση S_a ή SA (Spectral Acceleration): Δίνεται από το φάσμα απόκρισης των απόλυτων επιταχύνσεων.

Φασματικός Λόγος των Οριζόντιων προς την Κατακόρυφη συνιστώσα του εδαφικού θορύβου (Horizontal to Vertical Spectral Ratio – HVSR):

Τεχνική για την εκτίμηση της απόκρισης των γεωλογικών σχηματισμών πάνω από τους οποίους έχουν γίνει οι μετρήσεις μικροθορύβου.

Φέρων οργανισμός: Το τμήμα του κτιρίου που μεταφέρει άμεσα ή έμμεσα στο έδαφος τα μόνιμα και ωφέλιμα φορτία του, καθώς και τις επιρροές των δυνάμεων που επενεργούν σε αυτό κατά την σεισμική δόνηση. Αποτελείται από τις πλάκες, τις κολώνες και τα δοκάρια, ενώ τα υπόλοιπα τμήματα που εξυπηρετούν τον προορισμό του κτιρίου, θεωρούνται κατασκευές συμπλήρωσης.

Φλύσξης: Λιθολογικός σχηματισμός, αποθέσεις διαφόρων πετρωμάτων.

Χαλαρό εδαφικό στρώμα Rigolith: Εδαφικός σχηματισμός η ύπαρξη του οποίου ενισχύει ή απομειώνει τη σεισμική κίνηση.

Χάρτες σεισμικού κινδύνου (Seismic risk maps): Η χωρική απεικόνιση των βαθμών βλάβης που προβλέπει ένα σεισμικό σενάριο. Χρησιμοποιείται εδώ για να οριστεί ο πιθανότερος βαθμός βλάβης μιας κατασκευής.

Πίνακας Συντμήσεων Αρκτικόλεξων

ΕΑΚ: Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός

ΕΛΣΤΑΤ: Ελληνική Στατιστική Αρχή

ΙΤΣΑΚ: Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών

ΟΑΣΠ: Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας

ΤΑΣ: Τομέας Αποκατάστασης Σεισμοπλήκτων

Κ.Ε.Δ.Ε.: Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων

EMS: European Makroseismic Scale

Ε.Π.ΑΝΤ.Υ.Κ.: Εθνικό Πρόγραμμα Αντισεισμικής (Ενίσχυσης) Υφιστάμενων Κατασκευών

Ε.Σ.Υ.Ε.: Εθνική Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδος

EMS: European Makroseismic Scale

D.P.M: Damage Probabilistic Matrix

P.S.I.: Parameterless Scale of Intensity

RVS: Rapid Visual Screening

V.C: Vulnerability class

V. I: Vulnerability Index

Βιβλιογραφία

Algermissen, S.T., Perkins, D.H., Isherwood, W., Gordon, D., Reagot, G. and Howard, C., 1976. *Seismic risk evaluation of the Balkan region. Proc. of the Seminar on Seismic Zoning Maps*, UNESCO, Skopje, 1975, October 27-November 4, Vol. 2. pp. 173-240.

Ambraseys, N., 1997. *Measurement of strong ground motion in Europe (MASGE)*. In: Ghazi A, Yeroianni M, editors. *Seismic Risk in the European Union. Proceedings of the review meetings in Brussels 2–3 and 23–24 May 1996*, ECSC-EC-EAEC Brussels, Luxembourg, vol.1.;. p. 195–217.

Ambraseys, N., 2009. *Earthquakes in the eastern Mediterranean and the Middle East: a multidisciplinary study of 2000 years of seismicity*, Cambridge University Press, ISBN 9780521872928, 947pp

Anagnostopoulos, S.A., 1994. *Post-earthquake emergency assessment of building safety, field manual*. European Commission Directorate General XI, Civil Protection, Patras.

Anastasiadis, A., Raptakis, D. and Pitilakis, K., 2001. *Thessaloniki's Detailed Microzoning: Subsurface Structure as Basis for Site Response Analysis*, PAGEOPH, (158):2597-2633.

Anderson, J.G., and Hough, S.E., 1984. *A model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies*, BSSA, 74:1969-1993

Anderson, J.G. and Luco, J.E., 1983. *Consequence of Slip Rate Constraints on Earthquake Occurrence Relations*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, pp. 471-496.

Andrews, D. J., 1986. *Objective determination of source parameters and similarity of earthquakes of different size*, Earthquake Source Mechanics, S. Das, J. Boatwright and C. H. Scholz (Editors), American Geophysical Monograph, 37, 259–267

Andrus, R., Stoke II, K., Chung, R. and Juang, 2003. *Guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and*

simplified procedures, Technical report NIST GCR 03-854, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.

Ansal, A., Şengezer, B. S., İyisan, R. AND Gençoğlu, S., 1993. *The Damage Distribution in March 13, 1992 Earthquake and Effects of Geotechnical Factors, Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering*, Ed. P. Seceş and Pinto, Balkema, Rotterdam, pp. 413-434

Apostolidis, P., 2002. *Determination of the sub-soil structure using microtremors. Application to the estimation of dynamic properties and geometry of the soil formations at Thessaloniki city*, PhD, Aristotle University of Thessaloniki, 300 p. (in Greek with an English abstract)

Aranda, P., 2000. *Indice Cualitativo de Vulnerabilidad Sísmica Aplicada a Edificios en Concepción*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Concepción (Chile): Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción.

Argyros, P., 2000. *Lefkada town historical site, preservation and emergence of buildings of the British Empire*. The World of Buildings 22, pp 208 (in Greek)

Argyrou, K., Leukesilou, F., Philippa, M., 1971. *The Architecture of Lefkada*. Etairia Lefkadikon Meleton, Athens (In Greek), Vol A, pp. 175-279

Armijo R, Lyon-Caen H, Papanastassiou D (1992) *East-west extension and Holocene normal fault scarps in the Hellenic arc*, Geology 20:491–494

ATC-13 (1985) *Earthquake damage evaluation data for California*. Applied Technology Council Report, Redwood City, California

ATC 14, 1987. Applied Technology Council, *Evaluating the seismic resistance of existing buildings*. ATC-14, Redwood City, California.

ATC 21, 1988. *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazard - A Handbook*. Applied Technology Council, Redwood City, California,

ATC 40, 1996. Applied Technology Council, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. ATC-40, Redwood City, California.

Athanasopoulos, G.A., 1993. *Empirical Correlations V_s - NSPT and G_o - NSPT from Test Results on Soils of Greece*, Technika Chronika, Scientific Journal of

the Technical Chamber of Greece, Section A, vol. 14, No 1, pp. 7-31, (in Greek).

Atkinson, N., 2009. *Earthquake Time Histories Compatible with the 2005 NBCC Uniform Hazard Spectrum*, Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 36(6): 991-1000, 10.1139/L09-044

Barbat A.H., Carreno, M. L., Pujades, L.G., Lantada, N., Cardona, O., Manulanda, M.C., 2010. *Seismic vulnerability and risk evaluation methods for urban areas. A review with application to pilot area*. Structure and infrastructure Engineering 6 (1-2),17-38.

Barbat, A.H., Yépez Moya, F. and Canas, J.A.,1996. *Damage Scenarios Simulation for Seismic Risk Assessment in Urban Zones*, Earthquake Spectra, Vol. 12, No. 3, pp. 371-394.

Baskoutas, I., 1996. *Dependence of coda attenuation on frequency and lapse time in central Greece* Dependence of coda attenuation on frequency and lapse time in central Greece pure and applied geophysics, Volume 147, Issue 3, pp 483-496.

Benedetti D., Petrini V.,1984. *On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure*. The industry of constructions 1984, Vol. 18, pp: 66-78.

Benetatos, C. and Kiratzi, A., 2004. *Stochastic strong ground motion simulation of intermediate depth earthquakes: the cases of the 30 May 1990 Vrancea (Romania) and of the 22 January 2002 Karpathos island (Greece) earthquakes*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24:1-9

Benetatos, C., Dreger, D. and Kiratzi, A., 2007. *Complex and Segmented Rupture Associated with the 14 August 2003 Mw 6.2 Lefkas, Ionian Islands, Earthquake*, B.S.S.A., Vol. 97, No. 1B:35–51

Benetatos, C., Kiratzi, A., Roumelioti, Z., Stavrakakis, G., Drakatos, G., Latoussakis, I., 2005. *The 14 August 2003 Lefkada Island (Greece) earthquake: focal mechanisms of the mainshock and of the aftershock sequence*. Journal of Seismology v.9, pp.:171–190

Beresnev, I.A., Atkinson, G.M., 1997. *Modelling finite-fault radiation from the ω^n spectrum*, Bulletin of the Seismological Society of America, v.87,pp. 67–84.

Beresnev, I.A., Atkinson, G.M., 1998. *FINSIM - a FORTRAN program for simulating stochastic acceleration time history from finite faults*, Seismological Research Letters 69, 27-32

Beresnev, I., and Atkinson, G.,1999. *Generic finite-fault model for ground motion prediction for eastern North America*, Bulletin of the Seismological Society of America, v89, pp.608-625

Bernardini, A., 1999. *Seismic Damage to masonry Buildings*, Proc. of the workshop of seismic Damage to masonry Buildings, Balkema, Rotterdam,

Bonilla, M.G. and Buchanon, J.M., 1970. *Interim Report on World-Wide Historic Surface Faulting*, Open-File Report 70-34, U.S. Geological Survey.

Bonilla, M.G., Markad, R.K. and Lienkaemper, J..J.,. 1984. *Statistical Relations among Earthquake Magnitude, Surface Rupture Length, and Surface Rupture Displacement*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 74, pp. 2379-2411.

Bonnefoy-Claudet, S., Cornou, C., Bard, P.Y., Cotton, F., Moczo, P., Kristek, J. and Fah, D., 2006. *H/V ratio: A tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations*, Geophys. J. Int., 167: 827–837

Boore, D.M., 1983. *Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiated Spectra*, Bulletin of the Seismological Society of America, 73:1865–1894

Boore, D.M., 2003. *Prediction of ground motion using the stochastic method*, Pure Appl. Geophys., 160:635–676

Boore, D.M., 2005. *SMSIM—Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 2.3, A revision of OFR 96-80-A*, U.S. Geol. Surv. Open-File Report. 00-509, 55 pp

Boore, D.M. and Atkinson, B.M., 1987. *Stochastic Prediction of Ground Motion and Spectral Response at Hard-Rock Sites in Eastern North America*, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 77,pp. 440-467.

Borcherdt, R., 1970. *Effects of local geology on ground motion near San Francisco bay*, Bulletin of the Seismological Society of America, 60:29-61.

Borcherdt, R., 1994. *Estimates of site dependent response spectra for design (methodology and justification)*, Earthquake Spectra, 10(4): 617-653.

Borcherdt, R. D., Gibbs, J.F., 1976. *Effects of local geologic conditions in the San Francisco Bay region on ground motions and intensities of the 1906 earthquake*, Bulletin of the Seismological Society of America 66, 467–500.

Bornovas, J. and Rontiyanni-Tsiambaou, T., 1983. *Geological map of Greece*, (scale 1:500.000), Institute of Geology and Mineral Exploration (IGME).

Bouckovalas, G., Papadimitriou, A., 2003. *Multi-variable relations for soil effects on seismic ground motion*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 32: 1867-1896.

Bouckovalas, G., Papadimitriou, A., Karamitros, D., 2006. *Compatibility of EC-8 ground types and site effects with 1D seismic wave propagation theory*, 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid, 24 - 27 September, 227-232.

Bouckovalas, G., Anagnostopoulos, A., Kapenis, A., Karantoni T., 1996. *Analysis of Soil Effects and Distribution of Damage from Pyrgos 1993 (Greece) Earthquake*, Geotechnical & Geological Engineering, Vol. 14, pp. 111-128

Braga, F., Dolce, M. and Liberatore, D., 1982. Southern Italy November 23 1980 Earthquake. *A statistical study of damage buildings and an Ensuing Review of the MSK-76 Scale*. Proc. 7th European Conference on Earthquake Engineering Athens, publication CNR-PFG n.503, Rome.

Brune, J.N., 1970. *Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes*. J Geophys Res 75, 4997–5009.

Brune J.N., 1971. *Correction to Tectonic Stress and the Spectra of Seismic Shear Waves from Earthquakes*. Journal of Geophysical Research, 76; 5002

Burton P.W., Xu Y., Tselentis G.-A., Sokos E. & Aspinall W., (2003a), *Strong Ground acceleration seismic hazard in Greece and neighboring regions*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 23, 159-181

Calais, E., Freed, A., Mattioli, G., Amelung, F., Jonsson, S., Jansma, P., Hong, S.H., Dixon, T., Prepetit, C. and Moplaisir, R., 2010. *Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haiti earthquake*, Nature Geoscience, 3:794-799

Calvi, G.M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J., Restrepo-Velez, L.F., Crowley, H., 2006. *Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years*. Indian Society Journal of Earthquake Technology, 43(3):75–104.

Carreño, M.L., Cardona, O.D., Barbat, A.H., 2007a. *Urban seismic risk evaluation: a holistic approach*. Nat Hazards 40(1):137–172

CEN (Comité Européen de Normalisation), 2001, prEN 1998-1 – Eurocode 8: *Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General rules, seismic actions and crustal deformation in the central and north Ionian Sea, Greece: 3-yr results from NOANET continuous network data*, J. Geodyn., 67, 62-71

Chouliaras, G., Chousianitis, K., Drakatos, G., Makropoulos, K., 2013. *Recent seismicity and deformation patterns in the Ionian Sea region*, EGU General Assembly Conference Abstracts, 2013, 15, 12679.

Clement, C., Hirn, A., Chavris, P., Sachpari, M., Marnelis, F., 2000. *Seismic structure and Hellenic subduction in the Ionian Islands*, Tectonophysics, Vol.329, pp.141-156.

Coburn A., Spence R., 2006. *Earthquake Protection*, Second Edition. Print ISBN: 9780471496144. Online ISBN: 9780470855188. DOI: 10.1002/0470855185

Colombi, M., Crempien, J., Crowley, H., Erduran, E., Liu, H., Lopez, M., Mayfield, M., Milanesi, M., 2010. *Evaluation of seismic risk software for GEM*, GEM Technical Report 9. GEM Foundation, Pavia, Italy.

Comninakis, P.E.. 1975. *A contribution to the investigation of the seismicity of the area of Greece*. PhD. Thesis, Athens University, 110 pp.

Cornell, C. A., 1968. Engineering Seismic Risk Analysis, Bull. Seism.Soc. Am. 58, 1503–1606.

Corsanego, A. and Petrini, V., 1990. *Seismic Vulnerability of Buildings – Work in Progress*, Proceedings of the Workshop II on Seismic Risk Vulnerability and Risk Assessment, Trieste, Italy, pp. 577-598

Cushing, E. 1985. *Evolution structurale de la marge Nord Ouest Hellénique dans l'île de Levkas et ses environs (Grèce Nord occidentale)*. Thèse 3ème Cycle, Univ. Paris Sud, Orsay, 297 pp.

Danciu, L., Sokos E., and Tselentis, G., 2008. *Probabilistic Seismic Hazard Assessment in terms of engineering parameters in Greece*, http://seismo.geology.upatras.gr/pdf/25_ISSRR2007.pdf

Dandoulaki, M., Panoutsopoulou, M., Ioannides, K., 1998. *An overview of post-earthquake building inspection practices in Greece and the introduction of a rapid building usability evaluation procedure after the 1996 Konitsa earthquake*. In: Proceedings of the eleventh European conference on earthquake engineering, Paris.

D'Ayala, D., Spence, R., Oliveira, C., EERI, M., Pomonis, A., 1997. *Earthquake Loss Estimation for Europe's Historic Town Centres*, Earthquake Spectra, 73, No. 4:773-793

Delgado, J., Lopez Casado, C., Giner, J., Estevez, A., Cuenca, A., Molina, S., 2000. *Microtremors as a geophysical exploration tool: application and limitations*, Pure Appl Geophys, 158: 2525–2541

Dercourt, J., Zonenshain, L.P., Ricou, L.E., Le Pichon, X., Knipper, A.L., Grandjaquet C., Sbertshikov, I.M., Geussant, J., Lepvrier, C., Pechersku, D.H., Boulin, J., Bazhenov, M.L., Lauer, J.P., Biju-Duval, B., 1986. *Geological Evolution of the Tethys Belt From the Atlantic to the Pamirs Since the Lias*, Tectonophysics 123, 241–315

Diagourtas, D., Tzanis, A. and Makropoulos, K. 2001. *Comparative study of microtremors analysis methods*, Pure Apply Geophys, 158:2463–2479

Dimitriou, P., Anastasiadis, A., Dimosthenous, M., Theodoulidis, N., Karakostas, C., Klimis, N., Lekidis, V., Triantafyllos, M., Makra, K., Margaritis, V., Papaioannou, C., Savaidis, A., Salonikios, T., Sous, I., 2008. *The Lefkada Earthquake on 14th August 2003 (Mw=6.2). Response of the Structures and*

the Effects on Lefkada Island, 3rd Panhellenic Congress of Seismic Engineering and Technical Seismology, 5-7 Nov. 2008, Paper No. 2000

Dogangun, A., Tuluk, I., Livaoglu, R., Acar, R., 2006. *Traditional wooden buildings and their damages during earthquakes in Turkey*, Engineering Failure Analysis, 13:981–996

Dolce, M., 1996. *Seismic Vulnerability Evaluation and Damage Scenarios, US – Italian Workshop Seismic Evaluation and Retrofit*. Columbia University, New York City

Dolce M, Masi A, Marino M, Nova M (2003) *Earthquake Damage Scenarios of the Building Stock of Potenza (S.Italy) Including Site-effects*. Bulletin of Earthquake Engineering 1:115–14.

Dolce, M., Speranza, E., Dalla Negra, R., Zuppiroli, M., Bocchi, F., 2013. *Constructive features and seismic vulnerability of historic centres through the rapid assessment of historic building stocks. The experience of Ferrara, Italy* Proceedings of the International Conference: Built Heritage 2013; Monitoring Conservation Management, 18-20 November, 2013, Milan, Italy, p. 837-844.

Douglas, J., 2001. *A Comprehensive Worldwide Summary of Strong-Motion Attenuation Relationships for Peak Ground Acceleration and Spectral Ordinates (1969 to 2000)*, ESEE Report 01-1, Civil Engineering Dept., Imperial Collegof Science, Technology and Medicine, London, U.K

Drakopoulos, J.K. and Makropoulos, K.C., 1983. *Seismicity and Hazard analysis studies in the area of Greece*, Technical Report, 1-83, Seismol. Lab., Athens University, pp.184.

Dravinski, M., Trifunac, M.D. and Westermo, B.D. (1980). *Ratios of Uniform Risk Spectrum Amplitudes for Different Probabilities of Exceedance and for Shallow, Random Seismicity Surrounding the Site*, Report CE 80-02, Dept. of Civil Eng., Univ. of Southern California, Los Angeles, California, U.S.A.

Drouet, S., Triantafyllidis, P., Savvaidis, A., Theodoulidis, N., 2008. *Comparison of Site-Effects Estimation Methods Using the Lefkas, Greece, 2003 Earthquake Aftershocks*, Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 98, no. 5, 2349-2363.

Dubois, D., Prade, H., 1980. *Fuzzy set and systems, theory and applications*. Academic Press.

EAK., 2003. *Greek Seismic Code, edited by: Earthquake Planning & Protection Organization*, Athens, Greece, 72 pp., 7appendixes, 2003 (in Greek)

Earthquake Engineering Research Institute (EERI), 2003. *Learning from Earthquakes: Preliminary Observations on the August 14, 2003, Lefkas Island (W. Greece) Earthquake*, Oakland, USA

Eleftheriadou, A.K., Karabinis, A.I., 2008. *Damage probability matrices derived from earthquake statistical data*. In: Proc. 14th World Conf. Earthquake Eng., Beijing, China, 10 pp.

ENV 1998-1-3, CEN Comité Européen de Normalisation, Brüssel, 1995.

Epstein, B. and Lomnitz, C. (1966). *A Model for Occurrence of Large Earthquakes*, Nature, Vol. 211, pp. 954-956.

Esteva, 1970. Seismic risk and seismic design. In R.J. Hansen, editor, *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, pages 142–182. The M.I.T. Press.

Eurocode 8: Design provisions for earthquake resistance of structures.

Faccioli, E., Pessina, V., Calvi, G.M., Borzi, B., 1999. *A study on damage scenarios for residential buildings in Catania city*. Journal of Seismology, Volume 3, Issue 3, pp 327-343

Fäh, D., Kind, F. and Giardini, D., 2003. *Inversion of local S-wave velocity structures from average H/V ratios, and their use for the estimation of site effects*, Journal of Seismology, 7:449–467

Federal Emergency Management (FEMA), *National Institute of Building Science (NIBS)*, 2003. *Development of a standardized earthquake loss estimation methodology*, Washington, DC

FEMA 178, NEHRP, 1992. *Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA178, Washington..

FEMA 273, NEHRP, 1997. *Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buidings*. FEMA 273, Washington.

FEMA 310, NEHRP, 1998. *Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings – a Prestandard*. FEMA 310, Washington.

Ferreira, T.M., Vicente, R., Mendes da Silva, J.A.R., Varum, H., Costa, A., 2013. *Seismic vulnerability assessment of historical urban centres: case study of the old city centre in Seixal, Portugal*, Bulletin of Earthquake Engineering, Volume 11, Issue 5, pp 1753-1773

Ferrigini, F., Helly, B. and Rideaud, A., 1993. *ATLAS of local seismic cultures (supplement in Stop Disasters)*, The United Nations International Decade for natural Disasters Reductin Newsletter, Vol.12, (March-April)

Field, H. and Jacob K. H., 1995. *A comparison and test of various siteresponseestimation techniques, including three that are not referencesite dependent*, Bull. Seismol. Soc. Am 85, no. 4, 1127–1143.

Galanopoulos, A.G., 1968. *One quantitative determination of earthquake risk*. Ann. Geofis., 21: 193-206.

Gazetas, G., 2004. *Geotechnical aspects of the Ms 6.4 Lefkada Island, Greece, 2003 earthquake: preliminary assessment*. In: Proc. of the 5th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, 13–17 April 2004, New York, paper no. 13

Gazetas, G., Dakoulas, P., Papageorgiou, A., 1990. *Local-soil and source-mechanism effects in the 1986 kalamata (Greece) earthquake*, Earthquake Engineering & Structural Dynamics Vol19, Issue 3, pages 431–456, 1990

Gent Franch, K.A, Gian, M., Giuliano Marbelli, G. M., Astroza Inostroza, M.A., Gorid, R.E., 2008. *A seismic vulnerability index for confined masonry shear wall buildings and a relationship with the damage*.

Giovinazzi, S., Lagomarsino, S., 2004. *A macroseismic model for the vulnerability assessment of buildings*. In: Proc. 13th world conference on earthquake engineering. Vancouver, Canada, paper 896 (CD-Rom)

Global Earthquake Model (GEM): www.globalquakemodel.org

Goda, K., Pomonis, A., Chen Chian, S., Offord, M., Saito, K., Sammonds, P., Fraser, S., Raby, A., Macabuag, J., 2013. *Ground motion characteristics and shaking damage of the 11th March 2011 Mw9.0 Great East Japan earthquake*.

Bull Earthquake Eng (2013) 11:141–170 DOI 10.1007/s10518-012-9371-x ORIGINAL RESEARCH PAPER

Grünthal, G., (ed.) 1998. “*Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie: Vol. 15, European Macroseismic Scale 1998*”, Europ. Center for Geodyn. and Seism., Luxembourg.

Gülkan, P. and Langenbach, R., 2004. *The earthquake resistance of traditional timber and masonry dwellings in Turkey*, 13th World Conference in Earthquake Engineering (WCEE), Vancouver, Canada, Paper No 2297.

Gumbel, E. J., 1958. *Statistics of extremes*: Columbia University Press, New York.

Gupta, I.D., 2002. *Should Normalised Spectral Shapes be Used for Estimating Site-Specific Design Ground Motion?*, Proc. 12th Symp. on Earthq. Eng., Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee, Vol. I, pp. 168-175.

Gupta, I.D. and Deshpande, V.C. (1994). *Application of Log-Pearson Type-3 Distribution for Evaluation of Design Earthquake Magnitude*, Jour. Inst. Engineers (India), Civil Div., Vol. 75, pp.129-134.

Gupta, I.D. and Rambabu, V. (1996). *Simulation of Design Response Spectra of Strong-Motion Acceleration in Koyna Dam Region Using Seismological Source Model Approach*, Bull. Ind. Soc. Earthq. Tech., Vol. 33, No. 2, pp. 181-193.

Gupta, I.D. and Trifunac, M.D. (1988). *Attenuation of Intensity with Epicentral Distances in India*, Soil Dyn. Earthq. Eng., Vol. 7, pp. 162-169.

Gutenberg, B., and Richter, C. F., 1944, *Frequency of earthquakes in California*: Bull. Seism. Soc. America, v. 34, p.185-188.66.

Haddon, R.A.W., 1996. *Earthquake source spectra in Eastern North America* BSSA, 86:1300-1313.

Hadley, D.M. and Helmberger, D.V. (1980). *Simulation of Strong Ground Motions*, Bull. Seism.Soc. Am., Vol. 70, pp. 610-617.

Hanks, T.C., 1979. *b Values and ω - γ Seismic Source Models: Implications for Tectonic Stress Variations along Active Crustal Fault Zones and the estimation of High-frequency Strong Ground Motion*, J. Geophys. Res., 84:22.

Hartzell, S., 1978. *Earthquake aftershocks as Green's functions*. Geophys Res Lett, 5, 1–4.

Hartzell, S.H., 1982. *Simulation of Ground Acceleration for May 1980 Mammoth Lakes, California Earthquakes*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 72, pp. 2381-2387.

Haslinger, H., Kissling, E., Ansorge, J., Hatzfeld, D., Papadimitriou, E., Karakostas, V., Makropoulos, K., Kahle, H.-G., and Peter, Y., 1999. *3D Crustal Structure from Local Earthquake Tomography Around the Gulf of Arta (Ionian region, NW Greece)*. Tectonophysics, 304, 201-218.

Hatzfeld, D., Kassaras, I., Panagiotopoulos, D.G., Amorese, D., Makropoulos, K., Karakaisis, G.F., Coutant, O., 1995. *Microseismicity and strain pattern in NW Greece*. Tectonics 14:773–785

Hatzidimitriou, P.M., 1993. *Attenuation of coda waves in northern Greece*, Pageoph 140, 63-78.

HAZUS, 1999. *Earthquake Loss Estimation Methodology – Technical and User Manuals*. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.

Herak, M., 2008. *ModelHVSR—A Matlab® tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise*, Computer & Geosciences, 34:1514-1526

Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Kuk, K., Kuk, V., Maric, K., Markušić, S., Stipocevic, J., 2009. *HVSR of ambient noise in Ston (Croatia): comparison with theoretical spectra and with the damage distribution after the 1996 Ston-Slano earthquake*, Bull Earthquake Eng, DOI 10.1007/s10518-009-9121-x

Hunter, J.A and Crow, H.L.(Editors), 2012. *Shear Wave Velocity Measurement Guidelines for Canadian Seismic Site Characterization in Soil and Rock*, Open File 7078, 227p., doi:10.4095/291753

Iida, K., 1965. *Earthquake Magnitude, Earthquake Fault, and Source Dimensions*, Jour. Earthq. Sci., Nagoya Univ., Vol. 13, pp. 115-132.

Institute of Technical Seismology and Antiseismic Structures (ITSAK) 2004. *The Earthquake of Lefkada (M=6.2), 14 August 2003* Technical Chamber of Greece. Athens

International Building Code (IBC) 2000. International code Council.

ISSMGE, 1999. *Manual for zonation on seismic geotechnical hazards. The Japanese Geotechnical Study*, ISSMGE.

Joyner, W. B. and D. M. Boore, 1988. *Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion, in Proc. Earthquake Eng. Soil Dyn. II, GTDiv/ASCE, Park City, Utah, 1988, 43-102.*

Kalantoni, D., Pomonis, A., Kassaras, I., Kouskouna, V., Pavlou, K., Vassilopoulou, S., Karababa, F. and Makropoulos, K. 2013. *Vulnerability assessment in Lefkas old town (W. Greece) with the use of EMS-98; comparison with the 14-8-2003, Mw=6.2, earthquake effects. First results, Proc. of Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013), Vienna, Paper No. 356. 28–30 Aug 2013*

Kappos, A., Panagopoulos, G., Panagiotopoulos, Ch., Penelis, G., 2006. *A hybrid method for the vulnerability assessment of R/C and URM buildings*. Bull. Earthquake Eng. 4:391-413

Kappos, A., Panagopoulos, G., Penelis, G., 2008. *Development of a seismic damage and loss scenario for contemporary and historical buildings in Thessaloniki, Greece* Soil Dynamics and Earthquake Engineering volume 28, Issues 10–11, October–November 2008, Pages 836–850

Kappos, A., Stylianidis, K., Pitilakis, K., 1998. *Development of seismic risk scenarios based on a hybrid method of vulnerability assessment*. Nat. Hazards 17:177-192

Karababa, F. and Pomonis, A. 2011. *Damage data analysis and vulnerability estimation following the August 14, 2003 Lefkas Island, Greece, Earthquake*, Bull Earthquake Eng, 9: 1015–1046

Karababa, F.S., 2007. *Local seismic construction practices as a means to vulnerability reduction and sustainable development. The case-study of Lefkada Island, Greece*, PhD, Cambridge University

Karakostas, C., Lekidis, Makarios, T., V., Salonikios, T., Issam, S., Demosthenous, M., 2005. *Seismic Response of Structures and Infrastructure Facilities During the Lefkada, Greece Earthquake of 14/8/2003*, Engineering Structures 27 213-227 <https://www.researchgate.net/publication/203214036>

Karakostas, V., Papadimitriou, E., 2010. *Fault complexity associated with the 14 August 2003 Mw6.2 Lefkada, Greece, aftershock sequence*. Acta Geophysica, 58, 5, 838-854. doi: 10.2478/s11600-010-0009-6

Karakostas, V.G., Papadimitriou, E.E., Papazachos, C.B., 2004. *Properties of the 2003 Lefkas, Ionian Islands, Earthquake Seismic Sequence and Seismicity Triggering*, B.S.S.A., 94:1976–1981

Kassaras, I. and Sotirhos J., 2015. *Short Notes on the Seismic Vulnerability of Greece under Austerity*, Austin J Earth Sci., 2(1), 1007.

Kassaras, I., Kalantoni, D., Pomonis, A., Kouskouna, V., Karababa, F., Makropoulos, K. 2014a. *Development of seismic damage scenarios in Lefkas old town (W. Greece). Part I: Vulnerability assessment of local constructions with the use of EMS-98*. Bull Earthq Eng. doi:10.1007/s10518-014-9643-8

Kassaras, I., Karakostas, A., Vlachou, K., Kapetanidis, V., Kaviris, G., Papadimitriou, P., Voulgaris, N., Makropoulos, K., 2013. *On the geodynamics of western Greece deduced by massive seismological observations*, AHS/IAPSO/IASPEI Joint Assembly, Gothenburg, Sweden, 22-26 July 2013

Kassaras, I., Karakostas, A., Vlachou, K., Kapetanidis, V., Kaviris, G., Papadimitriou, P., Voulgaris, N., Lagios, E., Makropoulos, K., 2012. *Study of the Geodynamics in Aitolioakarnania (W. Greece) based on joint Seismological and GPS Data*, Book of Abstracts, 33 ESC General Assembly, Moscow, pp 164–165

Kassaras, I., Makropoulos, K.C., Papadimitriou, P., Drakopoulos, J., Amorese, D., Hatzfeld, D., Coutant, O., Panagiotopoulos, D., Karakaisis, G. and

Scordilis, M., 1993. *Seismotectonic analysis in Kefallinia-Lefkas (Greece)*. 2nd International Geophysics Congress, Florina, Greece, v1, 427-438.

Kassarar, I., Voulgaris, N. and Makropoulos, K., 2008. *Determination of Site Response in Lefkas Town (W. Greece) by Ambient Vibration Measurements*, Proceedings of the 31st General Assembly of the European Seismological Commission ESC, Hersonissos, Crete, Greece, 7-12 September 2008, 198-205

Kijko, A. and Graham, G. (1998). *Parametric-Historic Procedure for Probabilistic Seismic Hazard Analysis, Part I: Estimation of Maximum Regional Magnitude max M*, Pure and Applied Geophysics, Vol. 152, pp. 413-442.

Kijko, A. and Sellevoll, M.A. (1989). *Estimation of Earthquake Hazard Parameters from Incomplete Data Files, Part I: Utilization of Extreme and Complete Catalogues with Different Threshold Magnitudes*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 79, pp. 645-654.

Kiranbala Devi and Nganthoi Naorem, 2015. *Seismic Vulnerability Assessment of Existing Buildings: It's Importance*, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)ISSN: 2278-3075, Volume-4 Issue-9.

Köhler, A., Ohrnberger, M., Scherbaum, F., Stange, S. and Kind, F., 2004. *Ambient vibration measurements in the southern Rhine Graben close to Basle*, Annals of Geophysics, 47, 6:1771-1781

Konno, K. and Ohmachi, T., 1998 *Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor*, Bull. Seismol. Soc. Am., 88, 1:228–41

Koukis, G., Rontoyanni, T., Delibasis, N., 1990. *Surface seismic strike slip fault motion related to the 1980 Akarnania earthquakes of small magnitude*, Annales Tectonicae, Vol. IV, No 1, pp.45-53.

Kouris, L. and Kappos, A. 2013. *Derivation of fragility curves for traditional timber framed masonry buildings using nonlinear statistic analysis*. 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural

Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, V. Papadopoulos, V. Plevris (eds.)Kos Island, Greece, 12–14 June 2013

Kouskouna, V. and Kaviris, G., 2014. *Seismic Hazard Study in Messinia (SW Peloponnese) Area*, Full Paper, 2nd ECEES, Istanbul, Turkey.

Kouskouna, V., Malakatas, N., 2000. *Correlation between EMS98 with damage reported of the earthquake of 7th September 1999*. Annales Géologiques des Pays Helléniques, XXXVIII XXXVIII, fasc. B:187-196

Kouskouna, V. and Makropoulos, K., 2004. *Historical Earthquake Investigations in Greece*. Ann. of Geophysics, 47, N. 2/3, p. 723-731.

Kouskouna, V., Makropoulos, K.C. and Tsiknakis, K., 1993. *Contribution of historical information to a realistic seismicity and hazard assessment of an area - the Ionian earthquakes of 1767 and 1769, Part I: Historical investigation*. Special volume on Historical Seismicity of Europe, Milan, pp.17, 195-206.

Koutrakis S.I., Karakaisis G.F. & Margaritis V.N., (2002), *Seismic hazard in Greece based on different strong motion parameters*, Journal of Earthquake Engineering, 6, 75-109.

Krinitzski, E.L., 1995. *Deterministic versus Probabilistic Seismic Hazard Analysis for critical Structures*, Int. Jour.Eng. Geol., Vol.40,pp.1-7

Lachet, C., Hatzfeld, D., Bard, P.Y., Theodoulidis, N., Papaioannou, Ch., Savvaidis, A., 1996. *Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece): comparison of different approaches*. Bull Seismol Soc Am 86(6):1692–1703

Langenbach ,R., 2000. Keynote address : *Intuition from the past: what we can learn from the traditional construction in seismic areas*, Proceedings of the UNESCO-ICOMOS International conferences on the seismic performance of traditional buildings, 16-18 November, Istanbul Turkey.

Langenbach, R., 2010. *Earthquake Resistant Traditional Construction' is Not an Oxymoron : The Resilience of Timber and Masonry Structures in the Himalayan Region and Beyond, and its Relevance to Heritage Preservation in Bhutan*. The Royal Government of Bhutan, International Conference on Disaster Management and Cultural Heritage 12-14 December, Butan

Lantada, N., Pujades, L.G., Barbat, A.H., 2004. *Risk Scenarios for Barcelona, Spain*. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 423

Lantada, N., Pujades, L., Barbat, A., 2008. *Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation*. A comparison. Natural Hazard, 51:501.

Lantada, N., Irritari, J., Barbat, A.H., Goula, X., Roca, A., Susagna T., Pujades L.G., 2010. *Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the risk-UE vulnerability index method*, Bulletin of Earthquake Engineering 8 (1), 01-229.

Le Pichon, X. and Angelier, J., 1979. *The Hellenic Arc and Trench System: A Key to the Neotectonic Evolution of the Eastern Mediterranean Area*, Tectonophysics, 60, 1-42

Lee, V.W. (1990). *“Scaling PSV Spectra in Terms of Site Intensity, and Both Local Soil and Geological Site Classifications”*, European Earthq. Eng., Vol. IV, No. 1, pp. 3-12.

Lee, V.W. (1992). *On Strong Motion Uniform Risk Functionals Computed from General Probability Distributions of Earthquake Recurrences*, Soil Dyn. Earthq. Eng., Vol. 11, pp. 357-367.

Lekkas, E., Danamos, G., Lozios, S. 2001. *Neotectonic structure and evolution of Lefkada Island*. Bulletin of Geological Society of Greece 34(1), 157-163.

Lermo, L. and Chavez- Garcia, F., 1993. *Site effects evaluation using spectral ratios with only one station*. Bulletin of Seismological Society of America, 83(5):1574-1594.

Lotzeticidis, K. D., Anastasiadis, A. and Raptakis, D., 1992. *Relations for correlation between VS – NSPT for soils in Greece*, Proc. of the 2nd Pan-Hellenic Congress of Geotechnical Engineering, Patra: 419-425

Louvari, E., Kiratzi, A., Papazachos, B., 1999. *The Cephalonia Transform Fault and its extension to western Lefkas Island (Greece)*, Tectonophysics, 308, 223–236

Makarios, T., Demosthenous, M., 2006. *Seismic response of traditional buildings of Lefkas Island, Greece*, Engineering Structures, 28:264-278.

Makropoulos, K.C., 1978. *The statistics of large earthquake magnitude and an evaluation of Greek seismicity*, PhD Thesis, Univ. of Edinburgh.

Makropoulos, K.C., 2010. *Earthquakes and preventive measures*. Bulletin of the Geological Society of Greece, Proceedings of the 12th International Congress, Patras, May, 2010, XLIII, No 1, p. 216-223

Makropoulos, K. C., and Burton, P. W., 1981, *A catalogue of seismicity in Greece and adjacent areas*: Geophys. Jour.Roy. Astr. Soc., v. 65, no. 3, p. 741-762.

Makropoulos, K.C., and Burton, P.W., 1984. *Greek Tectonics and Seismicity*, Tectonophysics, 106, 275-304

Makropoulos, K.C., and Burton, P.W., 1985a. *Seismic Hazard in Greece: I Magnitude recurrence*, Tectonophysics, 117:205-257

Makropoulos, K.C., and Burton, P.W., 1985b. *Seismic Hazard in Greece: II Ground Acceleration*, Tectonophysics, 117:259-294

Makropoulos, K.C., and Burton, P.W., 1986. *HAZAN: A Fortran program to evaluate seismic-hazard parameters using Gumbel's theory of extreme value statistics*, Computer and Geosciences, 12, 1:29-46

Makropoulos, K.C., Kouskouna, V., 1994. *The Ionian Islands earthquakes of 1767 and 1769: seismological aspects. Contribution of historical information to a realistic seismicity and hazard assessment of an area*. In: P. Albini and A. Moroni (eds), Materials of CEC Project Review of Historical Seismicity in Europe, CNR, Milano, 2: 254 pp

Makropoulos, K., Kaviris, G. and Kouskouna, V., 2012. *An updated and extended earthquake catalogue for Greece and adjacent areas since 1900*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 12:1425-1430

Makropoulos, K., Chousianitis, K., Kaviris, G. and Kassaras, I., 2013. *Seismic hazard assessment in Greece: Revisited*, Geophysical Research Abstracts, 15, EGU2013-10033-1

Makropoulos, K., Diagourtas, D., Kassaras, I., Kouskouna, V., Papadimitriou, P. and Ziazia, M., 1996. *The November-December 1994 Lefkas (W. Greece) earthquake sequence: Results from in situ seismological survey*, First Congress of the Balkan Geophysical Society, Athens, September 23-27, pp. 10-11.

Makropoulos K, Kassaras I, Stournaras G, Kapourani E, Valadaki E and Plessas S (2004) *Results from a multidisciplinary microzonation study in the city of Mytilene (Lesvos Island, Greece)*, Proc. of the 10th International Congress of the Geological Society of Greece, 15-17 Apr. 2004, Thessaloniki, 484-485.

Mantyniemi P., Tsapanos T.M. & Kijko A., (2004), *An Estimate of Probabilistic Seismic Hazard for Five Cities in Greece by Using the Parametric-historic Procedure*, Engineering Geology, 72, 217-231

Margaris, B.N. and Boore, D.M., 1998. *Determination of D_r and j_0 from Response Spectra of Large Earthquakes in Greece*, BSSA, 88:170–182

Margaris, B., Papaioannou, C., Theodulidis, N., Savvaidis, A., Anastasiadis, A., Klimis et al., 2003. *Preliminary observations on the August 14, 2003 Lefkada Island (Western Greece) earthquake. EERI special earthquake report. November 2003*, p. 1–12 [Joint report by Institute of Engineering Seismology and Earthquake Engineering, National Technical University of Athens & University of Athens].

Margaris, V., Papazachos, C., Papaioannou, Ch., Theodulidis, N., Kalogeras, I., Skarlatoudis, A., 2001. *Ground motion attenuation relations for shallow earthquakes in Greece*, Proc. 2nd Greek Conference on Earthquake Engineering and Engineering

Margottini, C., Molin, D., Serva, L., 1992. *Intensity versus ground motion: a new approach using Italian data*, Eng Geol 33:45–48

Mark, R.K., 1977. *Application of Linear Statistical Model of Earthquake Magnitude versus Fault Length in Estimating Maximum Expectable Earthquakes*, Geology, Vol. 5, pp. 464-466.

Mayne, P.W., 2006. *In situ test calibrations for evaluating soil parameters, Proc.Characterization and Engineering Properties of Natural Soils II*, Singapore.

McGuire, R. K., 1976. *FORTRAN Computer Program for Seismic Risk Analysis*, U.S. Geol. Surv., Open file rep., 76–67, 69.

McGuire, R.K and Hanks, T.C., 1980. *RMS Accelerations and Spectral Amplitudes of Strong Ground Motion during the San Fernando, California, Earthquake*, Bull. Seismol. Soc. Am. 70:1907–1919

Medvedev SV (1977) *Seismic intensity scale M.S.K.-76*. Public Institute of Geoph. Polish Academy of Sciences,Warsaw.

Medvedev, S. and Sponheuer, W. (1969). *MSK Scale of Seismic Intensity*, Proceedings of theFourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile, Vol. 1, p. A2.

Mihalic, S., Ostris, M., Krkac, M., 2011. *Seismic microzonation: A review of principles and practice*, GEOFIZIKA Vol. 2.

Milutinovic, Z., Trendafiloski, G., 2003. *An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns*. ReportWP4: vulnerability of current buildings, Risk-UE. European Commission, Brussels, DOI: 10.1007/978-1-4020-3608-8_23.

Mimura N., Yasuhara K., Kawagoe S., Yokoki H., Kazama S. (2011). *Damage from the Great East Japan Earthquake and Tsunami - A quick report October 2011*, Volume 16, Issue 7, pp 803-818

Morales J., Pena J.A., Ibanez J.M., Vidal F., Seo K. and Samano T.; 1992: *Site response in the Granada basin (Southern Spain) based on microtremor measurements* In: Proc. Tenth World Conf. Earthq. Eng., Madrid, 2, pp. 1069-1073

Mouroux, P., 2003. *RISK-UE An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns, Final Report*. European Commission, Brussels. Available at: <ftp://ftp.brgm.fr/pub/RISK-UE/>, Accessed: 24/08/07

Mouroux, P., Le Brun B., 2006. *Presentation of RISK-UE Project*, Bulletin of Earthquake Engineering, Volume 4, Issue 4, pp 323-33

Murphy, J.R., Davis, A.H., Weavers, N.L., 1971. *Amplification of seismic body waves by low-velocity surface layers*. Bulletin of the Seismological Society of America 61, 109–145

Musson, R., 2000. *Intensity-based seismic risk assessment*. Soil Dyn. Earthq. Eng. 20:353-360

Nakamura, Y., 1989. *A Method for Dynamic Characteristics Estimation of Subsurface using Microtremor on the Ground Surface*. Quart. Report of Railway Tech. Research Institute, 30, No.1.of Abstracts, 33 ESC General Assembly, Moscow, Russia, 164-165

Nakamura, Y., Gurler, E.D., Saita, J., Rovelli, A., Donati, 2000. *Vulnerability investigation of roman colosseum using Microtremor*, 12th WCEE 2000 in Auckland, NZ 2660/6/A

National Archives (1469-1957) *Earthquake file: 1469- 1957*, Archival Center of Lefkada.

Oliveira CS, Ferreira MA, Mota de Sá F (2004) *Seismic Vulnerability and Impact Analysis: Elements for Mitigation Policies*. In: Proceedings of the XI Congresso Nazionale on L'ingegneria Sismica in Italia, Genova, Italy, Keynote Lecture (on CD)

Oliveira CS, Mota de Sá F, Ferreira MA, 2005, *Application of Two Different Vulnerability Methodologies to Assess Seismic Scenarios in Lisbon*. In: Proceedings of the International Conference: 250th Anniversary of the 1755 LisbonEarthquake, Lisbon, Portugal, Paper No. 37 (on CD)

Orphal D, Lahoud J, 1974, *Prediction of Peak Ground Motion from Earthquakes*, BSSA, 64:1563-1574

Panou A, Theodoulidis N, Hatzidimitriou P, Stylianidis K and Papazachos C, 2005, *Ambient noise horizontal-to-vertical spectral ratio in site effects estimation and correlation with seismic damage distribution in urban environment: The case of the city of Thessaloniki (Northern Greece)*. Soil Dyn Earthq Eng 25:261–274

Papadimitriou, P., Kaviris, G. and Makropoulos, K., 2004. *Seismotectonic characteristics of the Lefkas island (Greece) based on past and recent seismic activity*. Book of Abstracts, p. 33, XXIX ESC General Assembly, Potsdam, Germany.

Papadimitriou, P., Kaviris, G. and Makropoulos, K., 2006. *The Mw=6.3 2003 Lefkas Earthquake (Greece) and induced transfer changes*, Tectonophysics, 423:73-82

Papadimitriou, P., Kapetanidis, V., Karakonstantis, A., Voulgaris, N., Chousianitis, K., Agalos, A., Moshou, A., Kaviris, G., Kassaras I. and Makropoulos, K., 2012. *Recent Significant Earthquakes in Western Greece*. Book of Abstracts, 33rd ESC General Assembly, Moscow, Russia, p. 456.

Papadopoulos G, Karastathis V, Ganas A, Pavlides S, Fokaefs A, Orfanogiannaki K, 2003, *The Lefkada, Ionian Sea (Greece), shock (Mw = 6.2) of 14 August 2003: evidence for the characteristic earthquake from seismicity and ground failures*. Earth Planet Space 55:713–718

Papaioannou C, Voulgaris N, Karakaisis G, Koutrakis S, Latousakis I, Makropoulos K, Papazachos B, Sokos E, Stavrakakis G and Tselentis GA, 2008, *The Utilization of New Seismological Information in the Compilation of the New Seismic Hazard map of Greece*, Proc. 3d Greek Conference on Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Athens, November 5-7, 2008, article 2025, p. 19

Papastamatiou, D., 1980. *Incorporation of Crustal Deformation to Seismic Hazard Analysis*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 70, pp. 1323-1335.

Papathanassiou G, Pavlides S and Ganas A, 2005, *The 2003 Lefkas earthquake: Field observations and preliminary microzonation map based on liquefaction potential index for the town of Lefkas*, Engineering Geology, 8

Papazachos BC and Comninakis PE, 1971, *Geophysical and tectonic features of the Aegean arc*, J. Geophys. Res., 76:8517-8533:12–31

Papazachos, C.B., Kiratzi, A. A., 1995. *A detailed study of the active crustal deformation in the Aegean and surrounding area*, Tectonophysics, Vol.253, pp.129-154.

Papazachos B, Papazachou C, 2003, *Earthquakes of Greece*. Ziti Publications, Thessaloniki, 3rd edition, 286 pp

Papazachos B.C., Kiratzi A.A., Hatzidimitriou P.M., Papaioannou C.A. & Theodulidis N.P., 1985, *Regionalization of seismic hazard in Greece*, In Proc12th Reg.Semon.Earthq.Eng.EAEE-EPPO,, pp. 12pp, Halkidiki-Greece,

Papazachos BC, Scordilis EM, Panagiotopoulos DG, Papazachos CB and Karakaisis GF, 2004, *Global relations between seismic fault parameters and moment magnitude of earthquakes*, Bulletin of the Geological Society of Greece vol.XXXVI, 2004, 1482-1489

Pararas Carayannis G, 1988, *The tsunami generated from the eruption of the volcano of Santorini in the Bronze Age*. The international Journal of the tsunami society, vol 6 N1, pp23-30.

Parolai S, Galiana-Merino JJ, 2006, *Effects of transient seismic noise on estimates of H/V spectral ratios*, Bull Seism SocAm, 96, 1:228–236

Pavlou K, Kaviris G, Chousianitis K, Drakatos G, Kouskouna V and Makropoulos K, 2013, *Seismic hazard assessment in Polyphyto Dam area (NW Greece) and its relation with the “unexpected” earthquake of 13 May 1995 ($M_s = 6.5$, NW Greece)*. Natural Hazards earth syst. Sci 13:141-149.

Philips and Aki, 1986. *Site amplification of coda waves from local earthquakes in central California*, Bulletin of the Seismological Society of America, 76(30): 627-648.

Pitilakis K, 2010. *Geotechnical Earthquake Engineering*. P.Ziti. Thessaloniki

Pitilakis K., Crowley H., Kaynia A.M., 2013. *SYNER-G: Typology Definition and Fragility Functions for Physical Elements at Seismic Risk*, GEOTECHNICAL, GEOLOGICAL AND EARTHQUAKE ENGINEERING Volume 27

Pitilakis, K., Raptakis, D., Makra, K., 1999. *Site effects: recent considerations and design provisions*, Invited Lecture Proc. 2nd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, June 21-25, Lisbon, Portugal, Vol.3, pp.901-912.

Pomonis A, Gaspari M, Karababa F, 2013, *Seismic vulnerability assessment for buildings in Greece based on observed damage data sets*. Bolletino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol. 55, 2:, 501-534.

Rahimi, E., Nikoudel, M.R., Moghaddas, N.H. and Ghayamghamian, M.R. , 2012. *Evaluating Local Geological Condition and Vs profiles in Khash Area. SE Iran*, Science Series Data Report, 4.

Raptakis, D.G., Anastasiadis, S.A.J., Pittilakis, K.D., Lotzetidis, K.S., 1995. *Shear Wave Velocity and Damping of Greek Natural Soils*, Proc. 10th European Conference Earthquake Eng., Vienna, 477-482

Raptakis D., Chavez-Garcia F.J., Makra K. and Pitilakis K., 2000. *Site effects at Euroseistest - I.Determination of the valley structure and confrontation of observations with 1D analysis*, Soil Dynamic. Earthquake Engineering.19,1-22.

RISK-UE (2001–2004) *An advanced approach to earthquake risk scenarios, with applications to different European cities*. Website <http://www.risk-ue.net>

Rodriguez, V.H.S. and Midorikawa S., 2002. *Applicability of the H/V spectral ratio of microtremors in assessing site effects on seismic motion*, Earthq Eng Struct Dyn, 31:261–79

Romeo, R. and Prestininzi, A., 2000. *Probabilistic versus Deterministic Seismic Hazard Analysis: An Integrated Approach for Siting Problems*, Soil Dyn. Earthq. Eng., Vol. 20, pp. 75-84

Rontoyanni-Tsiambaou, T. 1997. *Les Seismes et l'Environnement Geologique de l'île de Lefkada, Grece: Passe et Futur*, Engineering Geology and the Environment, Balkema, pp. 1469– 1474

Rossetto, T. and Elnashai, A., 2005. *A New Analytical Procedure for the Derivation of Displacement-Based Vulnerability Curves for Populations of RC Structures*, Engineering Structures, Vol. 7, No. 3, pp. 397-409.

Rota, M., Penna, A. and Strobbia, C., 2006. *Typological Fragility Curves from Italian Earthquake Damage Data*, Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, Paper No. 386 (on CD).

Roumelioti Z, Kiratzi A, Theodoulidis N., 2004, *Stochastic Strong Ground-Motion Simulation of the 7 September 1999 Athens (Greece) Earthquake*, BSSA, 94, 3:1036-1052

Salgado-Gálvez, M., Zuloaga-Romero, D., Bernal, G., Mora, G., Cardona, O. D., 2013. *Fully probabilistic seismic risk assessment considering local site effects for the portfolio of buildings in Medellín, Colombia*. Bull Earthquake Eng (2014) 12:671–695, DOI 10.1007/s10518-013-9550-4

Sanchez-Sesma FJ, Palencia VJ, Luzon F., 2002, *Estimation of local site effects during earthquakes: An overview*, Indian Soc. Earthq. Technol. J., 39, 3:167–194

Saner, T.S., 2015. *Seismic vulnerabilities and risks for urban mitigation planning in Turkey*, Natural Hazards, Volume 78, Issue 2, pp 1387-1412

Sato, H., 1988, *Temporal Change in Scattering and Attenuation Associated with the Earthquake Occurrence—A Review of Recent Studies on Coda Waves*, Pure and Appl. Geophys.126, 465–497.

Sawazaki K., Sato Hisashi H., Nakahara H., and Nishimura T., 2006. *Temporal change in site response caused by earthquake strong motion as revealed from coda spectral ratio measurement*, GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 33, L21303, doi:10.1029/2006GL027938, 2006

Scherbaum, F., Ohrnberger, M., Savvaidis, A., Panou, A.A. and Theodoulidis, N., 2002. *Determination of shallow shear wave velocity profiles using ambient vibrations at selected sites in Greece*, Poster at the A.G.U.

Scordilis, E.M., Karakaisis, G.F., Karakostas, B.G., Panagiotopoulos, D.G., Comninakis, P.E., and Papazachos B.C., 1985. *Evidence for the transforming fault in the Ionian Sea: the Cephalonia island earthquake sequence of 1983*, Pageoph 123, 387-397.

Seed, H. B. and Harder, L. F., 1990: *SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength*, in Proceedings of the H. G. Seed Memorial Symposium, BiTech Publishing, 2, 351–376.

SESAME, 2005, *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations— measurements, processing and interpretations*, SESAME European research project EVG1-CT-2000–00026, deliverable D23.12

SHARE project: <http://www.share-eu.org>

Shaw B, Jackson J., 2010, *Earthquake mechanisms and active tectonics of the Hellenic subduction zone*. Geophys. J.Int., doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04551.x

Shebalin N.V., Reisner G.I., Dfrumea A.V., Aptekman J.V., Sholpo V.N., Stepaneks N.Y. & Zacharova A.J., 1975, *Earthquake origin zones and distribution of maximum expected seismic intensity for Balkan region.*, In Proc. Sem. Seismic Zoning Maps, UNESCO edn, pp. 68-171, UNESCO, Skopje

Silva, V., Crowley, H., Pagani, M. , Modelli, D. , Pinho, R., 2014a. *Development of the open Quake engine, the global earthquake model's open-source software for seismic risk assessment*. Natural Hazard 72:1409–1427

Silva, V. , Crowley, H., Varum, H., Pinho, R., 2014b. *Development of a vulnerability model for the Portuguese RC building stock*. Bulletin of Earthquake Engineering,

Singh, S.K., Bazan, E. and Esteva, L., 1980. *Expected Earthquake Magnitude from a Fault*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 70, pp. 903-914.

Singhal, A. and Kiremidjian, A.S., 1996. *Method for Probabilistic Evaluation of Seismic Structural Damage*, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 12, pp. 1459-1467.

Skarlatoudis AA, Margaris BN, Papazachos CB, Theodoulidis N, Papaioannou C, Kalogeras I, Scordilis EM, Karakostas V, 2003, *Empirical peak ground motion predictive relations for shallow earthquakes in Greece*. Bull Seismol Soc Am Soil Dyn. & Earth. Eng., 11:387-402

Smith, S.W., 1976. *Determination of Maximum Earthquake Magnitude*, Geophys. Res. Letters, Vol. 33, pp. 351-354.

Spence R., 2011. *Human Casualties in Earthquakes*, Advances in Natural 153 and Technological Hazards Research 29, DOI 10.1007/978-90-481-9455-1_11

Spence, R., Coburn, A.W. and Pomonis, A.,1992. *Correlation of Ground Motion with Building Damage: The Definition of a New Damage-Based Seismic Intensity Scale*, Proceedings of the Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, Vol. 1, pp. 551-556.

SRCMOD, 2014. *Finite source rupture model database*. Web site: <http://equake-rc.info/SRCMOD/> (visited on May 2014)

Stucchi, M., Rovida, A., Gomez Capera, A.A., Alexandre, P., Camelbeeck, T., Demircioglu, M.B., Gasperini, P., Kouskouna, V., Musson, R.M.W., Radulian M., Sesetyan, K., Vilanova, S., Baumont, D., Bungum, H., Fäh, D., Lenhardt, W., Makropoulos, K., Martinez Solares, J.M., Scotti, O., Zivcic, M., Albin, P., Batllo, J., Papaioannou, C., Tatevossian, R., Locati, M., Meletti, C., Viganò, D., Giardini, D., 2013. *The SHARE European earthquake catalogue (SHEEC) 1000–1899*, Journal of Seismology, 17, 2:523-544

Subhadra,N., Simanchal Padhy, Prabhakara Prasad,P., Seshunarayana,T., 2015. *Site-specific ground motion simulation and seismicresponse analysis for microzonation of Nanded City,India*, Natural Hazards , Vol.78, pp:915–938.

Tertulliani, A. and Donati S., 2000. *A macroseismic network of schools for the collection of earthquake effects in a large city*, Seismological Research Letters, 71, 536–543.

Tertulliani, A., Arcoraci, L., Berardi, M., Bernardini, F., Camassi, R., Castellano, C., Del Mese, S., Ercolani, E., Graziani, L., Leschiutta, Rossi, A., Vecchi, M., 2011. *An application of EMS98 in a medium-sized city: The case of L'Aquila (Central Italy) after the April 6, 2009 Mw 6.3 earthquake*, Bull Earthquake Engineering 9:67–80DOI 10.1007/s10518-010-9188-4

Terzaghi, K and Peck, R.B., 1967, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Second Edition: John Wiley & Sons, New York, p.729

Theodulidis NP, Papazachos BC, 1992. *Dependence of strong ground motion on magnitude–distance, site geology and macroseismic intensity for shallow*

earthquakes in Greece: I, peak horizontal acceleration, velocity and displacement. Soil Dyn Earthquake Eng. 1992;11:387–402.

Tobriner S., 1983, *La Casa Baraccata: earthquake resistant construction in 18th century Calabria*, Journal of the Society of Architectural Historians XLII:131-138

Tocher, D., 1958. *Earthquake Energy and Ground Breakage*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 48, pp. 147-153.

Touliatos P, Gante D., 1995, *Local historical antiseismic constructions: The example of Lefkada*, National Technical University Publications, Athens

Trendafiloski G. , Wyss M., Rosset P., 2010. *Loss Estimation Module in the Second Generation Software QLARM. Human Casualties in Earthquakes.* Volume 29 of the series Advances in Natural and Technological Hazards Research pp 95-106. 08 December 2010

Triantafyllidis P, Theodulidis N, Savvaidis A and Dimitriou P., 2006, *Site effects estimation using earthquake and ambient noise data: the case of Lefkas town*, Proc. of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 3–8 September 2006, paper 1249

Trifunac, M.D., 1976. *Preliminary Empirical Model for Scaling Fourier Amplitude Spectra of Strong Ground Acceleration in Terms of Earthquake Magnitude, Source to Station Distance and Recording Site Conditions*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 66, pp. 1345-1373.

Trifunac, M.D., 1993. *Broad Band Extension of Fourier Amplitude Spectra of Strong Motion Acceleration*, Report CE 93-01, Dept. of Civil Eng., Univ. of Southern California, Los Angeles, California, U.S.A.

Trifunac, M.D. and Anderson, J.G., 1977. *Preliminary Empirical Models for Scaling Absolute Acceleration Spectra*, Report CE 77-03, Dept. of Civil Eng., Univ. of Southern California, Los Angeles, California, U.S.A.

Tsapanos T.M., Papadopoulos G.A. & Galanis O.G., 2003, *Time independent seismic hazard analysis of Greece deduced from Bayesian statistics*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 3, 129-134.

Tselentis, G.-A., 1993. *Shallow attenuation in the west Corinth patras rift, Greece*, Bulletin of the Geological Society of America 83, 603-609.

Tselentis, G.-A., Danciu, L., 2008. *Empirical Relationships between Modified Mercalli Intensity and Engineering Ground-Motion Parameters in Greece*, BSSA, 98, 4:1863–1875

Tselentis, G.-A. and Danciu, L., 2010. *Probabilistic seismic hazard assessment in Greece – Part 1 Engineering ground motion parameters*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 25–39.

Tsiambaos G and Sabatakakis N., 2011, *Empirical Estimation of Shear Wave Velocity from In Situ Tests on Soil Formations in Greece*, Bull. of Engineering Geology and the Environment, 70:291-297

Tsiknakis, K., Makropoulos, K.C. and Kouskouna, V., 1990. *Review of the Ionian islands historical seismicity - the Leukada earthquake of October 1st, 1769*. Proceedings of the XXII General Assembly of the ESC, Barcelona, 17-22 September 1990, Vol. I, 311-316.

United Nations Disaster Relief Organization-UNDRO, 1979, *Natural disasters and vulnerability analysis*. Report of Expert Group Meeting, 9-12 July 1979, 53

United Nations, *The traditional aseismic techniques and the everlasting principles they reveal*, Newsletter - Stop Disasters. International decade for natural disasters reduction, *Seismic Vulnerability Reduction*, 4-5, 1993. 35–2242.

Veneziano, D., Sussman, J.M., Gupta, U. and Kunnumkal, S.M., 2002. *Earthquake Loss under Limited Transportation Capacity: Assessment, Sensitivity and Remediation*, Proceedings of the Seventh US National Conference on Earthquake Engineering, Boston, U.S.A. (on CD).

Vintzileou, E., Zagkotsis, A., Repapis, C., Zeris, Ch., 2007. *Seismic behaviour of the historical structural system of the island of Lefkas, Greece*, Journal of Construction & Building Materials, 21:225-236

Wald D, Quitoriano V, Heaton T, Kanamori H., 1999, *Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity and Modified Mercalli Intensity in California*, Earthquake Spectra, 15, 3:557-564

Wang Z.,2006, *Understanding seismic hazard and risk assessment: An example in the New Madrid Seismic zone of the central United States*. Proceedings of the 8th U.S. National Conference on Earthquake Engineering April 18-22, 2006, San Francisco, California, USA

Wells, D.L. and Coppersmith, K.J.,1994, *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 84, pp. 974-1002

Wesnousky, S.G., 1994, *The Gutenberg-Richter or Characteristic Earthquake Distribution, Which Is It?*, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 84, No. 6, pp. 1940-1959.

Whitman R.V., Anagnos T., Kircher C.A., Lagorio H.J., Lawson R.S., Schneider P.,1997, *Development of a National Earthquake Loss Estimation Methodology*. Earthquake Spectra, 13(4), 643–661.

Whitman, R.V., Reed, J.W., Hong, S.T.,1973, *Earthquake Damage Probability Matrices*. Proc. 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, 2: 2531-2540.

Woolery, E.W., Street, R.,2002, *3D near-surface soil response from H/V ambient-noise ratios*, Soil Dyn Earthq Eng, 22:865–876

Wyss M., Nekrasova A., Kossobokov V.,2012, *Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates*. Natural Hazards July 2012, Volume 62, Issue 3, pp 927-935 First online: 23 March 2012

Zahradnik, J., Serpetsidaki, A., Sokos, E., Tselentis, G-A.,2005. *Iterative deconvolution of regional waveforms and a double event interpretation of the 2003 Lefkada earthquake, Greece*. BSSA 95:159–172

Βιντζηλαίου, Ε.,Τουλιάτος, Π., Ζέρης, Χ., Ρεπαπής, Κ., Αδάμη, Χ.-Ε., Ζαγκότσης, Α., Παλιεράκη, Β., Λεονάρδος, Ε., 2004. *Αποτίμηση και σύνταξη Οδηγιών για την αποκατάσταση των κτηρίων του παραδοσιακού οικισμού της Λευκάδας*, Τελική Έκθεση Ερευνητικού Προγράμματος ΕΜΠ-ΟΑΣΠ.

Γκαζέτας, Γ., Κούκης, Γ., Τσελέντης, Α., 2004. *Ο σεισμός της Λευκάδας*, Τελική Έκθεση του Ερευνητικού Προγράμματος προς Ο.Α.Σ.Π.

ΕΑΚ, 2000. *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός*, Έκδοση ΟΑΣΠ/ΣΠΜΕ

ΙΤΣΑΚ, 2003. *Ο σεισμός της Λευκάδος (M=6.4), 14 Αυγούστου 2003*, Τεχνικό Επιμελητήριο της Ελλάδας, Αθήνα.

ΙΤΣΑΚ, 2015. *Σύντομη προκαταρκτική αναφορά για τον σεισμό της Λευκάδας στις 17-11-2015*

Καλτετζιώτης, Ν., Σαμπατακάκης, Ν., Βασιλείου, Ι., 1992. *Εκτίμηση των δυναμικών χαρακτηριστικών των εδαφών στον Ελληνικό χώρο*, Πρακτικά 2ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη 21-23 Οκτωβρίου, Τόμος 2, 239-24

Καραμπίνης, Α., Μπαλτζοπούλου, Α., Ρουσάκης, Θ., 2006. *Ο σεισμός της Λευκάδας στις 14 Αυγούστου 2003. Διερεύνηση της σεισμικής τρωτότητας των κατασκευών*, 15^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη ,25-27 Οκτωβρίου.

Κεντρικό Εργαστήριο Δημοσίων Έργων (Κ.Ε.Δ.Ε.),2004. *Αποτελέσματα Γεωτεχνικής Έρευνας στη Χώρα της Νήσου της Λευκάδας, για την Αξιολόγηση των Ζημιών από το Σεισμό της 14-8-2003*, Αθήνα

Λοντζετίδης, Κ.Δ., Ραπτάκης, Δ.Γ., Πιπιλάκης, Κ.Δ., 1997. *Σχέσεις συσχέτισης VS – NSPT για Ελληνικά εδάφη*, Πρακτικά 3ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Γεωτεχνικής Μηχανικής, σ. 419-425, Πάτρα,Π.Ε.Π. ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ, Αθήνα

Μαλακάσης, Δ.,2000. *Τα παλιά σπίτια της Λευκάδας, 1850-1920. Φαγοτοπο/θρόισμα*.Αθήνα.

Μαχαίρας, Κ., 1957. *Ναοί και μοναί Λευκάδος*. Αθήνα

Μπουρνόβας, 1964. *Γεωλογική μελέτη της νήσου της Λευκάδος*, Ινστιτούτο Γεωλογικών και Υπόγειων Ερευνών

Παπαδάτου-Γιαννοπούλου, Σ., 1999. *Λευκάδα Ερευνώντας*, Αχαϊκές Εκδόσεις Πάτρα.

Παπαδημητρίου,Α.,Μπουκοβάλας,Γ.,2009.*ΕυρωκώδικαςEN1998:Αντισεισμικό Σχεδιασμός Φερουσών Κατασκευών Μέρος1: Σεισμικές Δράσεις*. Ρέθυμνο Απρίλιος 2009

Παπαζάχος, Β., Παπαζάχου, Κ., 2003. *Οι Σεισμοί της Ελλάδας*, Εκδόσεις Ζήτη.

Ροντογιάννης, Π., 1995. *Σεισμολόγιο Λευκάδας (1469-1971)*, Επετηρίς 8η Σειρά, Εταιρεία Λευκαδικών Μελετών

Σπυρόπουλος, Π.Ι., 1997. *Χρονικό των Σεισμών της Ελλάδος*, Εκδόσεις Δωδώνη

Σταματέλος, Ι., 1870. *Αι δεκατρείς μνημονευόμεναι καταστροφές της Λευκάδος από του 1612 μέχρι του 1869*. Αθήνα.

Τουλιάτος Π., Βιντζηλαίου, Ε., 2006. *Σεισμική συμπεριφορά του δομικού συστήματος στον ιστορικό οικισμό της πόλης της Λευκάδας*, 15ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, Αλεξανδρούπολη 25-27 Οκτωβρίου 2006

Τουλιάτος Π., Γαντέ Δ.(1995): *Τοπικές ιστορικές αντισεισμικές κατασκευές: Το παράδειγμα της Λευκάδας*, Έκδοση ΕΜΠ.

Τσιαμπάος Γ., Γιάνναρος Χ., Βασιλείου Ι., Ραππάκης Π. (1999), *Αποτελέσματα Γεωτεχνικής Έρευνας στην Πόλη της Λευκάδας*, Αθήνα, BSSA, 95:159–172