

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ



ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: «ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ»

Εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας της πόλης
των Χανίων

ΙΩΑΝΝΗΣ ΚΟΥΤΣΟΥΠΑΚΗΣ
Πολιτικός Μηχανικός

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής **Ιωάννης Τσομπανάκης**

ΧΑΝΙΑ, 2017

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια προσπάθεια για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας του πολεοδομικού συγκροτήματος της πόλης των Χανίων. Η σημασία της πραγματοποίησης μιας τέτοιας μελέτης καταδεικνύεται λόγω της ιστορικής σπουδαιότητας της πόλης των Χανίων, της μεγάλης τουριστικής ανάπτυξης τα τελευταία χρόνια και της σημαντικής παρουσίας βιομηχανικών/βιοτεχνικών μονάδων στην ευρύτερη περιοχή. Το ενδιαφέρον είναι αναμφισβήτητο μεγάλο, αλλά και η δυσκολία εκπόνησης μιας τέτοιας μελέτης είναι επίσης μεγάλη, εξαιτίας της πολυπλοκότητας του γεωλογικού ανάγλυφου ολόκληρης της περιοχής της Κρήτης, αλλά και της έντονης ποικιλομορφίας -από κάθε άποψη- των κτιρίων της πόλης.

Για τη μελέτη και την ανάλυση των παραμέτρων του σεισμικού κινδύνου, καθώς και τη δημιουργία των τελικών χαρτών επικινδυνότητας, χρησιμοποιήθηκαν το ελεύθερο λογισμικό πρόγραμμα QGIS και το QuakeIST, λογισμικό που δημιουργήθηκε από ομάδα ερευνητών του Instituto Superior Técnico της Λισαβώνας. Τα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από βάσεις δεδομένων, χάρτες και shape files από προηγούμενες μελέτες, τα οποία επεξεργάστηκαν μέσω των προγραμμάτων MS Excel, Notepad και QGIS.

Στόχος της μελέτης είναι να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για την ελαχιστοποίηση πιθανών μελλοντικών δυσμενών συνεπειών είτε για τον πληθυσμό, είτε για τις κατασκευές εξαιτίας ενός ισχυρού σεισμικού φαινομένου που μπορεί να πλήξει την περιοχή.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε όσους συνέβαλαν στην πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας και συγκεκριμένα: στον επιβλέποντα, Αναπλ. Καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης Δρ. Ιωάννη Τσομπανάκη για την επιστημονική καθοδήγηση και ηθική συμπαράσταση, στον Καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος της Σχολής Εφαρμοσμένων Επιστημών του ΤΕΙ Κρήτης, Δρ. Παντελή Σουπιό για την έμπρακτη υποστήριξη που μου παρείχε, στον

Διευθυντή Ερευνών του Ινστιτούτου Μεσογειακών Σπουδών του ΙΤΕ, Δρ. Απόστολο Σαρρή, για την παροχή μεγάλου μέρους των πρωτογενών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν, στην Δρ. Mónica Amaral Ferreira και στον João C. Bonacho από το Πολυτεχνείο της Λισσαβώνας για τη βοήθεια και υποστήριξη που παρείχαν επί του λογισμικού QuakeIST, στον μεταδιδακτορικό φοιτητή του Πανεπιστημίου του Portsmouth, Δρ. Αθανάσιο Αργυρίου για τις πολύτιμες συμβουλές του πάνω στο λογισμικό QGIS, στον Καθηγητή της Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών του Πολυτεχνείου Κρήτης, Δρ. Κωνσταντίνο Προβιδάκη για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή, το ΙΤΣΑΚ και συγκεκριμένα το Δρ. Νίκο Θεοδουλίδη για τη διάθεση δεδομένων, τον Δήμο Χανίων και ιδιαίτερα την κα. Ελίνα Κτιστάκη, για την παροχή όσων πρωτογενών δεδομένων ζητήθηκαν και τέλος στην οικογένεια μου για την αμέριστη υποστήριξη καθόλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Πίνακας Περιεχομένων

Πρόλογος.....	i
Πίνακας Περιεχομένων	iii
Περίληψη	v
Abstract.....	vi
Κεφάλαιο 1°: Εισαγωγή	1
Κεφάλαιο 2°: Σεισμολογία και Σεισμική Επικινδυνότητα	5
2.1. Το φαινόμενο του σεισμού.....	5
2.2. Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών	8
2.3. Μέγεθος σεισμού	10
2.4. Σεισμική ένταση	12
2.5. Σεισμική τρωτότητα	16
2.5.1. Καμπύλες τρωτότητας	16
2.5.2. Προσδιορισμός αναμενόμενων βλαβών	18
2.5.3. Ταξινόμηση των μεθόδων αποτίμησης της τρωτότητας.....	20
Κεφάλαιο 3°: Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών	23
3.1. Γεωλογία της περιοχής ενδιαφέροντος.....	23
3.2. Σεισμικότητα της περιοχής ενδιαφέροντος	25
Κεφάλαιο 4°: Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών	29
4.1. Γενικά περί ΓΣΠ	29
4.2. Δομή των ΓΣΠ	30
4.3. Χαρακτηριστικά και δυνατότητες των ΓΣΠ	32
4.4. Εφαρμογές των ΓΣΠ	35

4.5. Το λογισμικό QGIS.....	37
4.6. Εφαρμογές ΓΣΠ στην εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας.....	38
Κεφάλαιο 5°: Εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας	41
5.1. Εισαγωγή.....	41
5.2. Περιγραφή του QuakeIST	41
5.3. Δομή QuakeIST.....	44
5.4. Βάση γεωλογικών δεδομένων	45
5.5. Ενότητα βιβλιοθήκης	46
5.6. Μονάδα προσομοίωσης	48
5.7. Ενότητα αποτελεσμάτων	49
Κεφάλαιο 6°: Εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας Χανίων	51
6.1. Εδαφικές συνθήκες.....	51
6.2. Πίνακας τρωτότητας	55
6.3. Πίνακας κτιρίων	58
6.4. Άλλες κατασκευές	60
6.5. Λίστα κατασκευών	60
6.6. Σεισμικό σενάριο	61
6.7. Αποτελέσματα.....	62
6.8. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων	85
6.8.1. Σύγκριση με προηγούμενη μελέτη	85
6.8.2. Σύγκριση με αποτελέσματα σεισμικών γεγονότων	86
6.9. Διερεύνηση με ενσωματωμένους σχέσεις εξασθένησης.....	88
6.10. Διερεύνηση με άλλο σεισμικό σενάριο	98
6.11. Διερεύνηση για ακραία σεισμικά σενάρια.....	100
Κεφάλαιο 7°: Συμπεράσματα	105
Ευρετήριο Πινάκων.....	107
Ευρετήριο Εικόνων	108
Ευρετήριο Γραφημάτων	112
Βιβλιογραφία	113

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της σεισμικής επικινδυνότητας του κεντρικού πολεοδομικού συγκροτήματος της πόλης των Χανίων. Η διερεύνηση γίνεται μέσω του λογισμικού QuakeIST, το οποίο λειτουργεί σε περιβάλλον Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών ή σε συντομία ΓΣΠ (Geographical Information Systems – GIS), και συγκεκριμένα του λογισμικού QGIS. Βασικός σκοπός της εργασίας είναι η ρεαλιστική παραμετροποίηση του προβλήματος της σεισμικής επικινδυνότητας και η πρόβλεψη των πιθανών επιπτώσεων (βλαβών και απωλειών), όπως επίσης και της πιθανότητάς εμφάνισής τους σε μελλοντικό ισχυρό σεισμό. Ένας ακόμα στόχος, είναι να διατυπωθεί μία μεθοδολογία που δυνητικά θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από τους αρμόδιους φορείς ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο λήψης αποφάσεων, για την υλοποίηση κατάλληλων τεχνο-οικονομικών σχεδιασμών και μέτρων αντισεισμικής προστασίας για την πρόληψη και τον περιορισμό στο ελάχιστο των πιθανών απωλειών (ανθρώπινων πρωτίστως, αλλά και οικονομικών) στο μέλλον.

Αρχικά, γίνεται μία εισαγωγή σε γενικές έννοιες της σεισμολογίας και μία σύντομη ανάλυση της σεισμικής και γεωλογικής κατάστασης της περιοχής της πόλης των Χανίων. Στη συνέχεια, γίνεται μια παρουσίαση γενικών στοιχείων και εννοιών για τα ΓΣΠ, αλλά και για το λογισμικό QGIS συγκεκριμένα. Ακολουθεί το κυρίως μέρος της εργασίας, όπου αρχικά αναφέρονται βασικά στοιχεία για το λογισμικό QuakeIST και περιγράφεται η λειτουργία του. Ακολούθως, παρουσιάζεται εκτενώς η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα μελέτη για το αστικό συγκρότημα των Χανίων, με αναλυτικά στοιχεία και περιγραφές και παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα. Η εργασία ολοκληρώνεται με την αξιολόγηση των εξαχθέντων αποτελεσμάτων μετά και από τη σύγκρισή τους με προηγούμενες σχετικές μελέτες στην εξεταζόμενη περιοχή και την παρουσίαση των σχετικών συμπερασμάτων και προτάσεων.

Abstract

The subject of this diploma thesis is the study of the seismic hazard of the urban complex of the city of Chania. The implementation is performed utilizing QuakeIST software, which operates in Geographical Information Systems (GIS) computational environment, and in particular, QGIS software. The main aim of this thesis is to realistically define the problem of the seismic hazard and to predict the possible impacts (damages and losses) as well as their probability of occurrence in a future seismic event. Another objective is to formulate a methodology that could potentially be used by the authorities as an effective decision-making tool for the implementation of appropriate techno-economic plans and seismic protection measures to prevent and reduce losses (primarily human, but also financial) in the future.

The thesis begins with an introduction to the general concepts of seismology and a brief analysis of the seismic and geological setting of the area of the municipality of Chania. Next, a presentation of general elements and concepts for GIS, and also for QGIS software in particular, is provided. Subsequently, in the main part of the thesis, initially, the basic information regarding QuakeIST software are presented and its functions are described. Then, the process of studying the Chania urban complex is described in details, and finally the obtained results are presented. The thesis concludes with the interpretation of the results along with a comparison with previous relevant studies in the examined area. Finally, suggestions for future continuation of this investigation are provided.

Κεφάλαιο 1^ο: Εισαγωγή

Ο σεισμικός κίνδυνος συνδέεται με την πιθανότητα εμφάνισης βλαβών και επακολούθως της δυνητικής απώλειας μιας συγκεκριμένης κατασκευής ή μιας ομάδας κατασκευών, για μια καθορισμένη χρονική περίοδο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί η διάκριση μεταξύ κινδύνου και τρωτότητας. Ο κίνδυνος συνδυάζει τις αναμενόμενες απώλειες από όλο το εύρος πιθανών απειλών, λαμβάνοντας επίσης υπόψη την πιθανότητα εμφάνισής τους, ενώ η τρωτότητα ενός στοιχείου ή συστήματος εκφράζεται συνήθως για ένα συγκεκριμένο επίπεδο σοβαρότητας μιας απειλής (Sarris et al., 2010).

Στο παρελθόν έχουν αναπτυχθεί διάφορες εφαρμογές Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών ή σε συντομία ΓΣΠ (Geographical Information Systems – GIS) που σχετίζονται με τον σεισμικό κίνδυνο και τη σεισμική τρωτότητα, ορισμένες από τις οποίες ασχολούνται με την εφαρμογή συστημάτων υποστήριξης έκτακτης ανάγκης (Voulgaris et al., 2003, Youhai et al., 2006) (Xu et al., 2008, Ren και Xie 2004, Zaincenco και Alkaz 2005) και την ανάπτυξη σεισμικών πληροφοριακών συστημάτων ή βάσεων δεδομένων για τη μείωση των απειλών (Yamazaki 1996, Umemura et al., 2000, Giammarinaro et al., Martelli et al. 2007., Hampton et al., 2008; Bartolomei et al., 2008., Inel et al., 2008).

Αναφορικά με τη μελέτη αστικών κέντρων, η ανάλυση της σεισμικής τρωτότητας επικεντρώνεται κυρίως στο είδος της δομικής, γεωλογικής και χωρικής πληροφόρησης κτιρίων που σχετίζονται άμεσα με πιθανές ανθρώπινες και οικονομικές ζημιές σε περίπτωση ισχυρού σεισμού. Αν και υπάρχουν κάποια υπολογιστικά εργαλεία που βασίζονται στα GIS, όπως το HAZUS (1999) και το RADIUS (2000), που προσεγγίζουν την εκτίμηση σεισμικού κινδύνου είτε μέσω γενικευμένων πληροφοριών εμπειρογνομόνων, είτε εντοπισμένων παρατηρήσεων και μετρήσεων, συχνά είναι δύσκολο να εφαρμοστούν σε περιοχές που δεν διαθέτουν το απαραίτητο υπόβαθρο πληροφοριών. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα στην περιοχή της Μεσογείου, όπου οι

περισσότερες πόλεις περιέχουν ιστορικά κτίρια και αρχαιολογικά μνημεία δεν υπάρχουν λεπτομερείς απογραφές και μελέτες της δομικής ακεραιότητάς τους. Αντιστοίχως, συνήθως δεν υπάρχουν λεπτομερείς γεωλογικές και άλλες μελέτες που να παρέχουν επαρκή δεδομένα για τις εφαρμογές GIS.

Υπάρχουν μερικά παραδείγματα εφαρμογής GIS στη μελέτη του σεισμικού κινδύνου σε αστικά κέντρα. Οι Lantada et al. (2003) εφάρμοσαν μια μεθοδολογία GIS για τη μελέτη των σεναρίων βλαβών και σεισμικών καταστροφών στη Βαρκελώνη χρησιμοποιώντας δείκτη μέσης τρωτότητας που συνδέεται με τις τυπολογίες οικιστικών κτιρίων της πόλης. Οι Petermans et al. (2006) χρησιμοποίησαν ένα συνδυασμό γεωλογικών δεδομένων, μετρήσεων πεδίου και αριθμητικής προσομοίωση σε περιβάλλον GIS -2D και 3D- για την εκτίμηση του τοπικού σεισμικού κινδύνου στο αστικό κέντρο των Βρυξελλών. Μια παρόμοια μέθοδος (VULNERALP) που βασίστηκε σε μια απλοποιημένη προσέγγιση (“σεισμική απογραφή” κτιρίων) για την εκτίμηση τρωτότητας σε περιοχές μέτριας σεισμικής επικινδυνότητας έχει εφαρμοστεί στη Grenoble της Γαλλίας (Gueguen et al., 2007).

Στην Ελλάδα, αναπτύχθηκε σχετικά πρόσφατα το Seismocare, ένα σύστημα βασισμένο στο GIS για τη μελέτη της εκτίμησης ζημιών και ζημιών σε τοπικό επίπεδο λόγω σεισμών (Anagnostopoulos et al., 2008). Παρομοίως, το έργο RISK-UE αντιμετώπισε τον σεισμικό κίνδυνο της πόλης της Θεσσαλονίκης (και σε έξι ακόμα μεγαλύτερες ευρωπαϊκές πόλεις), λαμβάνοντας υπόψη τα σενάρια προσδιορισμού του πιθανού σεισμικού κινδύνου σε συνδυασμό με την τρωτότητα των δομικών στοιχείων που βρίσκονται σε κίνδυνο (Pitilakis et al., 2006).

Σε όλες τις προαναφερθείσες μελέτες, τα κύρια στοιχεία που χρησιμοποιούνται περιλαμβάνουν τα χαρακτηριστικά χωρικής κατανομής, γεωμετρίας και μηχανικών χαρακτηριστικών των κτιρίων και τις γεωλογικές και γεωμορφολογικές συνθήκες του υπεδάφους. Σε ορισμένες μελέτες, οι καμπύλες τρωτότητας και ο χωρικός καθορισμός της σεισμικότητας της υπο μελέτη περιοχής δημιουργούνται μέσω της ανάλυσης μετασεισμικών δεδομένων.

Οι Meroni et al. (2015) εφάρμοσαν μια διαδικασία για την εκτίμηση σεισμικού κινδύνου στο ηφαίστειο της Αίτνας (ανατολική Σικελία, Ιταλία) μέσω της εκτίμησης της δυσλειτουργίας του αστικού συστήματος μετά την εμφάνιση ενός σεισμού. Το εργαλείο που χρησιμοποιείται είναι ο εξομοιωτής QuakeIST, η μεθοδολογία του οποίου βασίζεται σε ένα “δείκτη διαταραχών” που ορίζει την αστική διατάραξη μετά από φυσική καταστροφή. Το πρώτο στοιχείο της διαδικασίας είναι ο ορισμός της σεισμικής εισόδου, η οποία βασίζεται σε πληροφορίες σχετικά με την

ιστορική σεισμικότητα και σεισμοτεκτονικά δεδομένα της περιοχής. Το δεύτερο στοιχείο είναι ο υπολογισμός των σεισμικών επιπτώσεων στα κτίρια και στα έργα υποδομής της εξεταζόμενης περιοχής. Χρησιμοποιήθηκαν πληροφορίες σχετικά με την τρωτότητα σε αστική κλίμακα και χρησιμοποιήθηκε ένα σύστημα γεωγραφικών πληροφοριών για την οργάνωση των δεδομένων σχετικά με τα κτίρια και τα συστήματα δικτύων (π.χ., κτίρια κατοικίας, σχολεία, στρατηγικές υποδομές, δίκτυα κοινής ωφέλειας, κλπ).

Το παραπάνω εργαλείο (QuakeIST) εφαρμόστηκε και στη παρούσα μελέτη, στην περιοχή του αστικού συγκροτήματος των Χανίων. Η πολυπλοκότητα του ανάγλυφου της πόλης αλλά και της Κρήτης γενικότερα, σε συνδυασμό με την ιστορική σημασία, την ολοένα και περισσότερο αυξανόμενη προσέλευση τουριστών και την αναπτυσσόμενη βιομηχανία/βιοτεχνία των Χανίων, καταδεικνύουν τη σημασία των αποτελεσμάτων αυτής της μελέτης, όπως επίσης και την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης της περιοχής.

Δυστυχώς, όπως και σε πολλές περιοχές γύρω από τη Μεσόγειο, παρατηρείται ανεπαρκής συγκέντρωση πληροφοριών και δεδομένων. Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με την ύπαρξη ιστορικών κατασκευών και τις πολλές αβεβαιότητες αναφορικά με τη δομική κατάσταση τους, καθιστούν τη μελέτη και προσομοίωση της περιοχής δύσκολη, και ασφαλώς οδηγούν σε αδυναμία αξιοποίησης μεγάλου μέρους των δυνατοτήτων λογισμικών όπως το QuakeIST. Παρά τις αντικειμενικές δυσκολίες, η προσεκτική προσέγγιση των ζητημάτων σε συνδυασμό με τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με πραγματικά δεδομένα από πρόσφατους σεισμούς, μπορούν να μας δώσουν αποτελέσματα αι κατευθύνσεις που είναι πολύ σημαντικές για τον περιορισμό μελλοντικών ζημιών και απωλειών.

Κεφάλαιο 2^ο: Σεισμολογία και Σεισμική Επικινδυνότητα

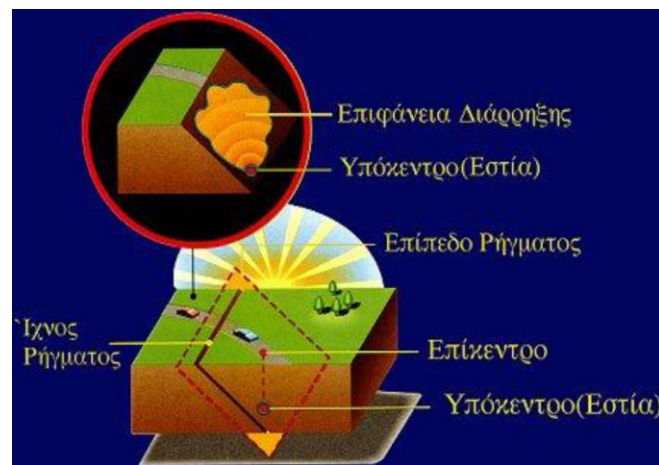
2.1. Το φαινόμενο του σεισμού

Στην αρχαιότητα υπήρχαν αρκετές ερμηνείες για το σεισμικό φαινόμενο. Χαρακτηριστικά, στη Μυθολογία αναφέρεται ότι σεισμός είναι η δόνηση που προκαλούσε η κίνηση του Εγκέλαδου μέσα στον τάφο του ενώ στην Ιαπωνία θεωρούσαν ότι ο σεισμός οφειλόταν στον κραδασμό του εδάφους από το σπαρτάρισμα του γατόψαρου. Σήμερα, η επικρατούσα αντίληψη για τον σεισμό είναι ότι η κίνηση του εδάφους οφείλεται στη θραύση πετρωμάτων, το στιγμιαίο αποτέλεσμα μιας μακροχρόνιας διαδικασίας συσσώρευσης δυναμικής ενέργειας σε ορισμένες περιοχές της Γης. Ένα φυσικό φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει πολλές απώλειες τόσο σε ανθρώπινες ζωές όσο και σε κατασκευές.

Η Σεισμολογία είναι ο επιστημονικός κλάδος της Γεωφυσικής με βασικό στόχο την παρατήρηση και μελέτη των σεισμικών φαινομένων. Σύμφωνα με τη δεσπύζουσα σήμερα επιστημονική αντίληψη, σεισμός είναι η εδαφική δόνηση που γεννιέται κατά τη παροδική διατάραξη της μηχανικής ισορροπίας των γήινων πετρωμάτων σε ένα ορισμένο μέρος της στερεάς Γης, από φυσικά αίτια που βρίσκονται στο εσωτερικό της (Παπαζάχος, Καρακαϊσής & Χατζηδημητρίου, 2005). Λόγω του σεισμού απελευθερώνεται ενέργεια στο εσωτερικό της Γης, η οποία εκδηλώνεται με τη μορφή κυμάτων και τα οποία προκαλούν τις δονήσεις αυτές.

Υπάρχουν βέβαια εδαφικές δονήσεις των οποίων τα αίτια είναι είτε φυσικά είτε τεχνητά και δεν οφείλονται στο εσωτερικό της Γης. Τέτοιες δονήσεις μπορεί να οφείλονται σε πτώση μετεωριτών, παλίρροιες, θαλάσσια κύματα κτλ. (φυσικά αίτια), ή σε μηχανές εργοστασίων, μέσα συγκοινωνίας, πυρηνικές δοκιμές κτλ. (τεχνητά αίτια). Αυτού του τύπου εδαφικές δονήσεις


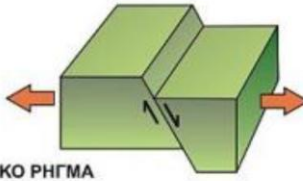
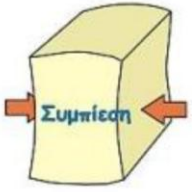
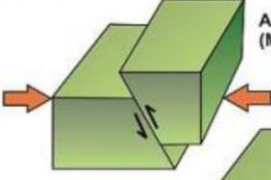
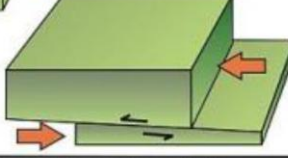
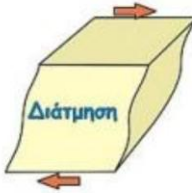
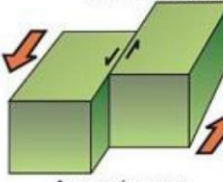
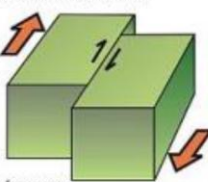
προκαλούν τον λεγόμενο εδαφικό θόρυβο και δεν θα πρέπει να συγχέονται με τις σεισμικές δονήσεις ειδικά στις σεισμικές καταγραφές.



Εικόνα 2.1: Χαρακτηριστικά σεισμικού φαινομένου (Πηγή: www.oasp.gr)

Ο χώρος που εκδηλώνεται αρχικά η διάρρηξη των πετρωμάτων (σεισμογόνος χώρος) μπορεί κατά προσέγγιση να θεωρηθεί ως σημείο και ονομάζεται εστία ή υπόκεντρο του σεισμού. Το ίχνος της κατακόρυφης προβολής της εστίας πάνω στην επιφάνεια της γης είναι το επίκεντρο, ενώ η απόστασή του από την εστία (βάθος της εστίας) λέγεται εστιακό βάθος. Οι διαρρήξεις των πετρωμάτων γίνονται πάνω σε επιφάνειες (επιφάνειες διάρρηξης), οι οποίες συνήθως θεωρούνται επίπεδες και ονομάζονται σεισμικά ρήγματα (Faults). Ανάλογα με το μηχανισμό διάρρηξης κατά μήκος του ρήγματος, αυτά διακρίνονται στα εξής κύρια είδη: Κανονικά (Normal), Ανάστροφα (Reverse) και Οριζόντιας μετατόπισης (Strike-Slip). Τα είδη αυτά φαίνονται χαρακτηριστικά στην Εικόνα 2.2.

Τα σεισμικά κύματα που ξεκινούν από την εστία και διαδίδονται μέσα από τα διάφορα στρώματα της Γης φθάνουν στους σταθμούς παρατήρησης και καταγράφονται από τα διάφορα σεισμογραφικά όργανα. Για να περιγραφεί πλήρως η κίνηση των υλικών σημείων απαιτούνται τρία είδη σεισμογραφικών οργάνων, αυτά που καταγράφουν την μετακίνηση, αυτά που καταγράφουν την περιστροφή και αυτά που καταγράφουν την παραμόρφωση. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον στη Σεισμική Μηχανική παρουσιάζουν τα σεισμογραφικά όργανα που καταγράφουν την μετακίνηση και τις παραγώγους της ως προς τον χρόνο: την ταχύτητα και κυρίως την επιτάχυνση.

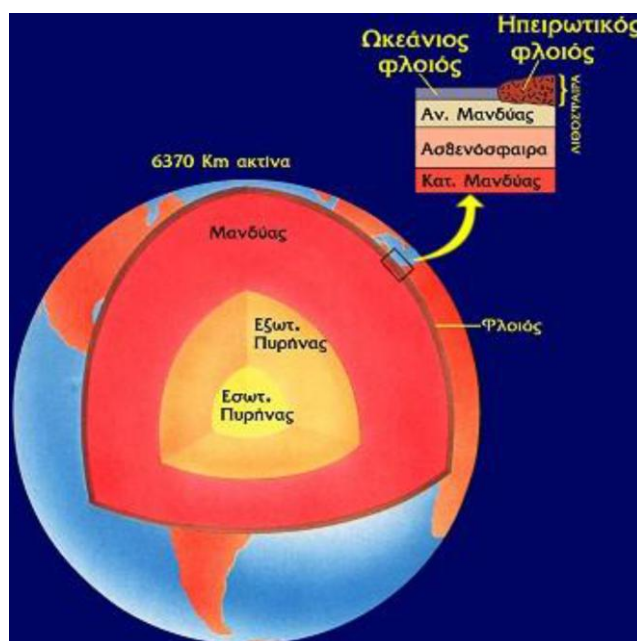
ΤΑΣΗ	ΤΥΠΟΙ ΡΗΓΜΑΤΩΝ
	
	 
	 

Εικόνα 2.2: Είδη Ρηγμάτων (Πηγή: www.geodifhs.com)

Οι Σεισμογράφοι είναι όργανα με τα οποία επιτυγχάνεται αυτόματη αλλά όχι πιστή καταγραφή της σεισμικής κίνησης. Παλαιότερα η καταγραφή αυτή, που λέγεται σεισμογράφημα, γίνεται με γραφίδα πάνω σε αιθαλωμένη ταινία ή με φωτεινή κηλίδα πάνω σε φωτογραφική ταινία. Ο σεισμογράφος αποτελείται από το εκκρεμές, το σύστημα ενίσχυσης (ή μεγέθυνσης) και το σύστημα αναγραφής. Η μάζα του εκκρεμούς πρέπει να είναι σημαντική ώστε η δύναμη της αδράνειας να υπερνικήσει τις τριβές της γραφίδας και των αρθρώσεων των μοχλών. Ωστόσο επειδή οι σεισμογράφοι δεν διέθεταν σύστημα απόσβεσης της κίνησης, το οποίο θα επανάφερε γρήγορα το εκκρεμές στη θέση ηρεμίας ώστε να ανταποκριθεί σε νέα δόνηση, οι καταγραφές τους ήταν αποτέλεσμα όχι μόνο της σεισμικής κίνησης αλλά και της αιώρησης του εκκρεμούς. Για τον πλήρη καθορισμό της μετάθεσης σε ένα σταθμό πρέπει να υπάρχουν τρεις σεισμογράφοι, ένας για την κατακόρυφη συνιστώσα και δύο για τις οριζόντιες συνιστώσες της εδαφικής κίνησης. Τα Σεισμόμετρα είναι όργανα που γράφουν με σημαντική ακρίβεια τις σεισμικές κινήσεις. Η βασική διαφορά μεταξύ σεισμομέτρου και σεισμογράφου είναι ότι το σεισμόμετρο διαθέτει συσκευή με την οποία πετυχαίνει απόσβεση της αιώρησης του εκκρεμούς και έτσι είναι δυνατή η πιστότερη αναγραφή της σεισμικής κίνησης. Οι καταγραφές των σεισμομέτρων λέγονται σεισμογράμματα.

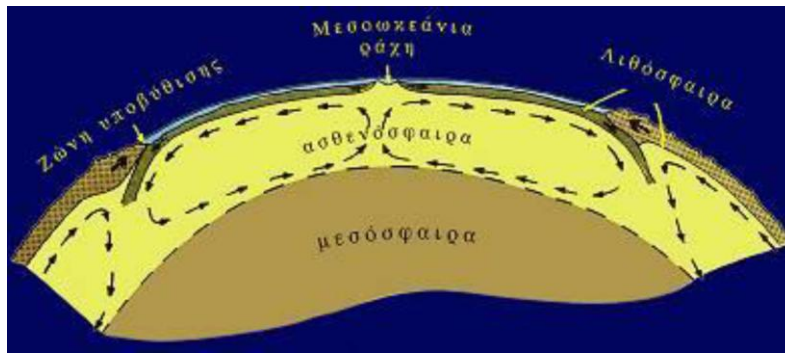
2.2. Η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών

Η λιθόσφαιρα δεν είναι ενιαία αλλά απαρτίζεται από ένα σύνολο μεγάλων και μικρότερων πλακών που ολισθαίνουν πάνω στο υποκείμενο παχύρρευστο μανδυακό υλικό (ασθενόσφαιρα) πραγματοποιώντας σχετικές μεταξύ τους κινήσεις. Οι πλάκες αυτές λέγονται λιθοσφαιρικές πλάκες. Τα αίτια κίνησής τους πιθανόν να είναι οι οριζόντιες εφαπτομενικές κινήσεις που ασκούνται στον πυθμένα τους από τα θερμικά ρεύματα μεταφοράς τα οποία δημιουργούνται στον ασθενοσφαιρικό μανδύα. Η θεωρία που ερμηνεύει ικανοποιητικά το σύνολο των γεωλογικών και γεωφυσικών παρατηρήσεων, που σχετίζονται με την ενεργό τεκτονική δράση και κατά συνέπεια και με τη σεισμική δράση, είναι αυτή που περιγράφει την κίνηση των λιθοσφαιρικών πλακών.



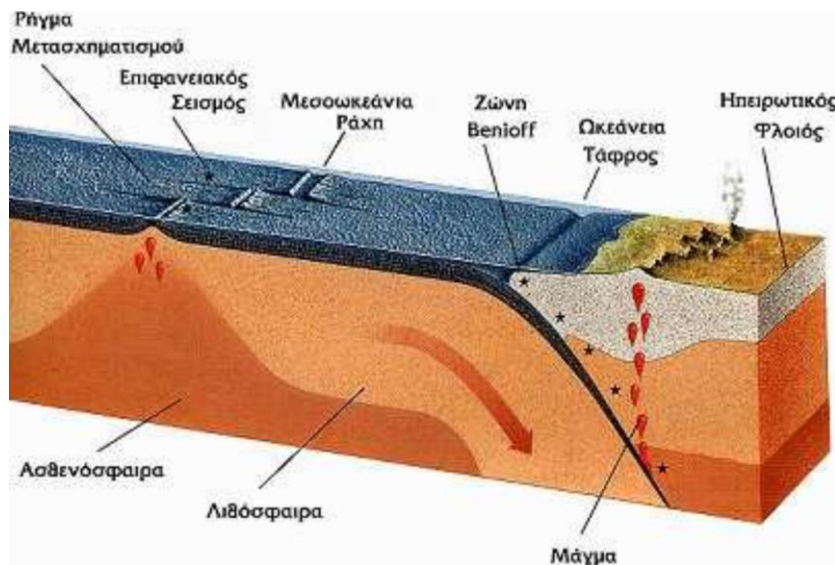
Εικόνα 2.3: Η δομή του εσωτερικού της Γης (Πηγή: www.oasp.gr)

Οι λιθοσφαιρικές πλάκες αλλού αποκλίνουν, αλλού συγκλίνουν και αλλού η μία κινείται παράλληλα - εφαπτομενικά σε σχέση με τη διπλανή της. Στις περιοχές που αποκλίνουν οι λιθοσφαιρικές πλάκες -μεσοωκεάνιες ράχεις- θερμό ασθενοσφαιρικό υλικό βγαίνει στην επιφάνεια, ψύχεται, στερεοποιείται και οδηγεί έτσι στη δημιουργία νέας λιθόσφαιρας κατά μήκος των δύο πλευρών των ράχων (π.χ., μεσοωκεάνια ράχη Ατλαντικού ωκεανού, απομάκρυνση Αμερικανικής - Αφρικανικής πλάκας).



Εικόνα 2.4: Κίνηση λιθοσφαιρικών πλακών (Πηγή: www.oasp.gr)

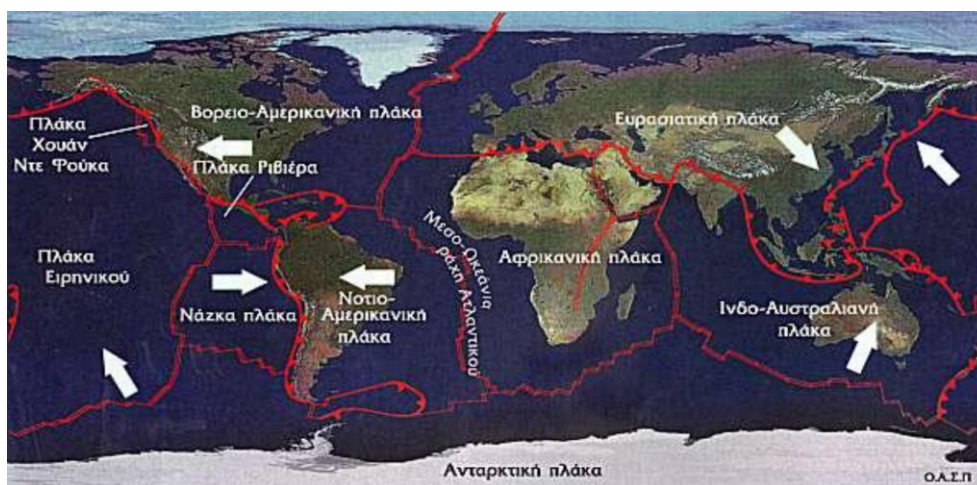
Στις περιοχές που ολισθαίνουν οριζόντια η μία πλάκα σε σχέση με την άλλη, η κίνηση γίνεται κατά μήκος κατακόρυφων ρηγμάτων μετασχηματισμού. Στην περίπτωση της σύγκλισης των πλακών η πυκνότερη από τις δύο βυθίζεται κάτω από την άλλη μέχρις ότου λιώσει η πρώτη μέσα στον θερμό μανδυακό υλικό κι έτσι καταστρέφεται λιθοσφαιρικό υλικό. Η δημιουργία νέου ωκεάνιου φλοιού στις μεσοωκεάνιες ράχες αντισταθμίζεται λοιπόν με την καταστροφή αντίστοιχης ποσότητας στις περιοχές σύγκλισης των πλακών, οπότε η συνολική επιφάνεια της Γης παραμένει “σταθερή”.



Εικόνα 2.5: Ολίσθηση και σύγκλιση λιθοσφαιρικών πλακών (Πηγή: www.oasp.gr)

Αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης των λιθοσφαιρικών πλακών είναι η αργή παραμόρφωση των πετρωμάτων στις παρυφές τους. Για τον λόγο αυτό, στα πετρώματα που βρίσκονται κοντά στις περιοχές αυτές συσσωρεύονται τεράστια ποσά δυναμικής ενέργειας (ενέργεια ελαστικής παραμόρφωσης πετρωμάτων), και αναπτύσσονται μεγάλες τάσεις που συνεχώς αυξάνουν. Όταν οι τάσεις αυξηθούν τόσο πολύ, ώστε να υπερβούν το όριο αντοχής του λιθοσφαιρικού υλικού στο σημείο αυτό επέρχεται θραύση. Ταυτόχρονα πραγματοποιείται απότομη σχετική κίνηση των δύο

τμημάτων που έχουν προκύψει κατά μία επιφάνεια έως ότου ισορροπήσουν σε νέες θέσεις. Η επιφάνεια αυτή είναι το σεισμικό ρήγμα. Τη χρονική αυτή στιγμή γεννιέται ένας σεισμός.



Εικόνα 2.6: Η Λιθόσφαιρα της Γης αποτελούμενη από επτά μεγάλες πλάκες (Αφρικανική, Ευρασιατική, Ινδο-Αυστραλιανή, Ανταρκτική, πλάκα του Ειρηνικού, Βορειο-Αμερικανική, Νοτιο-Αμερικανική) και αρκετές μικρότερες. Οι πλάκες κινούνται προς διαφορετικές διευθύνσεις (Πηγή: www.oasp.gr)

2.3. Μέγεθος σεισμού

Γίνεται αντιληπτό ότι γένεση ενός σεισμού είναι η απελευθέρωση ενέργειας στην εστία του, η οποία είχε συσσωρευτεί στο σεισμογόνο χώρο του με τη μορφή ενέργειας παραμόρφωσης των πετρωμάτων του χώρου αυτού. Μέρος της ενέργειας αυτής μετατρέπεται σε κυματική ενέργεια στην οποία οφείλονται τα σεισμικά κύματα.

Η μέτρηση της σεισμικής ενέργειας θα είχε μεγάλη σημασία γιατί θα παρείχε την δυνατότητα απόλυτης σύγκρισης και ταξινόμησης των σεισμών, αλλά δεν όμως δεν υπάρχει μέχρι σήμερα άμεσος τρόπος για την ακριβή μέτρηση αυτής. Γι' αυτόν τον λόγο οι σεισμολόγοι κατέβαλαν προσπάθεια υπολογισμού μίας ποσότητας η οποία αποτελεί κατά προσέγγιση μέτρο της ενέργειας ενός σεισμού και βασίζεται σε μετρήσεις των χαρακτηριστικών (πλάτος, περίοδος, διάρκεια κτλ.) των σεισμικών κυμάτων. Το μέτρο αυτό ονομάστηκε "Μέγεθος" του σεισμού. Είναι φανερό ότι όσο μεγαλύτερη είναι η σεισμική ενέργεια που απελευθερώνεται στην εστία ενός σεισμού, τόσο εντονότερα είναι τα σεισμικά κύματα που παράγονται από αυτόν. Μπορούμε να πούμε ότι μέγεθος M ενός σεισμού, με τη γενική σημασία του όρου, είναι ένα μέτρο της ενέργειας του σεισμού, το οποίο προσδιορίζεται με μετρήσεις παραμέτρων (πλάτος, περίοδος, διάρκεια) των σεισμικών κυμάτων που παράγονται κατά τη γένεση του σεισμού.

Για τον υπολογισμό του μεγέθους των σεισμών επινοήθηκαν διάφορες κλίμακες. Η πρώτη από τις κλίμακες αυτές και πιο γνωστή είναι: η κλίμακα τοπικού μεγέθους M_L (κλίμακα Richter - το όνομά της το πήρε από τον Ch. Richter το 1935), η οποία βασίζεται σε μετρήσεις των μέγιστων πλατών σεισμικών κυμάτων τοπικών σεισμών (περιόδου της τάξης του 1 sec), όπως αυτά καταγράφονται από τον σειсмоγράφο Wood-Anderson. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν και άλλες κλίμακες, οι σπουδαιότερες από τις οποίες είναι η κλίμακα επιφανειακού μεγέθους M_s , που βασίζεται στις μετρήσεις των επιφανειακών κυμάτων που έχουν περίοδο περίπου 20 sec. Η κλίμακα μεγέθους M_s χρησιμοποιείται για τους επιφανειακούς ή αβαθείς σεισμούς (<60km) με το πλεονέκτημα ότι μπορεί να χαρακτηρίσει σεισμούς μεγάλων επικεντρικών αποστάσεων (απόσταση σειсмоγράφου – επίκεντρου σεισμού). Επίσης, υπάρχει η κλίμακα χωρικού μεγέθους m_b που βασίζεται σε βραχείας περιόδου (1 sec) κύματα χώρου, τα οποία καταγράφονται σε μεγάλες αποστάσεις. Πρόσφατα αναπτύχθηκαν και άλλες κλίμακες μεγεθών, όπως η κλίμακα του μεγέθους διάρκειας M_t , που βασίζεται στη διάρκεια των σεισμικών κυμάτων.

Η ενέργεια που απελευθερώνεται στην εστία ενός σεισμού, διαδίδεται με τη μορφή σεισμικών κυμάτων τα οποία έχουν περιόδους που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα (από κλάσματα του δευτερολέπτου μέχρι πολλά δευτερόλεπτα). Όμως κάθε μία από τις παραπάνω κλίμακες μεγεθών βασίζεται σε σεισμικά κύματα που έχουν συχνότητες σε περιορισμένο μέρος (παράθυρο) αυτού του φάσματος και για τον λόγο αυτό τα μεγέθη των κλιμάκων αυτών αποτελούν μέτρα της ενέργειας που μεταδίδεται στα αντίστοιχα παράθυρα συχνοτήτων και όχι της ολικής ενέργειας του σεισμού. Γι' αυτόν τον λόγο επινοήθηκε η κλίμακα του μεγέθους σεισμικής ροπής M_w , η οποία βασίζεται στην έννοια της σεισμικής ροπής (M_0), που πρότεινε ο Aki (1966), και όχι σε κύματα περιορισμένου φάσματος συχνοτήτων. Σήμερα η M_w θεωρείται ως η πιο ακριβής και αξιόπιστη κλίμακα μεγέθους σεισμού και χρησιμοποιείται ευρέως από τους σεισμολόγους.

Αξίζει να αναφερθεί επίσης ότι τα μεγέθη M_L , m_b , M_s αυξάνουν όσο αυξάνεται η ενέργεια που ακτινοβολείται από τις εστίες των σεισμών μέχρι ορισμένου ορίου, το οποίο είναι σχετικά μικρό (6.0-6.5) για τα M_L , m_b , και αρκετά μεγαλύτερο (8.0) για το M_s . Έχει παρατηρηθεί ότι οι τιμές των μεγεθών αυτών δεν αυξάνουν πάνω από τα όρια αυτά, παρ' ότι η ενέργεια των σεισμών αυξάνεται, με συνέπεια οι μετρήσεις αυτών να είναι αναξιόπιστες σε περιπτώσεις μεγάλων σεισμών. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κορεσμός των κλιμάκων μεγέθους και δεν παρατηρείται στην κλίμακα μεγέθους σεισμικής ροπής M_w .

Οι σεισμοί που προκαλούν βλάβες έχουν τις περισσότερες φορές μέγεθος μεγαλύτερο από 5.5 βαθμούς της κλίμακας Richter (Παπαζάχος, Καρακαϊσης & Χατζηδημητρίου, 2005). Θα πρέπει όμως να σημειωθεί ότι οι επιπτώσεις ενός σεισμού στους ανθρώπους και στις κατασκευές (βλάβες ή και αστοχίες) εξαρτώνται εκτός από το μέγεθος και από άλλους παράγοντες, όπως το βάθος της εστίας, τη θέση του επικέντρου, το έδαφος θεμελίωσης της κατασκευής και τις τοπικές εδαφικές συνθήκες, αλλά και την τρωτότητα της κάθε κατασκευής. Το μεγαλύτερο μέγεθος σεισμού που έχει μετρηθεί έως σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα είναι 9.5 (Χιλή 1960). Για να γίνει κατανοητή η αντιστοιχία των εννοιών μέγεθος - ενέργεια που εκλύεται από έναν σεισμό, αρκεί να αναφερθεί ότι για εξαιρετικά ισχυρούς σεισμούς (με μέγεθος 8.7 – 8.9), η ενέργεια που απελευθερώνεται είναι περίπου 900 φορές μεγαλύτερη από αυτήν της ατομικής βόμβας στη Χιροσίμα.

2.4. Σεισμική ένταση

Συνήθως για την ακριβέστερη εκτίμηση των εδαφικών κινήσεων δεν επαρκούν οι ενόργανες καταγραφές, αλλά θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και να αξιοποιηθούν μακροσεισμικές παρατηρήσεις, δηλαδή οι επιπτώσεις των σεισμών στο έδαφος και τα τεχνικά έργα. Οι μακροσεισμικές αυτές παρατηρήσεις συνιστούν μία από τις παλαιότερες τεχνικές για τη μελέτη ενός σεισμού. Η σεισμική ένταση (Seismic Intensity) αποτελεί έναν έμμεσο τρόπο εκτίμησης της σφοδρότητας των σεισμικών εδαφικών κινήσεων σε μία θέση από τη μελέτη των μακροσεισμικών αποτελεσμάτων του σεισμού. Για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποιείται μία εμπειρική ποσότητα κωδικοποίησης των αποτελεσμάτων αυτών, που ονομάζεται ένταση (I) του σεισμού σε συγκεκριμένο τόπο.

Σε αντίθεση με το μέγεθος (M) του σεισμού, που εκφράζει την ενέργεια που απελευθερώνεται από αυτόν, η ένταση (I) του σεισμού εκφράζει τις επιπτώσεις αυτού στον άνθρωπο, τα υλικά αντικείμενα και τις κατασκευές αξιοποιώντας τις μακροσεισμικές παρατηρήσεις σε μία περιοχή. Οι κυριότεροι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η σεισμική ένταση σε μία τοποθεσία είναι:

- Οι ιδιότητες της σεισμικής εστίας (μέγεθος, σεισμική ροπή, μηχανισμός γένεσης, κτλ).
- Οι ιδιότητες του μέσου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, το οποίο βρίσκεται μεταξύ της εστίας του σεισμού και της τοποθεσίας (επικεντρική απόσταση, συντελεστής απόσβεσης, κτλ).

- Οι τοπικές γεωλογικές συνθήκες (κατηγορία εδάφους, σκληρότητα του εδάφους, μορφολογία, εδαφικές διαρρήξεις, κτλ.).
- Ο τύπος των κατασκευών (τύπος και ποιότητα υλικών, δυναμικά χαρακτηριστικά ταλάντωσης, κτλ.).

Για τον καθορισμό της έντασης σε μία περιοχή, έχουν κατά καιρούς προταθεί πολλές κλίμακες, εμπειρικές κατά βάση, όπου κάθε μία αποτελείται από ορισμένους βαθμούς μακροσεισμικής έντασης που αναπαριστούνται με τους λατινικούς αριθμούς I, II, III, IV, κτλ. Οι πιο διαδεδομένες από αυτές είναι η τροποποιημένη 12βάθμια κλίμακα Mercalli (Modified Mercalli, MM, 1931), η επίσης 12βάθμια MSK (1964) που προτάθηκε από τους Medvedev, Sponheuer, Karnik και η 8βάθμια JMA (Japanese Meteorological Agency) που χρησιμοποιείται από τους Ιάπωνες.

Ιδιαίτερα στην Ελλάδα, η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη κλίμακα μέχρι πρότινος ήταν η MM. Στην Εικόνα 2.7 φαίνονται χαρακτηριστικά οι συνέπειες για κάθε βαθμό της κλίμακας MM οι οποίες αναλύονται ακολούθως στον Πίνακα 2.1. Το 1992 προτάθηκε σε Ευρωπαϊκό επίπεδο μία νέα κλίμακα που αποτελεί εξέλιξη της MSK προσαρμοσμένη στα ευρωπαϊκά δεδομένα. Η κλίμακα αυτή είναι η EMS (European Macroseismic Scale), η οποία το 1998 υιοθετήθηκε από το Συμβούλιο της Ευρώπης και πλέον είναι γνωστή ως EMS-98 (European Commission, Grünthal (ed.), 1998).



Εικόνα 2.7: Κλίμακα Έντασης MM (Πηγή: ΟΑΣΠ)

Οι παραπάνω κλίμακες έχουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους με αποτέλεσμα η μετατροπή από τη μία κλίμακα στην άλλη να αποτελεί ένα δύσκολο έργο που πολλές φορές μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένες εκτιμήσεις. Πάντως η σύγκριση ανάμεσα στις MM και MSK έδειξε ότι γενικά δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, αλλά μεγάλες εντάσεις στην MSK – 64 ήταν ελαφρώς υπερεκτιμημένες. Με την εφαρμογή της EMS-98, που σε μεγάλο βαθμό είναι ίδια με

την MSK – 64, λύνονται αρκετά θέματα ανομοιογένειας των κλιμάκων έντασης, τουλάχιστον σε Ευρωπαϊκό επίπεδο. Μία σύγκριση των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων κλιμάκων παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.2 (Τσελέντης 1997). Βέβαια, είναι γεγονός ότι μία ενιαία παγκόσμια κλίμακα δεν θα ήταν εύκολα εφαρμόσιμη, γιατί τα κριτήρια της έντασης, για να γίνουν εφαρμόσιμα, πρέπει να εκφράζονται με τρόπο ώστε να συμφωνούν με τις τοπικές συνθήκες κατασκευών, οι οποίες ποικίλουν πολύ από τόπο σε τόπο.

Πίνακας 2.1: Τροποποιημένη κλίμακα σεισμικής έντασης Mercalli, MMI-Modified Mercalli Intensity (Πηγή: Σπυράκος, 2010)

MMI	Χαρακτηρισμός	Σύντομη Περιγραφή Συνεπειών
I	Ανεπαίσθητος	Μπορεί να γίνει αντιληπτός από ανθρώπους μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις
II	Ελάχιστα Αισθητός	Μπορεί να γίνει αντιληπτός από ανθρώπους που βρίσκονται στους ανώτερους ορόφους κτιρίων
III	Ασθενής	Αισθητός (συνήα όχι ως σεισμός) σε ανώτερους ορόφους κτιρίων, πιθανόν σε σταματημένα οχήματα
IV	Μετρίας Εντάσεως	Αισθητός κυρίως σε όσους βρίσκονται στο εσωτερικό κτιρίων, εάν συμβεί νύχτα μπορεί να ξυπνήσει κάποιους, προκαλεί τριγμούς σε τοίχους κτιρίων και κροτάλισμα πορσελάνινων ή γυάλινων σκευών
V	Σχετικά Ισχυρός	Αντιληπτός σχεδόν από όλους, μπορεί να προκαλέσει σπάσιμο γυάλινων σκευών και να θέσει σε κίνηση μεγάλες καμπάνες
VI	Ισχυρός	Αντιληπτός από όλους, ορισμένοι εγκαταλείπουν το εσωτερικό κτιρίων, σπάσιμο σκευών, μετακίνηση βαρέων επίπλων, ίσως ελαφρές βλάβες σε διακοσμητικά στοιχεία κτιρίων
VII	Πολύ Ισχυρός	Δύσκολο να παραμείνει κανείς όρθιος, ανεπαίσθητες βλάβες σε σύγχρονα κτίρια με καλή ποιότητα κατασκευής, μέτριες σε παλαιότερα κτίρια, πιθανόν σημαντικές σε παλιά κτίρια κακής ποιότητας κατασκευής, αισθητός και στους οδηγούς οχημάτων
VIII	Προκαλεί Βλάβες	Μέτριες βλάβες σε σύγχρονα κτίρια, σημαντικές σε παλαιότερα κτίρια, σοβαρές σε παλιά κτίρια κακής ποιότητας κατασκευής, πιθανές πτώσεις μνημείων, στοιβάδων προϊόντων κτλ.
IX	Προκαλεί Πολύ Σοβαρές Βλάβες	Γενικευμένος πανικός, σημαντικές βλάβες σε σύγχρονα κτίρια, τα οποία πιθανόν να αποκλίνουν από την κατακόρυφο μετά το πέρας του σεισμού, σοβαρές βλάβες στα υπόλοιπα κτίρια με μερική κατάρρευση σε αρκετές περιπτώσεις
X	Καταστροφικός	Καταστροφή των περισσότερων κτιρίων από σκυρόδεμα και τοιχοποιία, λυγισμός στις σιδηροδρομικές τροχιές.
XI	Πολύ Καταστροφικός	Ελάχιστες κατασκευές ίσως παραμένουν όρθιες, κατάρρευση γεφυρών, σοβαρός λυγισμός στις σιδηροδρομικές τροχιές
XII	Καθολικά Καταστροφικός	Ολική καταστροφή του δομημένου περιβάλλοντος. Η επιφάνεια του εδάφους διαστρεβλώνεται, αντικείμενα πετάγονται στον αέρα κατά τη διάρκεια της κίνησης, μεγάλα βραχίδια τεμάχια αποκολλούνται.

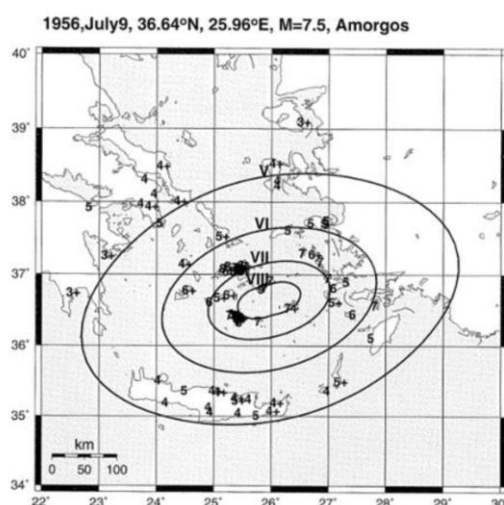
Αξίζει να σημειωθεί επίσης, ότι οι παραπάνω κλίμακες επικεντρώνονται πρωτίστως στις συνέπειες της σεισμικής δόνησης στους ανθρώπους, στα υλικά αντικείμενα και στις κατασκευές. Οι αναφορές για τις επιδράσεις στο φυσικό περιβάλλον είναι σχετικά περιορισμένες και για αυτό το λόγο έγινε προσπάθεια τα τελευταία 15 χρόνια για τη θέσπιση μίας μακροσεισμικής κλίμακας έντασης που θα αφορά και θα περιγράφει ακριβώς αυτές τις συνέπειες ενός σεισμικού γεγονότος στη φύση δηλαδή στο έδαφος, τις υδάτινες επιφάνειες κτλ. Προϊόν αυτής της προσπάθειας είναι η κλίμακα ESI 2007 (Environmental Seismic Intensity scale) (Michetti et al., 2007) που είναι

δωδεκαβάθμια και συνεργασία με τις υπόλοιπες κλίμακες έντασης. Ο στόχος είναι με την κλίμακα ESI 2007 να αποτυπωθούν οι επιπτώσεις της σεισμικής διέγερσης στο φυσικό περιβάλλον, αλλά και από τις παρατηρήσεις της κατάστασης του γεωμορφολογίας μίας περιοχής να μπορούν να εξαχθούν συμπεράσματα για τις πιθανές σεισμικές δονήσεις που αυτή έχει υποστεί (Berzhinskii, 2010). Ιδιαίτερα χρήσιμη βέβαια, φαίνεται να είναι η ESI 2007 όταν δεν επαρκούν ή δεν υπάρχουν καθόλου παρατηρήσεις που να προέρχονται από τον άνθρωπο και γενικότερα το δομημένο περιβάλλον και μάλιστα για εντάσεις συνήθως μεγαλύτερες του βαθμού ΙΧ.

Πίνακας 2.2: Συσχέτιση των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων κλιμάκων έντασης (Πηγή Τσελέντης, 1997)

ΚΛΙΜΑΚΑ	ΒΑΘΜΟΙ ΕΝΤΑΣΗΣ											
MSK-64/EMS-98	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
MM	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
JMA	1	2	3	4	5	6	7					

Τέλος, για την αναπαράσταση της γεωγραφικής κατανομής των μακροσεισμικών εντάσεων με απλό και παραστατικό τρόπο, χρησιμοποιούνται οι ισόσειστες καμπύλες. Αυτές είναι καμπύλες που χωρίζουν μια ευρύτερη γεωγραφική περιοχή σε περιοχές ίδιας έντασης. Οι ισόσειστες παρουσιάζουν συνήθως διάφορα ακανόνιστα σχήματα που γίνονται περισσότερα πολύπλοκα, όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των μακροσεισμικών δεδομένων.



Εικόνα 2.8: Παράδειγμα Ισόσειστων καμπύλων για τον σεισμό της Αμοργού το 1956 (Πηγή: <http://earthquake-now.blogspot.gr>)

2.5. Σεισμική τρωτότητα

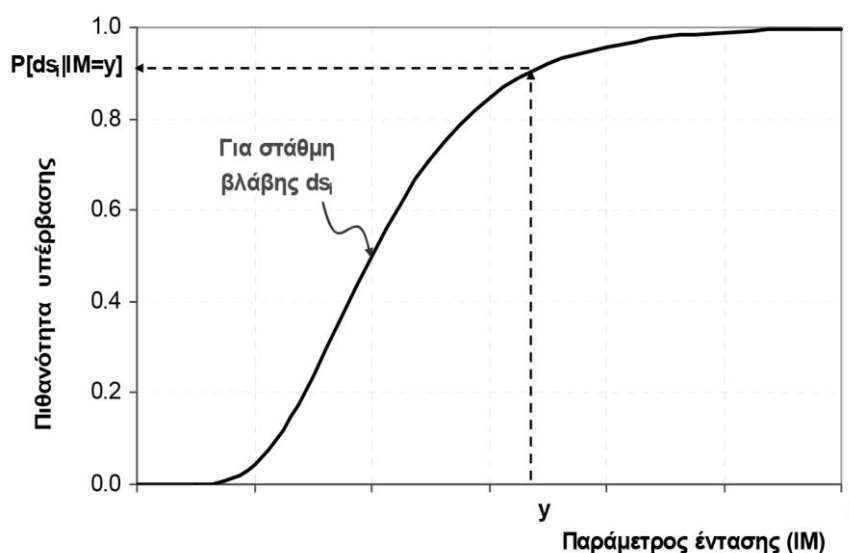
Η σεισμική διακινδύνευση εξαρτάται από την τρωτότητα του υπό μελέτη στοιχείου σε σεισμική φόρτιση και τη σεισμική επικινδυνότητα της περιοχής όπου αυτό βρίσκεται. Οι επιπτώσεις καθορίζονται από τη σημασία του στοιχείου, η οποία σχετίζεται με τη σημαντικότητα και το λειτουργικό ρόλο εντός του δικτύου. Η αποτίμηση της τρωτότητας συνίσταται στην ποσοτικοποίηση του ενδεχόμενου βαθμού βλάβης ως συνάρτηση της στάθμης της σεισμικής έντασης. Στο πλαίσιο μελέτης της σεισμικής διακινδύνευσης ενός δικτύου, ο προσδιορισμός της τρωτότητας κάθε συνιστώσας γίνεται μέσω κατάλληλων συναρτήσεων ή δεικτών τρωτότητας (Αργυρούδης 2010).

2.5.1. Καμπύλες τρωτότητας

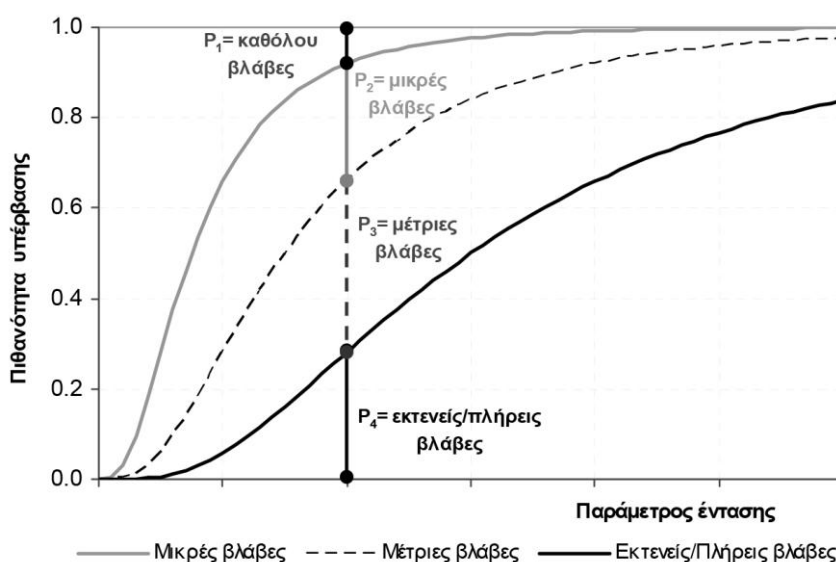
Αποτελούν το πλέον εύχρηστο εργαλείο για την αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης ενός οδικού δικτύου (Coburn and Spence 2002, Pitilakis et al. 2006, Barbat et al. 2006). Δίνουν την πιθανότητα το υπό εξέταση στοιχείο να βρίσκεται ή να έχει υπερβεί μια δεδομένη στάθμη βλάβης (π.χ., μικρές, μέτριες, εκτενείς, πλήρεις βλάβες) σε συγκεκριμένη σεισμική ένταση. Σημαντική είναι η τυπολογική κατηγοριοποίηση της κάθε συνιστώσας, καθώς γίνεται η παραδοχή ότι οι κατασκευές με παρόμοια τεχνικά χαρακτηριστικά αναμένεται να παρουσιάζουν παρόμοια απόκριση σε ίδια σεισμική δράση, οπότε οι καμπύλες τρωτότητας διαφοροποιούνται για την κάθε τυπολογική κατηγορία. Για την εφαρμογή τους δεν απαιτείται μεγάλος όγκος δεδομένων, ενώ ενδείκνυνται στην περίπτωση εκτεταμένων δικτύων, οπότε προσδιορίζεται με σχετικά απλό και γρήγορο τρόπο η πιθανοτική κατανομή των αναμενόμενων βλαβών και τελικά η διακινδύνευση πολυάριθμων εκτιθέμενων σε κίνδυνο στοιχείων, για ένα ή περισσότερα σεισμικά σενάρια.

Η απόκριση της κάθε συνιστώσας συνδέεται με τη σεισμική διέγερση μέσω μιας κατάλληλης παραμέτρου περιγραφής της σεισμικής κίνησης, όπως η μέγιστη τιμή της εδαφικής επιτάχυνσης (PGA) ή ταχύτητας (PGV), οι αντίστοιχες φασματικές τιμές τους σε συγκεκριμένες περιόδους (PSA) ή η μόνιμη εδαφική μετακίνηση λόγω εδαφικής αστοχίας (PGD). Λαμβάνεται έτσι υπόψη η πιο κρίσιμη παράμετρος της εδαφικής κίνησης για τον καθορισμό του επιπέδου αστοχίας. Επιπλέον, η διάκριση της αστοχίας σε διαφορετικές στάθμες που περιγράφονται ποιοτικά ή με κριτήρια λειτουργικότητας, σε συνδυασμό με την πιθανοτική μορφή των αποτελεσμάτων, εξυπηρετεί την εκτίμηση των επιπτώσεων των δυνητικών βλαβών ή αστοχιών. Μια τέτοια διάκριση προσφέρεται

για την ορθολογική διαχείριση του σεισμικού κινδύνου από τους αρμόδιους φορείς. Οι καμπύλες τρωτότητας είναι δυνατό να εκφραστούν με συναρτήσεις σωρευτικής κατανομής, όπως κανονική, λογαριθμοκανονική, διωνυμική ή κατανομή βήτα. Στο Γράφημα 2.1 δίνεται η γραφική απεικόνιση μιας ενδεικτικής καμπύλης τρωτότητας. Οι πιθανότητες να βρίσκεται το υπό μελέτη στοιχείο σε κάθε στάθμη βλάβης (ds_i), απεικονίζονται στο Γράφημα 2.2 και υπολογίζονται μέσω των πιθανοτήτων υπέρβασης (Αργυρούδης 2010).



Γράφημα 2.1: Παράδειγμα καμπύλης τρωτότητας (Πηγή: Αργυρούδης 2010)



Γράφημα 2.2: Πιθανότητες υπέρβασης και εμφάνισης των σταθμών βλάβης στις καμπύλες τρωτότητας (Πηγή: Αργυρούδης 2010)

2.5.2. Προσδιορισμός αναμενόμενων βλαβών

Συχνά, εκτός από την εκτίμηση της πιθανότητας υπέρβασης ή εμφάνισης κάθε στάθμης βλάβης σε δεδομένη σεισμική ένταση, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της πιθανότερης ή αναμενόμενης βλάβης. Με βάση την τελευταία πραγματοποιούνται αναλύσεις για την αποτίμηση και διαχείριση της συνολικής διακινδύνευσης της εξεταζόμενης περίπτωσης. Ως πιθανότερη βλάβη ορίζεται καταρχήν αυτή που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης. Κατά άλλη προσέγγιση η αναμενόμενη βλάβη υπολογίζεται ως σταθμισμένη βλάβη, λαμβάνοντας ως συντελεστές βαρύτητας τις επιμέρους πιθανότητες εμφάνισης (Kiremidjian et al. 2006).

Εναλλακτικά, οι αναμενόμενες βλάβες εκφράζονται μέσω της διακύμανσης του οικονομικού δείκτη βλάβης (ή δείκτη απωλειών), δηλαδή του λόγου κόστους αποκατάστασης προς το κόστος ανακατασκευής. Σε αυτήν την περίπτωση υπολογίζεται μια σταθμισμένη βλάβη με βάση τις κεντρικές τιμές του δείκτη απωλειών, λαμβάνοντας ως συντελεστές βαρύτητας τις επιμέρους πιθανότητες εμφάνισης (Stergiou and Kiremidjian 2006). Σε μια άλλη εκδοχή, η αναμενόμενη βλάβη ορίζεται ως η δυσμενέστερη στάθμη βλάβης για την οποία η πιθανότητα υπέρβασης υπολογίστηκε ίση ή μεγαλύτερη με ένα συγκεκριμένο όριο (Pitilakis et al. 2010, Azevedo et al. 2010).

Οι καμπύλες τρωτότητας παρέχουν μια πιθανοτική εκτίμηση των αναμενόμενων βλαβών, επομένως υπεισέρχεται η στατιστική αβεβαιότητα που σχετίζεται με την εγγενή τυχαιότητα εμφάνισης της κάθε στάθμης βλάβης. Για την προσέγγιση αυτής της αβεβαιότητας εφαρμόζεται συνήθως η μέθοδος Monte Carlo, οπότε παράγονται πολλές τυχαίες τιμές πιθανοτήτων (μεταξύ 0 και 1), οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες υπολογισμένες τιμές εμφάνισης της κάθε στάθμης βλάβης, ώστε να καθορισθεί το ιστόγραμμα συχνοτήτων βλάβης για μεγάλο αριθμό προσομοιώσεων και τελικά η επικρατούσα ή πιθανότερη βλάβη. Τέτοιου τύπου προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται κατά την ανάλυση σεισμικής τρωτότητας ενός δικτύου κοινής ωφέλειας (π.χ., Shinozuka et al. 2003a, Αλεξούδη 2005, Goretti 2005).

Είναι γενικά αποδεκτό ότι τα αποτελέσματα των μελετών αποτίμησης απωλειών εξαιτίας του σεισμικού κινδύνου δεν είναι δυνατόν να παρουσιασθούν με πλήρη βεβαιότητα, δηλαδή δεν θεωρούνται ως αιτιοκρατικά. Οι αβεβαιότητες ενυπάρχουν σε κάθε μεθοδολογία αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης (NIBS 1999). Πηγάζουν από ελλιπή επιστημονική γνώση αναφορικά με τους σεισμούς και την επίδρασή τους στο δομημένο περιβάλλον, από προσεγγίσεις και απλοποιήσεις -οι οποίες όμως είναι απαραίτητες στο πλαίσιο αναλύσεων μεγάλης κλίμακας-,

από ατελείς ή ανακριβείς βάσεις δεδομένων για τα εκτιθέμενα σε σεισμικό κίνδυνο στοιχεία ή ακόμη για δημογραφικές και οικονομικές παραμέτρους. Όλοι αυτοί οι παράγοντες συντελούν στη διακύμανση της αβεβαιότητας των εκτιμώμενων κάθε φορά απωλειών.

Το επίπεδο και η ποσότητα των απαιτούμενων πληροφοριών εξαρτώνται από τη διαθεσιμότητα δεδομένων, εργαλείων και πόρων, τον στόχο της ανάλυσης και το είδος της απόφασης που στη συνέχεια πρόκειται να ληφθεί. Γενικά, η βελτίωση της ποιότητας και ακρίβειας των δεδομένων οδηγεί σε μείωση της αντίστοιχης αβεβαιότητας, ωστόσο θα πρέπει να γίνεται ισόρροπα και αναλογικά προς τη σχετική επιρροή του κάθε επιμέρους βήματος στο τελικό αποτέλεσμα.

Οι αβεβαιότητες που υπεισέρχονται σε όλα τα βήματα της ανάλυσης σεισμικής διακινδύνευσης διακρίνονται σε αυτές που ενυπάρχουν στα φυσικά μέσα (aleatory) ανεξάρτητα από την ακρίβεια των μετρήσεων, και σε αυτές που οφείλονται στην ατελή γνώση (epistemic). Στην πρώτη κατηγορία των τυχηματικών αβεβαιοτήτων κατατάσσονται όσες σχετίζονται με φυσικά φαινόμενα (π.χ., προσδιορισμός σεισμικής κίνησης ή θέσεις επικέντρων και παράμετροι μελλοντικών σεισμών). Επίσης, οι αβεβαιότητες που συνδέονται με ανθρώπινες δραστηριότητες, (π.χ., στην περίπτωση τεχνικών έργων, οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών).

Στη δεύτερη κατηγορία των επιστημικών αβεβαιοτήτων εντάσσονται αυτές που σχετίζονται με τις παραδοχές και απλοποιήσεις που γίνονται κατά την προσομοίωση (π.χ., γεωμετρία ρήγματος, επιλογή σεισμικών κινήσεων εισαγωγής, προσομοίωμα κατασκευής). Ως τέτοιες χαρακτηρίζονται και οι αβεβαιότητες εξαιτίας περιορισμένου στατιστικού δείγματος (π.χ., αποτελεσμάτων ανάλυσης της απόκρισης κατασκευών, εμπειρικών δεδομένων), καθώς και οι αβεβαιότητες που συνδέονται με σφάλματα πειραματικών διατάξεων, οργάνων ή άλλων τυχαίων μετρητικών σφαλμάτων. Οι τυχηματικές αβεβαιότητες συνήθως δεν είναι εύκολο να μειωθούν, ενώ ενδέχεται να αυξηθούν όταν προστίθενται επιπλέον δεδομένα. Οι επιστημικές αβεβαιότητες, από την άλλη, είναι δυνατόν να μειωθούν όσο οι γνώσεις, τα δεδομένα και τα εργαλεία βελτιώνονται.

Στην αποτίμηση της σεισμικής διακινδύνευσης ενός συστήματος ή δικτύου, οι πιο σημαντικές αβεβαιότητες σχετίζονται με τα παρακάτω:

- Στοιχεία των βάσεων δεδομένων και τυπολογικός χαρακτηρισμός των επιμέρους συνιστωσών.
- Ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας και σεισμικές κινήσεις εισαγωγής.

-
- Αποτίμηση της απόκρισης της κάθε συνιστώσας σε σεισμικές δράσεις.
 - Ορισμός των σταθμών βλάβης.
 - Συσχέτιση των σταθμών βλάβης με τον βαθμό απωλειών (άμεσων, έμμεσων) και τη λειτουργικότητα της κάθε συνιστώσας.
 - Πληρότητα και αξιοπιστία εμπειρικών δεδομένων.
 - Προσδιορισμός του κόστους και της πορείας αποκατάστασης των βλαβών.

Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει προσπάθειες για τον προσδιορισμό, ταξινόμηση και ανάλυση των αβεβαιοτήτων. Ενδεικτικά αναφέρεται η εργασία των Wen et al. (2003), στην οποία περιγράφονται οι αβεβαιότητες και ο τρόπος αντιμετώπισής τους με βάση διαθέσιμες μεθόδους ανάλυσης, καθώς και πιο πρόσφατες εργασίες (Kwon and Elnashai 2006, Pinto 2007, Ellingwood and Kinali 2009, Zentner 2010), όπου επιχειρείται ο συνυπολογισμός των επιμέρους αβεβαιοτήτων μέσω στατιστικών μεθόδων κατά την ανάλυση της τρωτότητας κατασκευών. Εξάλλου, έχουν προταθεί εναλλακτικές μέθοδοι αποτίμησης της δομικής τρωτότητας, ώστε να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσομοίωση της σεισμικής συμπεριφοράς και να μειωθούν οι αντίστοιχες αβεβαιότητες. Ωστόσο, υπολείπονται αρκετές προσπάθειες για την αξιολόγηση και ποσοτικοποίηση όλων των πηγών αβεβαιοτήτων.

Οι παράμετροι που χαρακτηρίζονται από τυχαματικές αβεβαιότητες λαμβάνονται συνήθως υπόψη σε τεχνικές τύπου Monte Carlo με βάση την πιθανοτική κατανομή τους, η οποία περιγράφεται είτε από στατιστικά δεδομένα (π.χ., για τις μηχανικές ιδιότητες των υλικών) είτε από εκτιμήσεις (π.χ., για την περιγραφή των δεικτών βλάβης). Στοιχεία για τη διασπορά γεωτεχνικών και κατασκευαστικών παραμέτρων δίνονται για παράδειγμα από τους Harr (1977, 1987) και Phoon and Kulhawy (1999). Όσον αφορά τις επιστημονικές αβεβαιότητες αυτές εξετάζονται μέσω της χρήσης λογικών δένδρων (logic trees), πιθανοτικού συμπερασμού κατά Bayes (Bayesian inference methods) ή υποθέτοντας ότι επηρεάζουν τη μέση τιμή μιας μεταβλητής (π.χ., της αντοχής) (Αργυρούδης 2010).

2.5.3. Ταξινόμηση των μεθόδων αποτίμησης της τρωτότητας

Οι μέθοδοι αποτίμησης της τρωτότητας διακρίνονται με βάση την προσέγγιση που ακολουθείται για την ανάπτυξή τους, στις εξής κατηγορίες:

- *Εμπειρικές μέθοδοι.* Στην προσέγγιση αυτή χρησιμοποιούνται στοιχεία βλαβών που παρατηρήθηκαν σε προηγούμενους σεισμούς προκειμένου να εκτιμηθούν συναρτήσεις ή

δείκτες τρωτότητας ύστερα από στατιστική επεξεργασία (π.χ., για την περίπτωση γεφυρών από τους Basöz and Kiremidjian 1998, Yamazaki et al. 2000, Shinozuka et al. 2003b, Kim 1993, Kawashima and Unjoh 1990). Οι συγκεκριμένες μέθοδοι αποδίδουν την πλέον ρεαλιστική εικόνα της απόκρισης των κατασκευών, ωστόσο εξαρτώνται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του σεισμοτεκτονικού, γεωτεχνικού και δομημένου περιβάλλοντος της περιοχής απ' όπου προέρχονται οι παρατηρήσεις, οπότε όταν εφαρμόζονται σε άλλες περιοχές οφείλεται σχετική επιφύλαξη και έλεγχος της αξιοπιστίας τους. Μία ακόμη ιδιαιτερότητα είναι ότι τα στοιχεία των παρατηρήσεων συνήθως δεν είναι επαρκή για όλες τις στάθμες σεισμικών εντάσεων και κυρίως για τις μεγαλύτερες εντάσεις, με αποτέλεσμα να μην είναι πάντοτε δυνατή η ανάπτυξη ολοκληρωμένων σχέσεων τρωτότητας. Μία ακόμη αδυναμία είναι ότι η περιγραφή των βλαβών για τον ίδιο ή διαφορετικούς σεισμούς, συχνά δεν είναι πλήρης και ομογενής, ακολουθώντας κοινές παραδοχές, συμβατές προς μια ενιαία τυπολογική ταξινόμηση και επομένως οι εξαγόμενες σχέσεις τρωτότητας δεν είναι αρκετά αξιόπιστες. Τέλος, τα απαιτούμενα δεδομένα και παράμετροι περιγραφής της σεισμικής κίνησης δεν πηγάζουν συνήθως από καταγραφές, αλλά εκτιμώνται με εμπειρικές σχέσεις με αποτέλεσμα την ύπαρξη επιπλέον αβεβαιοτήτων.


- *Μέθοδοι βασισμένες στην κρίση του μηχανικού.* Πρόκειται για μια μεθοδολογία η οποία βασίζεται στην έμπειρη κρίση μηχανικών για την εξαγωγή συμπερασμάτων σε επίπεδο σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών διαφορετικής τυπολογίας. Βασίζεται στη στατιστική επεξεργασία της (ποσοτικοποιημένης) “κρίσης” έμπειρων μηχανικών για τη συμπεριφορά της κατασκευής, με αποτέλεσμα τη δημιουργία μητρώων πιθανότητας βλάβης και τελικά τον προσδιορισμό καμπυλών τρωτότητας για κάθε τυπολογική κατηγορία. Σε αυτήν τη κατηγορία ανήκουν οι μεθοδολογίες που αναπτύχθηκαν στην Ιταλία από τους Menoni et al. (2002), στις ΗΠΑ από το Applied Technology Council (ATC 1985 και ATC 1991), και πιο πρόσφατα από το Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center (Porter 2004) για την περίπτωση των γεφυρών. Σε κάποιες περιπτώσεις η συγκεκριμένη προσέγγιση τείνει να υπερεκτιμήσει τις σεισμικές βλάβες (Anagnos et al. 1995).
- *Αναλυτικές μέθοδοι.* Η σεισμική συμπεριφορά μιας κατασκευής και επομένως η τρωτότητα είναι δυνατό να εκτιμηθεί με τη βοήθεια αναλυτικών προσομοιωμάτων, από τα οποία μέσω κατάλληλης συσχέτισης των υπολογιζόμενων μεγεθών απόκρισης με το βαθμό βλάβης μπορούν να προκύψουν καμπύλες τρωτότητας. Η διαδικασία ανάλυσης περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια: α) καθορισμός της εισαγόμενης σεισμικής κίνησης,

β) προσομοίωση της κατασκευής, γ) καθορισμός του δείκτη και των σταθμών βλάβης, δ) εκτίμηση των αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στη σεισμική απαίτηση και αντοχή της κατασκευής, καθώς και στον ορισμό του δείκτη και των σταθμών βλάβης, ε) υπολογισμός των καμπυλών τρωτότητας με βάση τα αποτελέσματα της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής και την κατανομή των δεικτών βλάβης. Οι έως τώρα αδυναμίες των συγκεκριμένων μεθόδων έγκεινται κυρίως στην αξιοπιστία των εργαλείων αριθμητικής ανάλυσης και προσομοίωσης των κατασκευών και στις αβεβαιότητες που υπεισέρχονται στα επιμέρους στάδια.

- *Υβριδικές μέθοδοι.* Αποτελούν συνδυασμό των παραπάνω, καθώς χρησιμοποιούνται πειραματικά αποτελέσματα ή εμπειρικά δεδομένα από προηγούμενους σεισμούς προκειμένου να βελτιωθούν σχέσεις που προέκυψαν με μεθόδους αναλυτικές ή βασισμένες στην κρίση του μηχανικού. Κατ' αυτόν τον τρόπο αντισταθμίζεται η έλλειψη εμπειρικών δεδομένων, η υποκειμενικότητα των μεθόδων που βασίζονται στην έμπειρη κρίση και οι αδυναμίες των αναλυτικών προσομοιωμάτων.

Στον Πίνακα 2.3 γίνεται μια ποιοτική σύγκριση των μεθόδων αποτίμησης τρωτότητας (Αργυρούδης 2010).

Πίνακας 2.3: Σύγκριση μεταξύ τυπικών μεθόδων εκτίμησης της τρωτότητας (Πηγή: Αργυρούδης 2010)

Μέθοδοι εκτίμησης τρωτότητας	Υβριδικές		
	Εμπειρικές	Έμπειρης κρίσης	Αναλυτικές
Προσπάθεια / Ακρίβεια	Χρόνος και υπολογιστικό κόστος /Ακρίβεια εκτίμησης 		
Εφαρμογή	Ομάδες κατασκευών	Μεμονωμένη/ Ομάδες	Μεμονωμένη κατασκευή

Κεφάλαιο 3^ο: Γεωγραφικά Συστήματα

Πληροφοριών

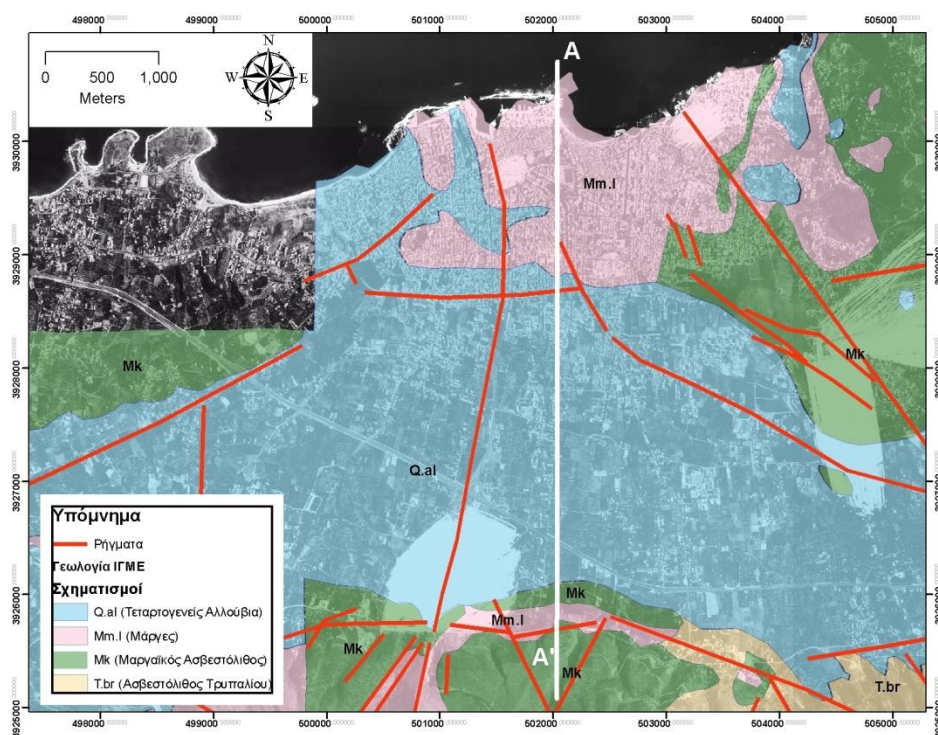
Η περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής ορίζεται από το πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης των Χανίων και την ευρύτερη περιαστική περιοχή και καταλαμβάνει συνολική επιφάνεια 28 τετραγωνικών χιλιομέτρων.

3.1. Γεωλογία της περιοχής ενδιαφέροντος

Η Κρήτη αποτελεί ίσως ένα από τα σημαντικότερα ευρωπαϊκά γεωλογικά εργαστήρια, καθώς στη γεωλογία της, στο ανάγλυφο της και στη μορφοτεκτονική της, απεικονίζονται οι μεταβολές και εξελίξεις του Ελληνικού ορογενούς (καθώς συνδέεται άμεσα με την συνολική γεωλογική δομή της Ελλάδας) κατά την Αλπική ορογένεση. Επιπλέον, η πολυπλοκότητα της γεωλογικής δομής της Κρήτης αυξάνεται, καθώς αυτή βρίσκεται στο όριο της ηπειρωτικής σύγκλισης (σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών, της Αν. Μεσογείου και της μικροπλάκας του Αιγαίου με καθαρό ρυθμό προσέγγισης πλακών, περίπου 4 cm/χρόνο) (Seidel et al. 1982, Taymaz et al. 1990, Jackson 1994, Kiliyas et al. 1994, Le Pichon et al. 1995, Papazachos et al., 1999, Papazachos, 1999, Thomson et al. 1999, Cocard et al. 1999). Αποτέλεσμα των δυναμικών συμπίεστικών δυνάμεων που έχουν αναπτυχθεί σε παλαιότερους γεωλογικούς χρόνους στην ενδοχώρα της Κρήτης είναι να εμφανίζονται όλες οι γεωλογικές ζώνες της Ελλάδας (Μουντράκης, 1985) μέσω αλληπάλληλων τεκτονικών καλυμμάτων των διαφόρων ζωνών (Fassoulas, 1995), τα οποία αναπτύσσονται πάνω στην ενότητα Ταλέα όρη των πλακωδών ασβεστόλιθων.

Η γεωλογία της Κρήτης, λοιπόν, χαρακτηρίζεται από μια έντονη καλυμματική τεκτονική, όπου αλληπάλληλα τεκτονικά καλύμματα, διαφορετικής γεωλογικής προέλευσης και εξέλιξης, εντοπίζονται το ένα πάνω στο άλλο δημιουργώντας ένα πολύπλοκο οικοδόμημα τεκτονικών καλυμμάτων. Η καλυμματική τεκτονική συνδέεται με αλληπάλληλα συμπίεστικά, τεκτονικά γεγονότα, που διαδέχονταν περίοδοι έκτασης του φλοιού, σε καθεστώς σύγκλισης των λιθοσφαιρικών πλακών της Αφρικής και της Ευρασίας και ηπειρωτικών συγκρούσεων, ενδιάμεσων μικροηπείρων.

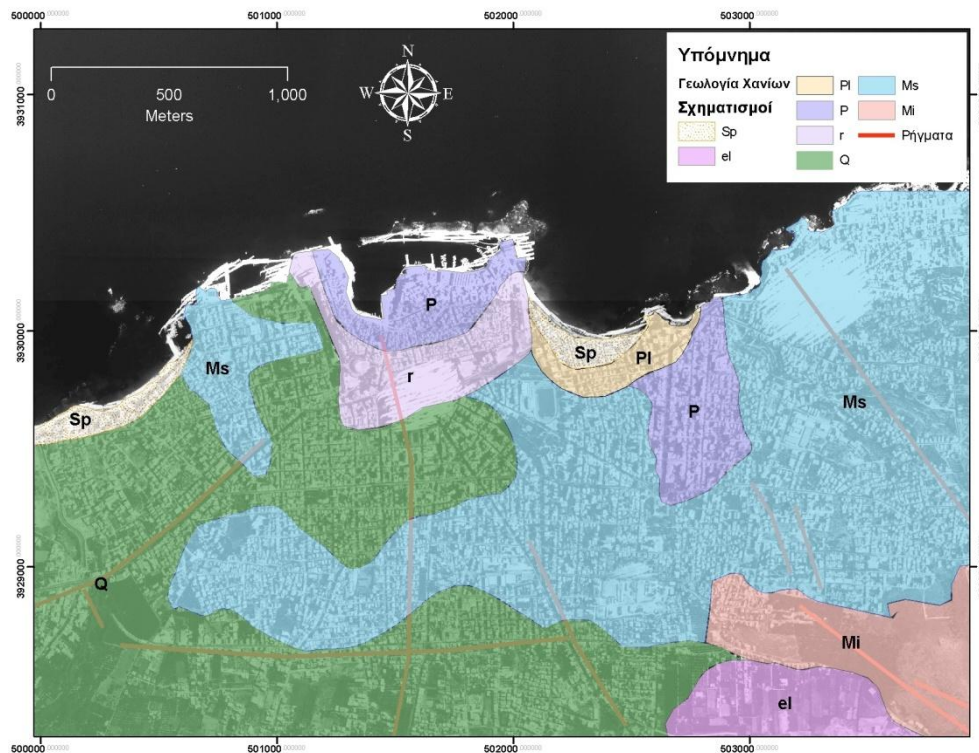
Στην Εικόνα 3.1 παρουσιάζεται η γεωλογία της περιοχής ενδιαφέροντος σύμφωνα με το χάρτη του ΙΓΜΕ (φύλλο Χανιά), καθώς και τα ρήγματα που υπάρχουν στην περιοχή. Η περιοχή του κάμπου των Χανίων καλύπτεται από Τεταρτογενείς αποθέσεις, ενώ Νοτίως του κάμπου υπάρχουν ασβεστόλιθοι της Πίνδου, της Τρίπολης, του Τρυπαλίου και Πλακώδεις Ασβεστόλιθοι.



Εικόνα 3.1: Η γεωλογία της περιοχής ενδιαφέροντος σύμφωνα με το χάρτη του ΙΓΜΕ (φύλλο Χανιά, 1:50000), (Παπαδόπουλος Η., 2013)

Ειδικότερα για το πολεοδομικό συγκρότημα των Χανίων, ο χάρτης της Εικόνας 3.2 παρουσιάζει τον διαχωρισμό των Νεογενών σχηματισμών με βάση την επιτόπια γεωλογική χαρτογράφηση από την Bastelli (2002). Μεγάλο μέρος της ανατολικής και νότιας περιοχής καλύπτεται από εναλλαγές λευκών-γκρι ασβεστολίθων, μάρμαρα, κιτρινωπούς μαζώδεις ασβεστόλιθους με λεπτά ενδιάμεσα στρώματα από ψαμμίτες (Ms), και ψαμμίτες (P). Το δυτικό τμήμα της περιοχής καλύπτεται από αλλουβιακές αποθέσεις του Τεταρτογενούς (Q), ενώ στα

παράλια συναντώνται ανθρωπογενείς αποθέσεις (r), αποθέσεις απολιθωμένης παραλίας που αποτελείται από μεσο-χονδρόκοκκες άμμους με επίπεδα συμπαγοποίησης (PI), άμμος (sp) και πλημμυρικά ιζήματα (I). Νότια συναντώνται μάζες συμπαγούς ασβεστόλιθου χρώματος από λευκό-γκρι μέχρι ανοιχτό γκρι, μέσα στις οποίες βρίσκονται φακοί βιοκλαστικών ασβεστολίθων και χαλίκια από μάρμαρο (Mi).



Εικόνα 3.2: Γεωλογία του πολεοδομικού συγκροτήματος των Χανίων (τροποποιημένο από Bastelli (2002)).

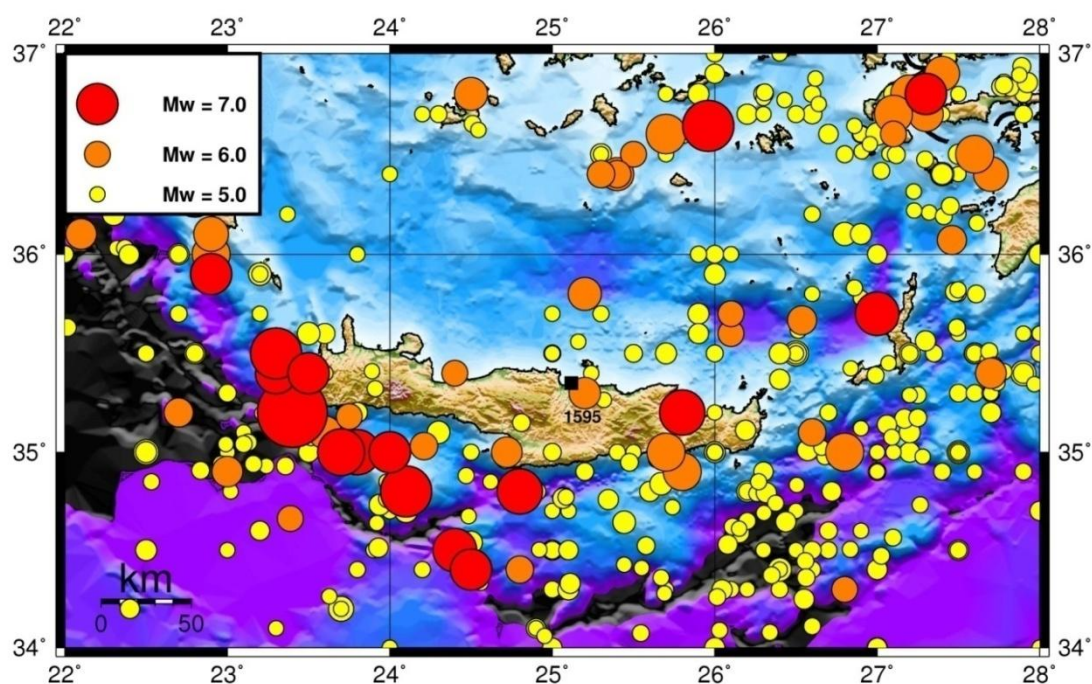
3.2. Σεισμικότητα της περιοχής ενδιαφέροντος

Η περιοχή του Αιγαίου θεωρείται μια από τις πιο σεισμογενείς της Ευρασίας. Ειδικότερα η περιοχή του Νοτίου Αιγαίου με το πολύπλοκο τεκτονικό σύστημα που επικρατεί, θεωρείται ως η περιοχή με τη μεγαλύτερη σεισμικότητα στην Ευρώπη. Από τους αρχαίους χρόνους πολλοί καταστρεπτικοί σεισμοί έχουν πλήξει την Κρήτη.

Στο χάρτη της Εικόνας 3.3 φαίνονται τα επίκεντρα των επιφανειακών σεισμών στην ευρύτερη περιοχή της Κρήτης μέχρι το 2008. Τα δεδομένα προέρχονται από τον κατάλογο των Parazachos et al. (2000) για το διάστημα 1901-1999, ενώ για το διάστημα 2000 έως 2008 χρησιμοποιήθηκαν τα δελτία του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Αστεροσκοπείου Αθηνών και του Σεισμολογικού Σταθμού του Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης. Στον κατάλογο αυτόν δίνονται πληροφορίες για τις

βασικές εστιακές παραμέτρους (χρόνος γένεσης, επίκεντρο, εστιακό βάθος, μέγεθος) των γνωστών σεισμών που έγιναν στον Αιγαίο χώρο και τις γύρω περιοχές μετά το 550 π.Χ.

Τα μεγέθη όλων των σεισμών του καταλόγου αυτού έχουν εκφρασθεί σε κλίμακα ισοδύναμη με την κλίμακα μεγέθους σεισμικής ροπής, M_w , (ή M), με κατάλληλες σχέσεις μετατροπής των μεγεθών μεταξύ των διαφόρων κλιμάκων (Parazachos et al. 1997, Parazachos και Parazachou 1997). Τα σφάλματα στον υπολογισμό των μεγεθών είναι περίπου ± 0.25 για τους σεισμούς που έγιναν στο διάστημα 1911-2002 και περίπου ± 0.35 για τους ιστορικούς σεισμούς για τους οποίους ο αριθμός των διαθέσιμων μακροσεισμικών παρατηρήσεων (αριθμός θέσεων όπου η ένταση είναι γνωστή) είναι ίσος ή μεγαλύτερος του 10. Στις περιπτώσεις ιστορικών σεισμών με μικρότερο αριθμό μακροσεισμικών παρατηρήσεων τα εκτιμώμενα σφάλματα στον υπολογισμό των μεγεθών τους είναι ± 0.5 .

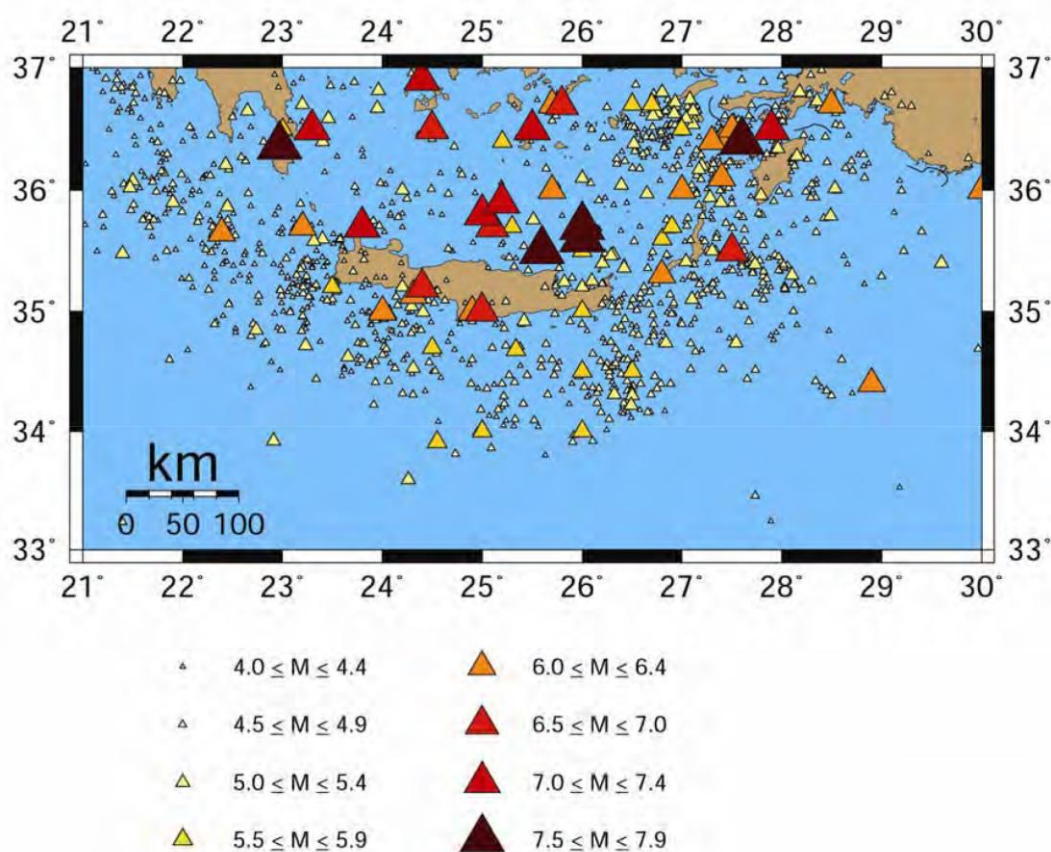


Εικόνα 3.3: Χάρτης της γεωγραφικής κατανομής των epicέντρων όλων των γνωστών επιφανειακών σεισμών στην ευρύτερη περιοχή του Νομού Χανίων για μεγέθη $MW \geq 5.0$ (Μουντράκης και συνεργ., 2004)

Σύμφωνα με τους Parazachos et al. (2000) από το βάθος των 20km και κατά μήκος του εξωτερικού τμήματος του ελληνικού τόξου, αρχίζει να σχηματίζεται μια ζώνη, το επιφανειακό τμήμα της οποίας (20-100km) βυθίζεται με μικρή γωνία ($\sim 30^\circ$) προς το Αιγαίο. Στο διάστημα αυτών των βαθών λαμβάνει χώρα σύζευξη μεταξύ του παλιού ωκεάνιου φλοιού της ανατολικής Μεσογείου και της λιθόσφαιρας του Αιγαίου, η οποία εφυπνεί πάνω σε αυτόν. Αυτό πιστοποιείται από το γεγονός ότι όλοι οι μεγάλοι ενδιαμέσου βάθους σεισμοί με μεγέθη μέχρι

8.0 γίνονται σε αυτά τα βάθη. Σε μεγαλύτερα βάθη ($100\text{km} \leq h \leq 180\text{km}$) της ζώνης η σεισμική δραστηριότητα είναι πιθανό ότι οφείλεται στην ελεύθερη βύθιση της ωκεάνιας λιθόσφαιρας. Τέτοια βύθιση χωρίς ισχυρή σύζευξη εξηγεί το γεγονός ότι δε γίνονται σεισμοί με μέγεθος μεγαλύτερο από περίπου 7.0 σε αυτό το βαθύ τμήμα της ζώνης.

Οι ενδιαμέσου βάθους σεισμοί (Εικόνα 3.4) με μέγεθος μικρότερο του 7.0 οι οποίοι γίνονται σε μεγάλα βάθη ($h > 100\text{km}$) συνήθως δεν προκαλούν σοβαρές βλάβες ενώ σπάνια προκαλούν τέτοιες βλάβες και οι αντίστοιχου μεγέθους σεισμοί οι οποίοι γίνονται σε βάθη μεταξύ 60km και 100km. Από την άλλη πλευρά, οι σεισμοί ενδιαμέσου βάθους με μέγεθος $M \geq 7.0$ συνήθως προκαλούν σοβαρές βλάβες σε μεγάλες αποστάσεις κατά μήκος ολόκληρου του ελληνικού τόξου και όταν φθάνουν σε μεγέθη $M \geq 7.5$, προκαλούν βλάβες ακόμα και σε περιοχές οι οποίες βρίσκονται στο εξωτερικό τμήμα του τόξου, όπως στην Κύπρο, Δέλτα του Νείλου, Σικελία, Μέση Ανατολή (Parazachos and Parazachou 1997, 2003).



Εικόνα 3.4: Γεωγραφική κατανομή των επικέντρων των σεισμών ενδιαμέσου βάθους (Παπαιωάννου και συν. 2008).

Κεφάλαιο 4^ο: Γεωγραφικά Συστήματα

Πληροφοριών

4.1. Γενικά περί ΓΣΠ

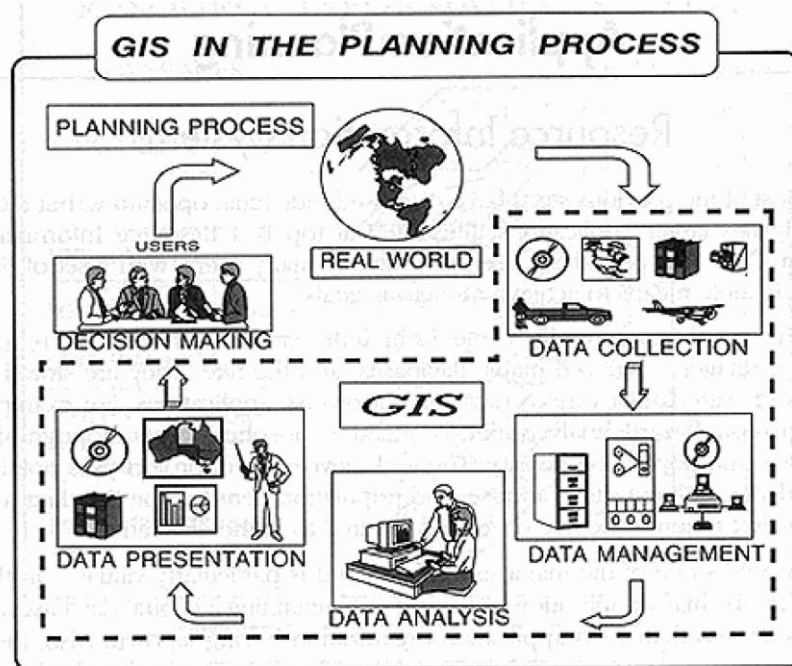
Τις τελευταίες δεκαετίες η εξέλιξη της τεχνολογίας είναι ραγδαία και η πληροφορία αποτελεί κύριο προϊόν. Οι καθημερινές δραστηριότητες του ανθρώπου, από τις πιο απλές μέχρι τις πλέον σύνθετες, είναι τις περισσότερες φορές συνυφασμένες με την έννοια του χώρου, δηλαδή τα χωρικά δεδομένα. Σχεδόν όλες οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε κυβερνητικό ή επιστημονικό επίπεδο επηρεάζονται, περιορίζονται ή ακόμη και υπαγορεύονται από κάποιο γεωγραφικό χαρακτηριστικό. Οι αποφάσεις λαμβάνονται μετά από εκτίμηση διαφόρων δεδομένων που χαρακτηρίζονται ως πληροφορίες και είναι συνδεδεμένες με το χώρο (Δήμας 2010).

Οι γεωγραφικές πληροφορίες, για να βοηθήσουν στην ανάλυση χωρικών φαινομένων, θα πρέπει να είναι ακριβείς, αντικειμενικές, ενιαίες, και προσιτές. Σύστημα πληροφοριών είναι ένα σύστημα που διαθέτει τα κατάλληλα εργαλεία για την αποδοτική συλλογή, επεξεργασία και διαχείριση των πληροφοριών. Ένα σύστημα πληροφοριών δίνει τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλου όγκου πληροφοριών και πολύ μεγάλη ταχύτητα επεξεργασίας, κάνει χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών με τις περιφερειακές τους μονάδες και ειδικό λογισμικό, και αποτελείται από τη βάση πληροφοριών, τους μηχανισμούς εισαγωγής και εξόδου δεδομένων και τις διαδικασίες ταξινόμησης, επεξεργασίας και ανάλυσης των πληροφοριών.

Ένα Σύστημα Πληροφοριών που βασίζεται στη διαχείριση γεωγραφικών πληροφοριών, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν μπορεί να περιέχει και μη χωρικές (περιγραφικές) πληροφορίες, ονομάζεται Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (ΓΣΠ) (Geographical Information System ή GIS).

Τα ΓΣΠ δέχονται πληροφορίες - δεδομένα από πολλές πηγές, οι οποίες μπορεί να έχουν πολλές τυποποιήσεις και δομές. Στους διαφορετικούς τύπους δεδομένων περιλαμβάνονται χάρτες, εικόνες, φωτογραφίες, ψηφιακά προϊόντα, μετρήσεις/σήματα GPS, κείμενα πίνακες δεδομένων, κτλ. Τα ΓΣΠ συνδυάζουν δεδομένα και συνεργάζονται με ένα μεγάλο αριθμό άλλων επιστημονικών κατευθύνσεων, όπως τη Γεωγραφία, Χαρτογραφία, Τηλεπισκόπηση, Γεωδαισία, Τοπογραφία, Πληροφορική, Στατιστική, Επιχειρησιακή Έρευνα, κτλ.

Αποστολή των ΓΣΠ είναι να εφοδιάσουν τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων με τις απαραίτητες πληροφορίες. Οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται, είτε για να αναγνωρίσουν και να επισημάνουν την ύπαρξη και τη θέση ενός προβλήματος - θέματος - ζητήματος, είτε για να ανιχνεύσουν και να αναλύσουν τις διάφορες εναλλακτικές λύσεις ή και για να βοηθήσουν την εκτέλεση μίας απόφασης.



Εικόνα 4.1: Διαδικασία Χρήσης ενός ΓΣΠ (Πηγή: <http://ces.iisc.ernet.in/hpg-/envis/Remote/section153.htm>).

4.2. Δομή των ΓΣΠ

Η λειτουργία ενός ΓΣΠ εξαρτάται από τέσσερα σημαντικά τμήματα (Καπαγερίδης 2006):

- Τον ηλεκτρονικό εξοπλισμό (Hardware).
- Το κατάλληλο λογισμικό (Software).
- Τα δεδομένα (Data).

-
- Την οργάνωση και το προσωπικό (χρήστες).

Τα τμήματα που απαρτίζουν ένα ΓΣΠ πρέπει να βρίσκονται σε βέλτιστη σχέση μεταξύ τους για την αποδοτική λειτουργία του συστήματος. Ο ηλεκτρονικός εξοπλισμός ενός ΓΣΠ μπορεί να αποτελείται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος να είναι ένας σταθμός εργασίας (Workstation) ή ένα απλό PC. Το λογισμικό σε ένα ΓΣΠ πρέπει να έχει ορισμένες δυνατότητες. Πρέπει να επιτρέπει την ανάλυση των δεδομένων σε ότι αφορά τη θέση τους, τις σχέσεις μεταξύ τους και τις ιδιότητές τους. Επίσης, πρέπει να παρέχει διάφορες επεξεργασίες μετατροπής των ιδιοτήτων ή της εμφάνισης διαφόρων δεδομένων.

Τα δεδομένα που εισάγονται στο ΓΣΠ αποτελούνται από χωρικές και περιγραφικές πληροφορίες. Οι χωρικές πληροφορίες αφορούν κατά κύριο λόγο το ψηφιακό χαρτογραφικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζεται το ΓΣΠ. Οι ψηφιακοί χάρτες μπορούν να προκύψουν με διάφορους τρόπους, όπως π.χ. από επίγειες τοπογραφικές ή κτηματολογικές εργασίες, ψηφιοποίηση υπαρχόντων “χάρτινων” χαρτών, κλπ. Οι περιγραφικές πληροφορίες συλλέγονται από υπάρχοντα ηλεκτρονικά ή συμβατικά αρχεία, εκθέσεις, συζητήσεις ή και από τη συμπλήρωση ερωτηματολογίων.

Τα ΓΣΠ βασίζονται στη διαχείριση πληροφοριών που έχουν άμεση σχέση με το γεωγραφικό χώρο, περιέχουν δηλαδή δεδομένα με γεωγραφική ταυτότητα. Θα πρέπει συνεπώς να λειτουργούν με υπόβαθρο ένα αναλυτικό περιβάλλον που επιτρέπει τον χωρικό ή γεωγραφικό εντοπισμό. Αυτό το περιβάλλον είναι ο χάρτης. Κάθε χάρτης συντάσσεται με βάση ένα σύστημα αναφοράς, ως προς το οποίο κάθε γραφική οντότητα χαρακτηρίζεται ή περιγράφεται από συντεταγμένες.

Οι χάρτες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του ψηφιακού υποβάθρου στα ΓΣΠ μπορεί να αναφέρονται σε διαφορετικά γεωγραφικά συστήματα αναφοράς (GCS - Geographic Coordinate System) και προβολικά συστήματα (PCS – Projected coordinate System). Τα GCS καθορίζουν το σχήμα και το μέγεθος της Γης. Η προβολή του σημείου πάνω στην επιφάνεια ορίζεται από τις συντεταγμένες του που αναφέρονται σε ένα καθορισμένο σύστημα αξόνων. Τα προβολικά συστήματα χρησιμοποιούνται για να απεικονίζουν ή να προβάλλουν σημεία που ανήκουν σε μία επιφάνεια αναφοράς (επιφάνεια της Γης) πάνω σε μία άλλη επιφάνεια (επίπεδο χάρτη). Μέχρι σήμερα έχουν χρησιμοποιηθεί εκατοντάδες διαφορετικά GCS και PCS για τη γήινη σφαίρα ή τοπικά σε διάφορα κράτη. Μπορεί να καλύπτουν από μία επιφάνεια μικρής έκτασης μέχρι ολόκληρη τη Γη.

4.3. Χαρακτηριστικά και δυνατότητες των ΓΣΠ

Τα ΓΣΠ, στην πιο αυστηρή μορφή του, είναι ένα ψηφιακό σύστημα, ικανό να ενσωματώσει, αποθηκεύσει, προσαρμόσει, αναλύσει και παρουσιάσει γεωγραφικά συσχετισμένες (geographically-referenced) πληροφορίες. Σε πιο γενική μορφή, ένα ΓΣΠ είναι ένα εργαλείο “έξυπνου χάρτη”, το οποίο επιτρέπει στους χρήστες του να αποτυπώσουν μια περίληψη του πραγματικού κόσμου, να δημιουργήσουν διαδραστικά ερωτήσεις χωρικού ή περιγραφικού χαρακτήρα (αναζητήσεις δημιουργούμενες από τον χρήστη), να αναλύσουν τα χωρικά δεδομένα (spatial data), να τα προσαρμόσουν και να τα αποδώσουν σε αναλογικά μέσα (εκτυπώσεις χαρτών και διαγράμμάτων) ή σε ψηφιακά μέσα.

Τα συστήματα ΓΣΠ, όπως και τα συστήματα CAD (Computer-Aided Design), αποτυπώνουν χωρικά δεδομένα σε γεωγραφικό ή χαρτογραφικό ή καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Βασικό χαρακτηριστικό των ΓΣΠ είναι ότι τα χωρικά δεδομένα συνδέονται και με περιγραφικά δεδομένα, π.χ., μια ομάδα σημείων που αναπαριστούν θέσεις πόλεων συνδέεται με ένα πίνακα όπου κάθε εγγραφή εκτός από τη θέση περιέχει πληροφορίες όπως ονομασία, πληθυσμός, κλπ. Παρέχουν επίσης τη δυνατότητα συλλογής, διαχείρισης, αποθήκευσης, επεξεργασίας, ανάλυσης και οπτικοποίησης, σε ψηφιακό περιβάλλον, των δεδομένων που σχετίζονται με τον χώρο. Τα δεδομένα αυτά συνήθως λέγονται γεωγραφικά ή χαρτογραφικά ή χωρικά (spatial) και μπορεί να συσχετίζονται με μια σειρά από περιγραφικά δεδομένα τα οποία και τα χαρακτηρίζουν μοναδικά. Πολλές φορές η ολοκληρωμένη έννοια των ΓΣΠ επεκτείνεται για να συμπεριλάβει τόσο τα δεδομένα (που αποτελούν ουσιαστικά τον πυρήνα τους), το λογισμικό και τον μηχανικό εξοπλισμό, όσο και τις διαδικασίες και το ανθρώπινο δυναμικό, που αποτελούν αναπόσπαστα τμήματα ενός οργανισμού, ο οποίος έχει σαν πρωταρχική του δραστηριότητα τη διαχείριση πληροφορίας με τη βοήθεια ΓΣΠ.

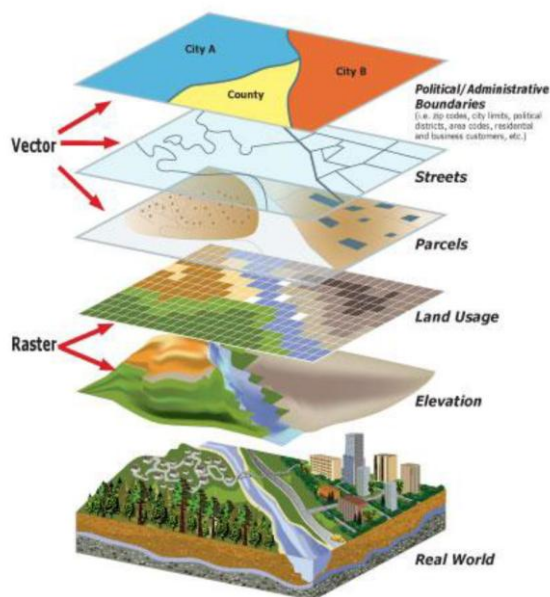
Σε ένα ΓΣΠ τα χωρικά δεδομένα μπορούν να αναπαρίστανται με δύο βασικές δομές: τη διανυσματική δομή και τη ψηφιδωτή δομή. Σε όλα τα ΓΣΠ οι δύο δομές αποδίδονται ταυτόχρονα σε κοινές απεικονίσεις, ενώ πολλά λογισμικά ΓΣΠ προσφέρουν τη δυνατότητα μετάβασης από τη μία δομή στην άλλη. Πιο συγκεκριμένα:

- *Διανύσματα (Vectors)*. Όλα τα χωρικά δεδομένα μπορούν να αναπαρασταθούν με τρεις βασικούς τύπου γεωμετριών: σημεία, γραμμές, πολύγωνα. Συνεπώς, για την απόδοση της θέσης μια πόλης σε ένα χάρτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα σημείο, για την αποτύπωση

του οδικού δικτύου μια γραμμή αποτελούμενη από πολλές κορυφές και για την αποτύπωση μιας ιδιοκτησίας ένα πολύγωνο. Στην ουσία τα πάντα αναπαρίστανται από γραμμές. Το σημείο είναι μια γραμμή μηδενικού μήκους, ενώ το πολύγωνο είναι μια ακολουθία γραμμών με αρχή και τέλος την ίδια κορυφή. Η γεωμετρία που θα υιοθετηθεί για το συμβολισμό ενός αντικειμένου εξαρτάται από την κλίμακα απεικόνισης και το σκοπό της εφαρμογής που αναπτύσσεται. Οπότε, π.χ., σε μια πολύ μεγάλη κλίμακα (1:1000) τα κτίσματα αποτυπώνονται ως πολύγωνα, ενώ σε μικρότερες κλίμακες (1:10.000) είναι ορθότερο να χρησιμοποιηθεί η γεωμετρία του σημείου. Τέλος, κάθε γεωμετρία συνδέεται με μια σχέση “ένα προς ένα», δηλαδή με μια εγγραφή σε ένα πίνακα περιγραφικών χαρακτηριστικών.

- *Ψηφιδωτά (Rasters)*. Η ψηφιδωτή δομή δεδομένων χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που το χωρικό φαινόμενο που αποτυπώνεται χαρακτηρίζεται ως συνεχής μεταβλητή (π.χ., το υψόμετρο του εδάφους, η κατανομή του θορύβου) ή σε περιπτώσεις που στο ΓΣΠ θέλουμε να ενσωματώσουμε μια δορυφορική εικόνα ή μια σαρωμένη αεροφωτογραφία. Οι ψηφιδωτές δομές δεδομένων έχουν περιορισμένες δυνατότητες σύνδεσης με περιγραφικά χαρακτηριστικά.

Σημαντικό χαρακτηριστικό των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών είναι η ευρεία χρήση των επιπέδων πληροφορίας - layers (Sanchez-Lozano et al. 2013). Η εισαγωγή δεδομένων γίνεται με τη χρήση των layers τα οποία μπορεί να παρομοιαστούν με διαφανείς σελίδες, οι οποίες περιέχουν μία καθορισμένη από το χρήστη ομάδα πληροφοριών. Σε ένα layer είναι δυνατόν να απεικονιστούν όλα τα είδη των στοιχείων, σημεία, γραμμές, επιφάνειες και εικόνες. Για την τοποθέτηση ενός στοιχείου στο layer, δηλώνεται το γεωγραφικό μήκος και πλάτος, το είδος του συμβολισμού που επιθυμεί ο χρήστης και οι πληροφορίες (ονόματα, γράμματα, αριθμοί, κλπ) που συνοδεύουν την καταχώριση. Με τον τρόπο αυτόν, είναι δυνατή η παρουσίαση όποιων ομάδων πληροφοριών απαιτούνται για τη μελέτη που πραγματοποιείται, χωρίς να γίνεται σύγχυση των πληροφοριών. Ως κατώτερο επίπεδο ορίζεται αυτό που αποτελείται από επιφάνειες (αν υπάρχει και δεύτερο όμοιο, τότε θέτουμε ως κατώτερο αυτό με τις μεγαλύτερες επιφάνειες), ακολουθούν τα επίπεδα με τα γραμμικά δεδομένα (συγκοινωνιακό δίκτυο, ποτάμια, ρήγματα, κλπ) και ως ανώτερο επίπεδο τοποθετείται αυτό με τα σημειακά στοιχεία (πόλεις, επίκεντρα σεισμών, σημεία δειγματοληψιών, κλπ).



Εικόνα 4.2: Μοντέλο σχεσιακής βάσης δεδομένων διαφόρων θεματικών επιπέδων – Layers (Πηγή: www.gembc.ca).

Επιπρόσθετα, ένα λογισμικό ΓΣΠ είναι κατάλληλο για την εφαρμογή ποικίλων μεθόδων επεξεργασίας στα καταχωρημένα δεδομένα και δύναται να απαντά σε πολύπλοκες και συνδυαστικές ερωτήσεις που τίθενται από τον χρήστη, η φύση των οποίων ποικίλει ανάλογα με το υπό εξέταση επιστημονικό πεδίο. Για παράδειγμα, γίνονται ερωτήσεις που αναφέρονται σε τοποθεσίες, αποστάσεις και ποσότητες και αφορούν στη θέση ενός αντικειμένου, προσδιοριζόμενη με ποικιλία τρόπων όπως με γεωγραφικές συντεταγμένες, με το όνομα της περιοχής στην οποία βρίσκεται, κτλ. Επίσης, σε αυτήν την ομάδα ερωτήσεων κατατάσσονται και αυτές που αφορούν στο μέγεθος μιας περιοχής, ή ακόμη και μιας γραμμής, στην εμφάνιση μιας συγκεκριμένης μορφής από το σημείο Α στο Β, καθώς και τα αντικείμενα που βρίσκονται πλησίον σημείων με συγκεκριμένους συνδυασμούς χαρακτηριστικών γνωρισμάτων.

Σε σχέση με τις παραδοσιακές μεθόδους συλλογής, καταχώρισης, οργάνωσης και επεξεργασίας των δεδομένων, τα ΓΣΠ παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα όπως:

- Η ταχύτερη δημιουργία χαρτών.
- Ο συνδυασμός διαφορετικών επιπέδων πληροφορίας.
- Διευκολύνονται οι αναλύσεις των δεδομένων που απαιτούν αλληλεπίδραση μεταξύ των στατιστικών αναλύσεων και της χαρτογράφησης.
- Η άμεση επιδιόρθωση ή προσθήκη δεδομένων.

-
- Η εξυπηρέτηση των ειδικών αναγκών των διαφόρων χρηστών που έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για το είδος και την ακρίβεια των πληροφοριών.
 - Η κατάταξη των δεδομένων με τις ίδιες προδιαγραφές συγκέντρωσης και αποθήκευσης.
 - Επιτρέπεται η συνεχή πληροφόρηση και ερμηνεία των στοιχείων σε συνδυασμό με τη συνεχή ενημέρωση, ανταλλαγή πληροφοριών και ευκολότερη διανομή στους χρήστες.
 - Παρέχεται ασφάλεια και προστασία των στοιχείων από διάφορες φυσικές καταστροφές, ενώ είναι εύκολη η αναπαραγωγή τους.
 - Παρέχεται ασφάλεια σε ότι αφορά την τροποποίηση δεδομένων από μη εξουσιοδοτημένα άτομα.
 - Τα δεδομένα διατηρούνται σε ψηφιακή μορφή με αποτέλεσμα να καταλαμβάνουν μικρό χώρο και να είναι εύχρηστα.
 - Οι διάφορες μορφές εξαγόμενων αποτελεσμάτων παράγονται πολύ γρήγορα, αποτελούνται από μεμονωμένα ή σύνθετα θέματα, για οποιαδήποτε γεωγραφική θέση της βάσης δεδομένων και σε οποιαδήποτε κλίμακα.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης ΓΣΠ υπερτερούν των μειονεκτημάτων τα οποία πέρα από την εξοικείωση και την κατάλληλη εκπαίδευση που προϋποθέτουν, είναι βασικά το αρχικό κόστος απόκτησης του συστήματος (υπάρχουν βέβαια και “open source” προγράμματα), καθώς και το κόστος της τεχνικής υποστήριξης και συντήρησης. Τα συστήματα ΓΣΠ στις μέρες μας γίνονται ολοένα και πιο δημοφιλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να βελτιώνονται συνεχώς και άρα να αυξάνονται οι δυνατότητές τους, ενώ παράλληλα η επίδραση των όποιων μειονεκτημάτων τους ελαχιστοποιείται.

4.4. Εφαρμογές των ΓΣΠ

Οι εφαρμογές των ΓΣΠ είναι πάρα πολλές και καθορίζονται κάθε φορά από τις ιδιαίτερες ανάγκες του χρήστη. Κοινό χαρακτηριστικό όλων των περιπτώσεων είναι η ευρύτατη χρήση των θεωρητικών και πρακτικών εφαρμογών της επιστήμης της Γεωγραφίας. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι σε κρατικό και κυβερνητικό επίπεδο, γίνεται εφαρμογή των ΓΣΠ στα ακόλουθα πεδία (Καπαγερίδης 2006):

- Στη Καταγραφή και διαχείριση της δημόσιας και ιδιωτικής ακίνητης περιουσίας (κτηματολόγιο).
- Στον πολεοδομικό και χωροταξικό σχεδιασμό.

- Στη διαχείριση οδικών δικτύων.
- Στην εθνική άμυνα και κατανομή στρατιωτικών εγκαταστάσεων.
- Στην αντιμετώπιση φυσικών καταστροφών και προστασίας του περιβάλλοντος με τη δυνατότητα δημιουργίας σεναρίων καταστάσεων έκτακτης ανάγκης και άσκηση των υπηρεσιών στην αντιμετώπισή τους.
- Στη διαχείριση των φυσικών πόρων και των καλλιεργειών.
- Στη διαχείριση των δικτύων των οργανισμών κοινής ωφέλειας (ηλεκτρικό, τηλέφωνο, νερό, αποχέτευση, φυσικό αέριο, καλωδιακή τηλεόραση).
- Στην παρακολούθηση των οικονομικών, εμπορικών, βιομηχανικών και βιοτεχνικών δραστηριοτήτων για τον καλύτερο σχεδιασμό της ανάπτυξης της εθνικής οικονομίας.
- Στην παρακολούθηση της υγείας του πληθυσμού, τον εντοπισμό επιδημιών στη γένεσή τους, και το σχεδιασμό νοσηλευτικών κέντρων σε σχέση με την κατανομή του πληθυσμού.
- Στην καταγραφή, τεκμηρίωση και προβολή των αρχαιολογικών ευρημάτων και μνημείων της χώρας.
- Στην παρακολούθηση της εκπαίδευσης του πληθυσμού, συσχέτιση πληθυσμιακών δεδομένων και σχεδιασμού νέων εγκαταστάσεων εκπαίδευσης.
- Στη διαχείριση δημογραφικών στοιχείων για τη μακροπρόθεσμη πολιτική ανάπτυξης.
- Στην Εθνική ασφάλεια και καταπολέμηση του εγκλήματος.



Εικόνα 4.3: Εφαρμογές των ΓΣΠ (Πηγή: <http://www.northaugusta.net/>).

Όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 4.3, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι εφαρμογές των ΓΣΠ σε διεπιστημονικό επίπεδο είναι απεριόριστες. Ειδικότερα στον τομέα της προστασίας του Περιβάλλοντος και της Περιβαλλοντικής Μηχανικής οι πολλαπλές δυνατότητες που παρέχει η χρήση ενός τέτοιου συστήματος έχει συμβάλλει σημαντικά στην πρόοδο της επιστημονικής έρευνας και στην προώθηση της αειφόρου ανάπτυξης.

4.5. Το λογισμικό QGIS

Το QuantumGIS (συχνά γίνεται αναφορά σε αυτό ως QGIS) είναι ένα ελεύθερο και ανοιχτού κώδικα ΓΣΠ γραφείου που προσφέρει δυνατότητες οπτικοποίησης, τροποποίησης και ανάλυσης χωρικών δεδομένων. Η ανάπτυξη του λογισμικού ξεκίνησε από τον Gary Sherman το 2002 και σύντομα γύρω από αυτό αναπτύχθηκε το Open Source Geospatial Foundation. Το πρόγραμμα συντηρείται από μία ενεργή κοινότητα χρηστών και προγραμματιστών που σε τακτά διαστήματα κυκλοφορούν νέες εκδόσεις επεκτείνοντας τις δυνατότητες των παλιών και διορθώνοντας σφάλματα.

Το QuantumGIS έχει γραφτεί σε C++ και η γραφικό περιβάλλον χρησιμοποιεί την βιβλιοθήκη Qt. Πολλά από τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται έχουν γραφτεί επίσης σε C++ ή Python. Έχει μεταφραστεί σε 14 γλώσσες και χρησιμοποιείται ευρύτατα τόσο από ερευνητικούς και ακαδημαϊκούς φορείς, όσο και στον επιχειρηματικό χώρο. Το QuantumGIS είναι συμβατό με λειτουργικά συστήματα Linux, Unix, Windows και Macintosh. Ακόμα το συγκεκριμένο ΓΣΠ γραφείου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν περιβάλλον γραφικής διεπαφής τόσο για χωρικές βάσεις δεδομένων, όπως η PostGIS, όσο και για λιγότερο εύχρηστα ΓΣΠ, όπως το GRASS. Επιπλέον, έχει μικρότερες απαιτήσεις υπολογιστικής δύναμης σε σχέση με τα περισσότερα εμπορικά ΓΣΠ. Έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα ταυτόχρονα με άλλες εφαρμογές ή σε μονάδες με περιορισμένους πόρους.

Η πρώτη έκδοση του προγράμματος που κυκλοφόρησε τον Ιούλιο του 2002 και αφορούσε κυρίως λειτουργίες απεικόνισης και εισαγωγής δεδομένων στην χωρική βάση δεδομένων PostgreSQL/PostGIS. Σταδιακά ενσωματώθηκαν λειτουργίες υποστήριξης αρχείων shapefiles όσο και άλλων διανυσματικών format. Στην σημερινή του μορφή το πρόγραμμα προσφέρει αυξημένες δυνατότητες οπτικοποίησης, διαχειρίζεται raster αρχεία, μπορεί να εκτελεί λειτουργίες ανάλυσης (λ.χ., buffer) ενώ διακρίνεται για την αξιοπιστία και σταθερότητά του. Είναι συμβατό με τους περισσότερους εμπορικούς τύπους αρχείων, τη διαδικτυακή εφαρμογή χωρικών δεδομένων

MapServer, καθώς και τα πρότυπα WMS και WFS του Open Geospatial Consortium. Σαν λογισμικό ανοιχτού κώδικα μπορεί να τροποποιηθεί ελεύθερα από κάθε χρήστη έτσι ώστε να εκτελεί διαφορετικές ή εξειδικευμένες λειτουργίες.

4.6. Εφαρμογές ΓΣΠ στην εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας

Όπως προαναφέρθηκε, τα ΓΣΠ ή GIS είναι πληροφοριακά συστήματα που παρέχουν τη δυνατότητα συλλογής, διαχείρισης, αποθήκευσης, επεξεργασίας, ανάλυσης και οπτικοποίησης σε ψηφιακό περιβάλλον πολλών και διαφορετικών χωρικών δεδομένων. Η τεχνολογία των GIS υποστηρίζει την ανάλυση, αποτίμηση και διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης αστικών συστημάτων και δικτύων, καθώς η πλειονότητα των απαιτούμενων πληροφοριών είναι χωρικής κατανομής, οπότε είναι δυνατόν να εισαχθούν, επεξεργαστούν και απεικονισθούν σε περιβάλλον GIS (ESRI 1999). Τα εργαλεία που παρέχουν βρίσκουν εφαρμογή σε όλα τα επιμέρους βήματα, όπως δημιουργία βάσεων δεδομένων, ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας και ανάπτυξη σεισμικών σεναρίων, αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας, παραγωγή χαρτών με την κατανομή των αναμενόμενων βλαβών, προσδιορισμό βέλτιστων διαδρομών και ανάλυση της εξυπηρετικότητας ενός δικτύου, καθώς και στην ανάπτυξη σχεδίων διαχείρισης (επέμβασης και αποκατάστασης) της κρίσης.

Τα τελευταία χρόνια αναπτύχθηκαν διάφορες μεθοδολογίες και πρότυπα ανάλυσης της διακινδύνευσης έναντι φυσικών καταστροφών μεταξύ των οποίων και οι σεισμοί, τα οποία στηρίζονται στην τεχνολογία και τις δυνατότητες που παρέχουν τα GIS. Πολυάριθμες εργασίες έχουν δημοσιευθεί για το συγκεκριμένο αντικείμενο και αρκετές μεθοδολογίες και εφαρμογές που αφορούν στην ανάλυση και διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης δικτύων κοινής ωφέλειας και υποδομών αναπτύχθηκαν σε περιβάλλον GIS. Επίσης, η τεχνολογία των GIS χρησιμοποιείται για την επεξεργασία και ανάλυση εμπειρικών στοιχείων σε δίκτυα και υποδομές μετά από σεισμούς, με σκοπό τη συσχέτισή τους με σεισμικές καταγραφές και άλλα δεδομένα.

Τα τελευταία χρόνια γίνεται προσπάθεια συνδυασμού των GIS με άλλες σύγχρονες τεχνολογίες τηλεματικής, δορυφορικών μέσων, GPS και παρακολούθησης σεισμικών συμβάντων σε πραγματικό χρόνο (real-time), ώστε να προκύψουν δυναμικά εργαλεία διαδραστικής λήψης και μετάδοσης δεδομένων αμέσως μετά από ισχυρούς σεισμούς. Με τον τρόπο αυτόν είναι δυνατή η άμεση προκαταρκτική εκτίμηση της θέσης και έκτασης των βλαβών σε κτίρια και υποδομές και επομένως η καλύτερη οργάνωση των δράσεων άμεσης και μεσοπρόθεσμης

επέμβασης. Επιπλέον, τα δεδομένα αυτά χρησιμοποιούνται για τη βελτιστοποίηση των μεθόδων αποτίμησης της σεισμικής διακινδύνευσης. Σύνοψη των παραπάνω δυνατοτήτων για την περίπτωση των μεταφορικών δικτύων γίνεται από τους Eguchi and Huysck (2000).

Ορισμένες μεθοδολογίες αποτίμησης σεισμικών απωλειών έχουν ενσωματωθεί σε λογισμικά που χρησιμοποιούν ως πλατφόρμα το περιβάλλον των GIS. Ως τέτοια παραδείγματα αναφέρονται το HAZUS, το EPEDAT, το RiskLink-DLM, το MAEviz, το REDARS-2, το T-Router. Σημειώνεται ότι τα παραπάνω λογισμικά διαφοροποιούνται ως προς τις δυνατότητες και τους στόχους τους, ενώ κάποια προσφέρονται για δημόσια χρήση και άλλα αποτελούν εμπορικά πακέτα. Παρά την ευρύτητα των εφαρμογών και τις αξιόλογες προοπτικές, τα GIS εξακολουθούν να παρουσιάζουν κάποιες θεωρητικές και τεχνολογικές αδυναμίες και αβεβαιότητες, που δεν επιτρέπουν πάντα τη βέλτιστη αποτίμηση και διαχείριση της σεισμικής διακινδύνευσης (Αργυρούδης 2010).

Κεφάλαιο 5°: Εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας

5.1. Εισαγωγή

Για τη μελέτη και ανάλυση των παραμέτρων επικινδυνότητας αλλά και τη δημιουργία των τελικών χαρτών επικινδυνότητας, χρησιμοποιήθηκαν το ελεύθερο λογισμικό QGIS και το QuakeIST, λογισμικό που δημιουργήθηκε από ομάδα ερευνητών του Instituto Superior Técnico της Λισαβώνας.

Πιο συγκεκριμένα, το QuakeIST χρησιμοποιήθηκε για την παραμετροποίηση και τον υπολογισμό της σεισμικής επικινδυνότητας των κτιριακών κατασκευών όπως επίσης και την πιθανότητα ζημιών ή καταστροφής τους. Για τη διαχείριση των δεδομένων, τη χωρική συσχέτισή τους και τη δημιουργία των τελικών πινάκων που χρησιμοποιήθηκαν στο QuakeIST, ήταν απαραίτητη η χρήση ενός λογισμικού GIS, όπως το QGIS. Το QGIS χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή και απεικόνιση των δεδομένων, ενώ ήταν απαραίτητο για την παρουσίαση, ποιοτική και ποσοτική αποτύπωση και επεξήγηση των αποτελεσμάτων.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από βάσεις δεδομένων, χάρτες και shape files από προηγούμενες μελέτες, τα οποία επεξεργάστηκαν μέσω των προγραμμάτων Excel, Notepad και QGIS.

5.2. Περιγραφή του QuakeIST

Οι σεισμοί αποτελούν μόνιμη απειλή για κάθε αστικό περιβάλλον σε όλο τον κόσμο. Η εκτίμηση του σχετικού κινδύνου απαιτεί πραγματοποίηση προσομοιώσεων διαφόρων σεναρίων και

διαδραστική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Είναι απαραίτητη, λοιπόν, η δημιουργία εφαρμογών που μπορούν να παράσχουν ένα ρεαλιστικό περιβάλλον για την εκτίμηση των σεισμικών επιπτώσεων. Το QuakeIST είναι ένας ολοκληρωμένος προσομοιωτής σεισμικών σεναρίων που αναπτύχθηκε από το Instituto Superior Técnico (Πανεπιστήμιο της Λισαβόνας), προσανατολισμένος προς την εκτέλεση υπολογισμών εκτίμησης κινδύνου σχετικά με τις καταστροφές εξαιτίας σεισμικών γεγονότων, που βασίζεται στην εφαρμογή του επανομαζόμενου Δείκτη Διαταραχών.

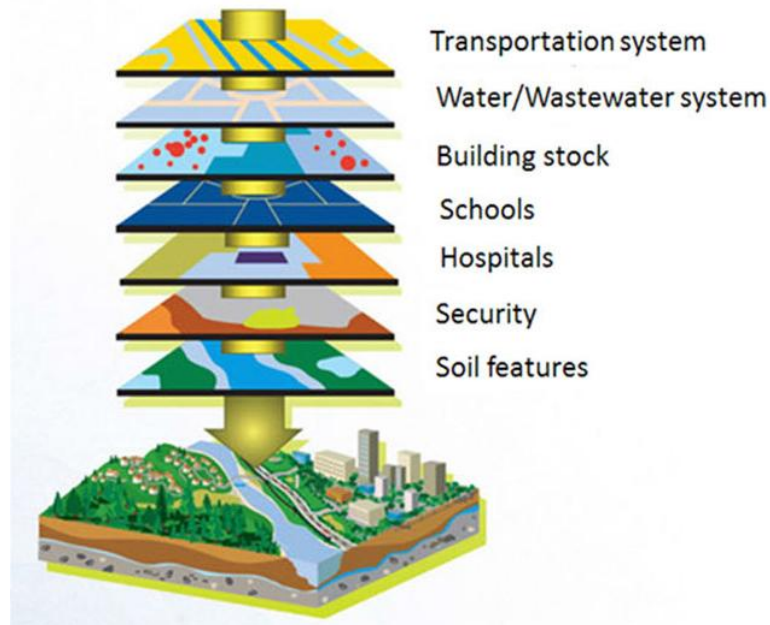
Το QuakeIST δέχεται δεδομένα μορφής περιβάλλοντος GIS, χειρίζεται διάφορα σενάρια συνθηκών και συνθέτει τις πληροφορίες σχετικά με την τρωτότητα των πάσης φύσεως κατασκευών και αστικών δομών (κτιρίων, δικτύων, δομών υγείας, κλπ). Έχει δηλαδή τη δυνατότητα να προσομοιώνει τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των υποδομών του αστικού ιστού. Το λογισμικό είναι πολύ ευέλικτο, γραμμένο σε ξεχωριστές ενότητες, επιτρέποντας σε έναν έμπειρο χρήστη να ενσωματώσει νέες εφαρμογές. Τα αποτελέσματα μπορούν να επεξεργασθούν με οποιαδήποτε στατιστική εφαρμογή και τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα λογισμικά GIS μπορούν να παράξουν τη γεωγραφική απεικόνισή τους.

Στις μέρες μας υπάρχουν διαθέσιμοι πολλοί αντίστοιχοι προσομοιωτές σεισμικού κινδύνου (Oliveira et al. 2014): όπως το LNECloss (2010), το GEM1 (2010), το SELENA (2010), το CAPRA (2014), το ELER (2014), το MAEviz (2014), το OpenQuake Engine (Silva et al. 2014) και το QALARM (2014) και πολλές μελέτες βασίζονται σε αυτά τα εξελιγμένα υπολογιστικά εργαλεία, όπως οι Paganì et al. (2014) και Silva et al. (2014). Ωστόσο, κανένας από αυτούς τους προσομοιωτές σεισμού δεν αντιμετωπίζει το πρόβλημα των αλληλεξαρτήσεων (που αναφέρεται επίσης ως φαινόμενο ντόμινο).

Το QuakeIST δημιουργεί νέες δυνατότητες στην εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου με σκοπό τον περιορισμό της πιθανότητας ανθρώπινων απωλειών και υλικών καταστροφών. Τα αποτελέσματα του QuakeIST βοηθούν τον χρήστη να εντοπίσει τους πιο σημαντικούς παράγοντες και στοιχεία του συστήματος (κτίρια, δίκτυα, κλπ) που συμβάλλουν στις κύριες αστικές διαταραχές, παρέχοντας έτσι σχέδια και καθοδήγηση για βραχυπρόθεσμες, μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες επενδύσεις για τη μείωση των επιπτώσεων του σεισμικού κινδύνου.

Το λογισμικό QuakeIST εφαρμόστηκε σε αρκετές ευρωπαϊκές χώρες (Ιταλία, Πορτογαλία, Ισπανία και Ισλανδία) κατά τη διάρκεια του έργου UFAtrat- MAFA (2012), για τον σχεδιασμό και τη μέτρηση του κινδύνου, την ποσοτικοποίηση των επιπτώσεων και τη βελτίωση της ικανότητας

καθορισμού στρατηγικών αντιμετώπισης δυσμενών φυσικών γεγονότων. Οι τοποθεσίες που μελετήθηκαν ήταν πολύ σημαντικές για τη βαθμονόμηση και την επικύρωση διαφόρων παραμέτρων του μοντέλου, χρησιμοποιώντας πραγματικούς σεισμούς (Lorca, Ισπανία 2011, Faial, Αζόρες 1998, Όρος Etna, Ιταλία 1914 και Hverageroi, Ισλανδία 2000 και 2008) (Sá et al. 2016).



Εικόνα 5.1: Επίπεδα QuakeIST (Πηγή: Sá et al. 2016)

Τα βασικά χαρακτηριστικά του λογισμικού είναι εν συντομία (QGIS reference guide):

- Το λογισμικό QuakeIST μπορεί να χειριστεί διαφορετικά σενάρια εδαφικής κίνησης που παρέχει ο χρήστης, αναφέροντας τις τιμές εδαφικής κίνησης σε συντεταγμένες, χρησιμοποιώντας κάποιο εσωτερικό ή οποιοδήποτε ιστορικό σεισμικό σενάριο.
- Το QuakeIST περιέχει αρκετές γνωστές σχέσεις εξασθένησης που ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ή να προσαρμόσει στις δικές του ανάγκες, προκειμένου να υπολογίσει τη σεισμική κίνηση με βάση το επίκεντρο (συντεταγμένες) και το μέγεθος.
- Το QuakeIST απαιτεί τη μέγιστη σεισμική ένταση σε τιμές εδαφικής επιτάχυνσης (PGA), ταχύτητας (PGV) ή μετακίνησης (PGD) ως παράμετρο εισόδου. Εφαρμόζεται μετατροπή μεταξύ αυτών των παραμέτρων (PGA, PGV, PGD) και διαφορετικών μακροσεισμικών τιμών έντασης. Οι πληροφορίες για το έδαφος μπορούν να παραμετροποιηθούν μέσω των κατηγοριών εδάφους EC8 (EC-8 2004) και υπάρχουν πολλές πιθανές επιλογές που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης για να

διαχειριστεί τις χωρικές επιπτώσεις στη διάδοση των σεισμικών κυμάτων εξαιτίας των τοπικών εδαφικών συνθηκών (local site conditions).

- Το QuakeIST είναι γραμμένο σε C ++ και αλληλεπιδρά με όλες τις πλατφόρμες των συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών (GIS), όπως το ESRI, το QGIS, κλπ, για να δημιουργήσει χάρτες και να αποτυπώσει τις πιθανές επιπτώσεις από σεισμούς σε αστικά συστήματα.
- Χρησιμοποιούνται διάφορα μοντέλα για τον υπολογισμό των άμεσων ζημιών (macroseismic model - Giovinazzi and Lagomarsino 2004), capacity spectrum (Freeman 2004), N2 (Fajfar 1999), ή μέσω συναρτήσεων τρωτότητας (fragility functions) και οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιήσουν υφιστάμενες παραμέτρους τρωτότητας ή να συμπεριλάβουν νέες.
- Μπορούν να διαμορφωθούν διαφορετικοί τύποι κατασκευών (κτίρια, σχολεία, γέφυρες, διάφοροι τύποι δικτύων (νερού, ηλεκτρικού ρεύματος, φυσικού αερίου, επικοινωνιών), κλπ).
- Χάρτες ζημιών και χάρτες που απεικονίζουν τα φαινόμενα μπορούν να σχεδιαστούν για την κάθε κατασκευή.

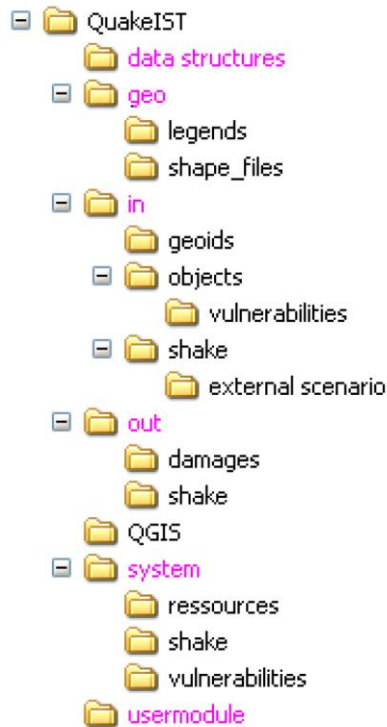
5.3. Δομή QuakeIST

Το QuakeIST έχει τη δομή που φαίνεται στην Εικόνα 5.2. Η αρχιτεκτονική του QuakeIST αποτελείται από τέσσερις ενότητες:

1. Βάση γεωλογικών δεδομένων.
2. Ενότητα βιβλιοθήκης.
3. Μονάδα προσομοίωσης.
4. Ενότητα αποτελεσμάτων.

Η βάση γεωλογικών δεδομένων, με πληροφορίες στο επίπεδο της γεωγραφικής ενότητας που χρησιμοποιείται για την ανάλυση (μια περιοχή, μια περιφέρεια, ένα οικοδομικό τετράγωνο), παρέχει βασικά χωρικά και στατιστικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην πλατφόρμα GIS για την προσομοίωση ενός σεισμικού σεναρίου. Η ενότητα βιβλιοθήκης περιλαμβάνει τέσσερα υπομοντέλα (κίνηση εδάφους, τρωτότητα, ζημιές και απώλειες και μοντέλα δεικτών διαταραχών), τα οποία αντιστοιχούν στα βασικά στάδια που εμπλέκονται σε σενάρια σεισμού. Η μονάδα προσομοίωσης είναι ένα κέντρο λειτουργίας που ενσωματώνει δεδομένα και μοντέλα. Η ενότητα

αποτελεσμάτων αποτελείται από πίνακες που περιέχουν τα διάφορα αποτελέσματα στο επίπεδο της επιλεγμένης γεωγραφικής μονάδας. Αυτά τα αποτελέσματα μπορούν στη συνέχεια να εξαχθούν σε οποιοδήποτε στατιστικό υπολογιστικό εργαλείο και να απεικονιστούν στα περισσότερα GIS προγράμματα (Sá et al. 2016).



Εικόνα 5.2: Δομή QuakeIST (Πηγή: Sá et al, 2016)

5.4. Βάση γεωλογικών δεδομένων

Πριν από την έναρξη της προσομοίωσης, πρέπει να οριστούν τα χωρικά χαρακτηριστικά και τα χαρακτηριστικά όλων των κτιρίων και άλλων κατασκευών που θα εξετασθούν. Τα κτίρια και λοιπές κατασκευές (που οργανώνονται σε αρχεία .txt) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τρέχουσα έκδοση QuakeIST είναι (αν υπάρχουν): κτίρια κατοικιών, εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης, σχολεία, εγκαταστάσεις ασφάλειας, σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής, δίκτυα και σταθμοί φυσικού αερίου, δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης. Άλλα αντικείμενα θα μπορούσαν να προστεθούν εφόσον ο γεωγραφικός χαρακτήρας και τα χαρακτηριστικά τους είναι γνωστά και καθορισμένα. Οι πληροφορίες χαρακτηριστικών κάθε αντικειμένου θα πρέπει να προετοιμάζονται σε κατάλληλη μορφή πίνακα (Sá et al. 2016).

5.5. Ενότητα βιβλιοθήκης

Η ενότητα της βιβλιοθήκης περιέχει τις προαναφερθείσες πληροφορίες που απαιτούνται για τον υπολογισμό των διαφόρων υπομοντέλων για την εδαφική κίνηση, την τρωτότητα, τις ζημιές και δείκτη διαταραχών. Η εδαφική κίνηση μπορεί να εκτιμηθεί με διαφορετικούς τρόπους όπως περιγράφεται στην ενότητα προσομοίωσης. Σε όλες τις περιπτώσεις, εξετάζεται η κατηγοριοποίηση του εδάφους, η οποία είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα για την ακριβέστερη χωρική εκτίμηση των επιπτώσεων στην περιοχή μελέτης. Τα σχετικά δεδομένα μπορούν να προκύψουν από τοπικές μελέτες ή από μακροσκοπική προσομοίωση βάσει γενικής γεωλογικής χαρτογράφησης επιφανείας.

Η παρούσα ενότητα εξετάζει την ενίσχυση του εδάφους σύμφωνα με την ταξινόμηση και την περιγραφή που δίνεται στον EC-8 (2004) με πέντε εδαφικές κατηγορίες Α έως Ε. Η γεωγραφική μονάδα εργασίας, όπως γίνεται και σε παρόμοιες εφαρμογές, εξαρτάται από τις υπάρχουσες πληροφορίες (κτίρια, κατασκευές, κλπ). Οι πληροφορίες συνδέονται με το κέντρο μάζας της συγκεκριμένης μονάδας. Για να εκτιμήσουμε τις συνέπειες και τις επιπτώσεις των σεισμικών σεναρίων, απαιτούνται εργαλεία για την πρόβλεψη των φυσικών συνεπειών σε συγκεκριμένες κατασκευές στις αστικές περιοχές, καθώς και πρόσβαση σε δεδομένα τρωτότητας.

Γενικά, τα κτίρια διαχωρίζονται από τις άλλες κατασκευές. Οι πληροφορίες σχετικά με την πρώτη κατηγορία προέρχονται συνήθως από την απογραφή κτιρίων και οι εκτιμήσεις ζημιών προέρχονται συχνά από μεθοδολογίες όπως:

- Χωρικό φάσμα (ATC 40 1996).
- Διγραμμικό χωρικό φάσμα (ATC 40 1996).
- N2 μέθοδος (Fajfar σε EC-8 2004 και 2005).
- Μακροσεισμική μέθοδος (Giovinazzi and Lagomarsino 2004).
- Καμπύλες τρωτότητας, που συνήθως δημιουργούνται από πίνακες πιθανοτήτων εμφάνισης βλαβών.

Οι λοιπές κατασκευές συνήθως αντιμετωπίζονται με συγκεκριμένες διαδικασίες, όπως προσαρμοσμένες:

- Καμπύλες τρωτότητας.
- Υπολογισμού απωλειών.

- Υπολογισμού ρυθμού επισκευής.

Όλα τα παραπάνω εμπεριέχονται στον κώδικα του QuakeIST. Επομένως το QuakeIST καθιστά εύκολη τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της κάθε διεργασίας, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα καλύτερης κατανόησης των διαφορών τους. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες σχέσεις τρωτότητας για διάφορες κατασκευές σε κίνδυνο, μέσα από δημοσιευμένες μελέτες, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1. Το QuakeIST παρέχει πολλές σχέσεις μετατροπής για την αντιμετώπιση διαφορετικών εδαφικών παραμέτρων (Sá et al. 2016).

Πίνακας 5.1: Πίνακας άντλησης δεδομένων από δημοσιευμένες μελέτες κατά περίπτωση κατασκευής (Πηγή: Sá et al 2016)

Element at risk	Vulnerability	Function of	Damage algorithms
Buildings	Macroseismic method Capacity method	Intensity EMS98 or PGA	$P [dg \geq k]$; LogNormal or Beta Distributions
Healthcare buildings	Macroseismic method	Intensity EMS98	$P [dg \geq k]$; LogNormal or Beta Distributions
School buildings	Macroseismic method	Intensity EMS98	$P [dg \geq k]$; LogNormal or Beta Distributions
Security buildings	Macroseismic method	Intensity EMS98	$P [dg \geq k]$; LogNormal or Beta Distributions
Bridges	“ERSTA” project (2008)	PGA	$P [dg \geq k] = \text{LogNormal}$
Power stations	“Syner-G” project (2010a)	PGA, PGV	$P [dg \geq k] = \text{LogNormal}$
Local transformers	“ERSTA” project (2008)	PGA, PGV	$P [dg \geq k] = \text{LogNormal}$
Natural gas pipes	“Syner-G” project (2010b)	PGA, PGV, PGD	Repair rate: $RR [R/km] = k_0 \times k_1 \times PGV^{k_2}$ [PGV in cm/s]
Natural gas PRMS	“Syner-G” project (2010b)	PGA, PGV, PGD	Repair rate: $RR [R/km] = k_0 \times k_1 \times PGV^{k_2}$
Pipelines	“Syner-G” project (2010b)	PGA, PGV, PGD	Repair rate: $RR [R/km] = k_0 \times k_1 \times PGV^{k_2}$
Water pipes	HAZUS model (2010)	PGA, PGV, PGD	Repair rate: $RR [R/km] = k_0 \times k_1 \times PGV^{k_2}$
Waste-water pipes	HAZUS model (2010)	PGA, PGV, PGD	Repair rate: $RR [R/km] = k_0 \times k_1 \times PGV^{k_2}$

k_0 , k_1 and k_2 values were taken from Syner-G (2010b)

PGA peak ground acceleration, PGV peak ground velocity; PGD peak ground displacement; $Sa(T)$ spectral acceleration

Για τον πληθυσμό που επηρεάζεται από ένα συγκεκριμένο σενάριο, η εκτίμηση των ανθρώπινων απωλειών ορίστηκε με βάση προηγούμενες εργασίες, με αποτέλεσμα τις τιμές H και L που παρουσιάζονται παρακάτω. Πιο συγκεκριμένα, οι εκφράσεις αυτές προσαρμόστηκαν αρχικά από τους LNECloss (2010), Tiedemann (1992), HAZUS (2010) και Coburn et al. (1992) και τροποποιήθηκαν και υιοθετήθηκαν στον σεισμικό προσομοιωτή Algarve (ERSTA 2008), όπως δημοσιεύθηκε στην τελική αναφορά WP22 (Mota de Sá 2009):

$$H=0.65 \cdot P[D_s=4] \cdot T_r \cdot P_r \cdot A \cdot n / 100$$

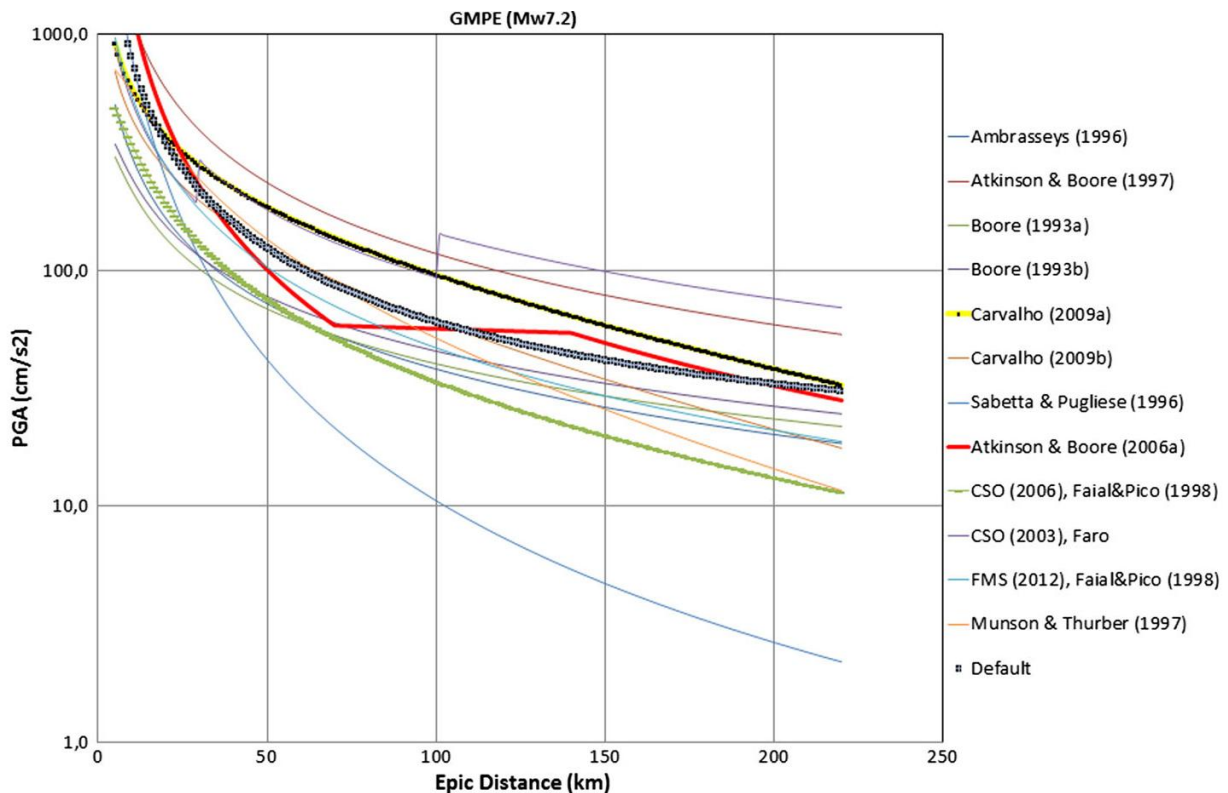
$$L=0.32 \cdot P[D_s=4] \cdot T_r \cdot P_r \cdot A \cdot n / 100$$

όπου H ο συνολικός αριθμός των ανθρώπων που εκτιμάται ότι θα τραυματιστούν σοβαρά, L ο συνολικός αριθμός εκτιμώμενων ανθρώπινων απωλειών, $P [D_s = 4]$ η πιθανότητα κάποιας κατασκευής να έχει βαθμό βλάβης (D_s) ίσο με 4, T_r ο χρόνος πληρότητας (οριζόμενος από το ποσοστό του χρόνου παρουσίας του ανθρώπου στο κτίριο μια μέση εβδομάδα), P_r ο μέσος

αριθμός ανθρώπων ανά 100m² επιφάνεια ορόφου, A η επιφάνεια ορόφου (m²), n ο αριθμός των ορόφων (Sá et al. 2016).

5.6. Μονάδα προσομοίωσης

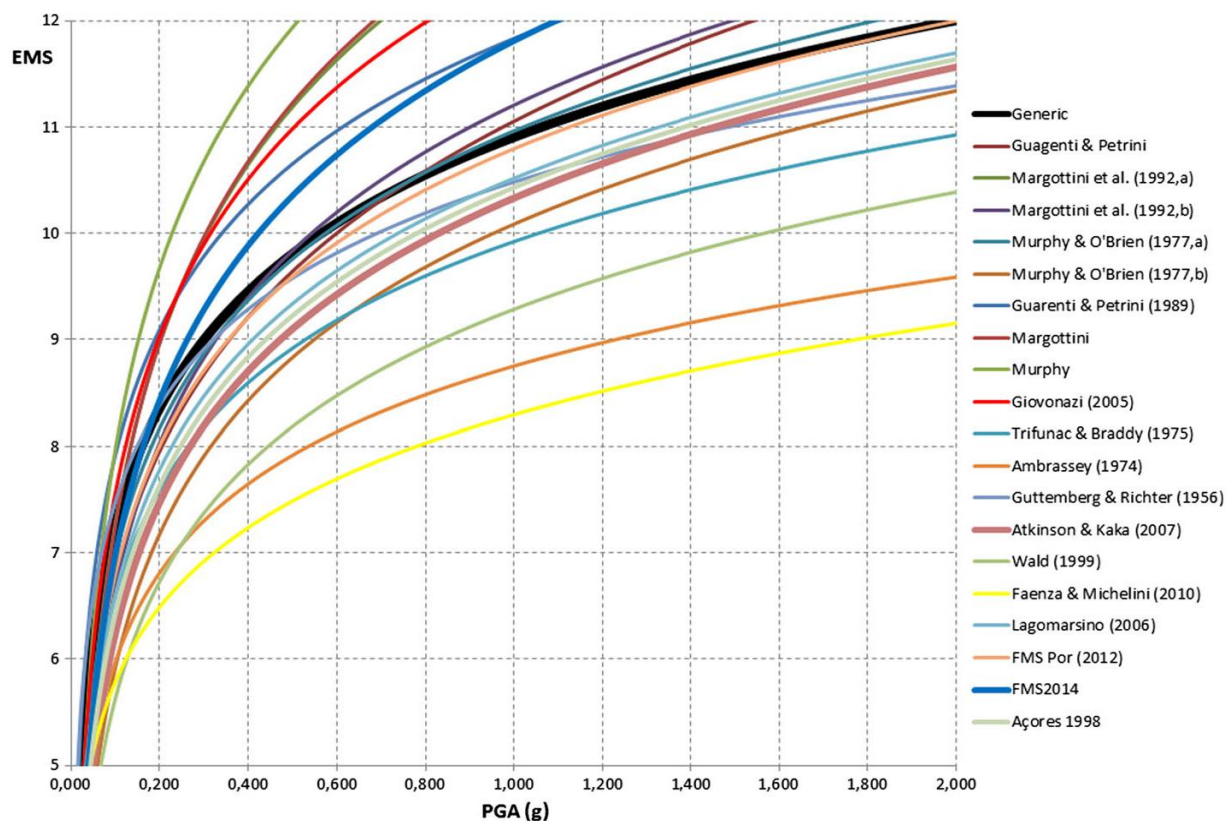
Η προσομοίωση επικεντρώνεται στις επιπτώσεις από τις ζημίες στα κτίρια και στις άλλες κατασκευές, σύμφωνα με διαφορετικά σενάρια που ήδη υπάρχουν στη βιβλιοθήκη του προγράμματος. Εάν αναπτυχθεί ένα νέο σενάριο, προστίθεται αυτόματα στην υπάρχουσα βιβλιοθήκη του QuakeIST. Το QuakeIST δίνει δυνατότητα δύο τρόπων προσδιορισμού της εδαφικής κίνησης: (1) την παροχή ενός αρχείου κειμένου με τιμές εδάφους σε κάποια συγκεκριμένα σημεία που ορίζονται από τις συντεταγμένες τους, ή (2) την παροχή συντεταγμένων επίκεντρου και μίας τιμής μεγέθους “M_w” ή έντασης “I₀”.



Γράφημα 5.1: Οι σχέσεις εξασθένησης που είναι διαθέσιμες στη βιβλιοθήκη του QuakeIST (Πηγή: Sá et al. 2016)

Ένα μεγάλο πλήθος τύπων εξασθένησης και μετασχηματισμών GMPE, PGA, PGV στην κλίμακα έντασης EMS-98 εμπεριέχονται στο μοντέλο εδαφικής κίνησης. Το Γράφημα 5.1 παρουσιάζει ένα σύνολο καμπυλών εξασθένησης που είναι ήδη διαθέσιμες, ενώ το Γράφημα 5.2 απεικονίζει τις μετατροπές αναφορικά με τις παραμέτρους της εδαφικής κίνησης. Τα δύο

γραφήματα δείχνουν την τεράστια διασπορά για αυτά τα δύο θέματα. Πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή της συνάρτησης εξασθένησης και των νόμων μετατροπής είναι πολύ σημαντική. Η ορθή επιλογή και προσαρμογή αυτών των λειτουργιών θα περιορίσει τις αβεβαιότητες στα τελικά αποτελέσματα (Sá et al. 2016).



Γράφημα 5.2: Μετατροπή μεταξύ PGA και μακροσεισμικής έντασης (Πηγή: Sá et al, 2016)

5.7. Ενότητα αποτελεσμάτων

Για την κατανόηση των σεισμικών σεναρίων, τα αποτελέσματα υπολογίζονται για κάθε κατασκευή με τη μορφή του αριθμού των κτιρίων που έφτασαν ή ξεπέρασαν κάθε κατάσταση βλάβης, $rr_k = P[D_s > k]$. Το QuakeIST μπορεί επίσης να παρέχει κατανομή βλαβών ανά τυπολογία κτιρίου (πλήθος κτιρίων ίδιας κατηγορίας σε κάθε στάθμη βλαβών) ή τη συνολική κατανομή βλαβών (άθροισμα όλων των κτιρίων σε κάθε κατάσταση βλάβης). Χρησιμοποιώντας τους πίνακες που προκύπτουν, μπορούν να δημιουργηθούν αρκετοί χάρτες με γεωγραφικά καταγεγραμμένες βλάβες σε οποιαδήποτε πλατφόρμα GIS. Αυτοί οι χάρτες αποτελούν ένα εύκολα επεξεργάσιμο αποτέλεσμα, που μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων από τους αρμόδιους φορείς (Sá et al. 2016).

Κεφάλαιο 6^ο: Εκτίμηση σεισμικής επικινδυνότητας Χανίων

Όπως έχει αναφερθεί προηγουμένως, για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας κάθε περιοχής, χρειάζεται προσαρμογή της διεργασίας πάνω στα διαθέσιμα δεδομένα. Συγκεκριμένα, για την περιοχή του αστικού συγκροτήματος της πόλης των Χανίων θα εισαχθούν τα παρακάτω στοιχεία:

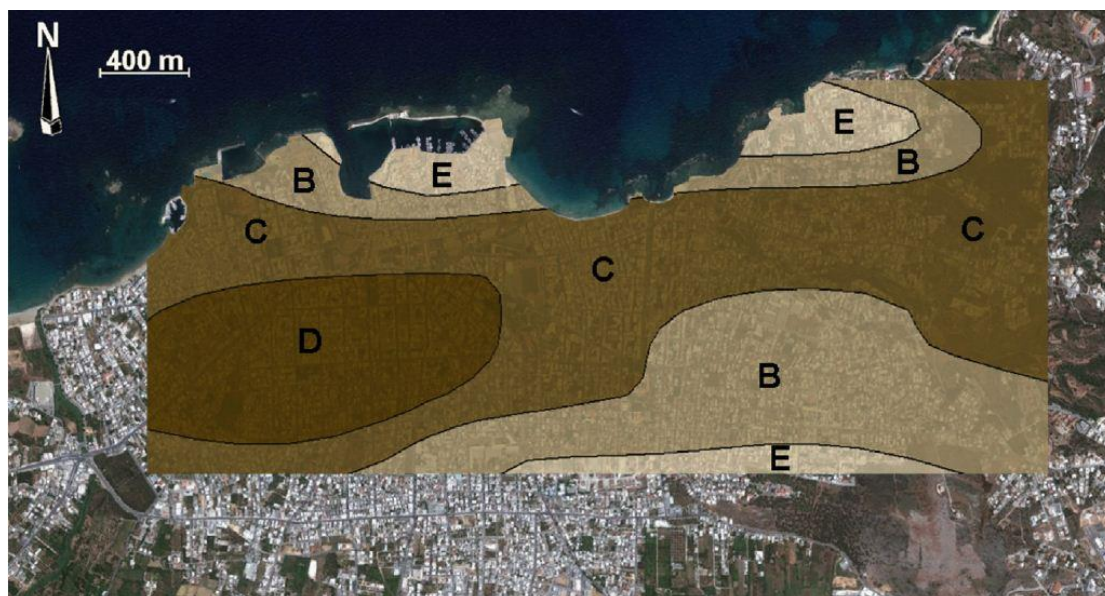
- Εδαφικές συνθήκες.
- Πίνακας τρωτότητας.
- Κτίρια.
- Άλλες κατασκευές.
- Λίστα κατασκευών.
- Σεισμικό σενάριο.

6.1. Εδαφικές συνθήκες

Τα δεδομένα των εδαφικών συνθηκών που πρέπει να εισαχθούν φαίνονται στον Πίνακα 6.1. Για τον καταρτισμό του Πίνακα 6.1 των εδαφικών συνθηκών θα γίνει χρήση του προγράμματος QGIS. Έχοντας εισάγει τα shape files για το αστικό συγκρότημα της πόλης των Χανίων από τη μελέτη των Sarris et al. (2010), χρειάζεται να γίνει διαχωρισμός του υπεδάφους ανά περιοχές με παρόμοια χαρακτηριστικά. Για κάθε περιοχή θα υπολογιστούν οι συντεταγμένες του κέντρου βάρους, επομένως χρειάζεται τα τμήματα να είναι κατά το δυνατόν συμμετρικού σχήματος, έτσι ώστε να αποτελέσματα να είναι όσο γίνεται ακριβέστερα. Ο χαρακτηρισμός του εδάφους βασίζεται στη μελέτη Pelekis et al. (2013) και φαίνεται στην Εικόνα 6.1.

Πίνακας 6.1: Στοιχεία εδαφικών συνθηκών

\in\shake\surface ground motion.txt			
Field Name	Field Description	Field Class	Values Domain
SUID	Surface Ground Motion ID	Integer (Long)	Sorted in ascending order
Lat	Latitude (decimal degrees)	Float (Double)	
Long	Longitude (decimal degrees)	Float (Double)	
AREA	Area (km2)	Float (Double)	
PERIM	Perimeter (km)	Float (Double)	
DS	Demand Spectrum	Text [10]	

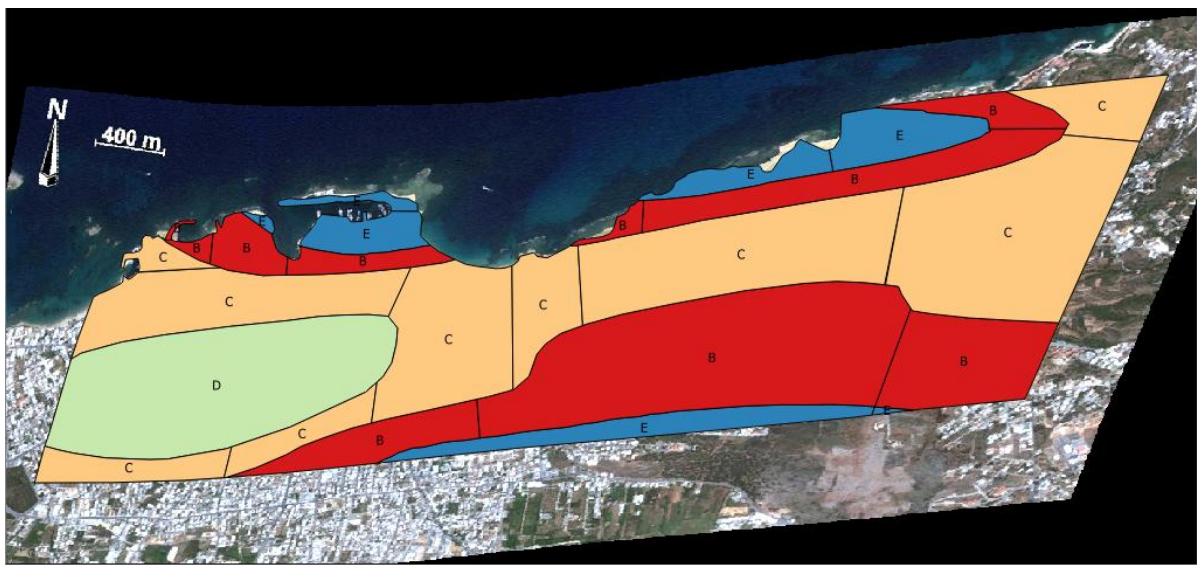


Εικόνα 6.1: Χάρτης κατηγοριών εδάφους στο αστικό συγκρότημα με βάση των EC8 (Πηγή: Pelekis et al. 2013)

Η Εικόνα 6.1 εισήχθη στο QGIS και δημιουργήθηκε νέο Layer στο QGIS με διαφορετικό χαρακτηρισμό για κάθενα από τα τμήματα εδάφους. Το κάθε εδαφικό τμήμα δεν υπερκαλύπτει τα γειτονικά του (κάθε σημείο ανήκει σε ένα μόνο εδαφικό τμήμα), κάτι το οποίο επιτεύχθηκε μέσω ανάλογης λειτουργίας του QGIS (προσαρμογή Snapping Options σε “to vertex and segment” κατά τον σχεδιασμό των επιπέδων). Κατόπιν το κάθε εδαφικό τμήμα χωρίστηκε σε μικρότερα (με την εντολή Split Features του QGIS) έτσι ώστε να έχουν όσο το δυνατόν πιο συμμετρικό σχήμα. Ανάλογα με την κατηγοριοποίηση του κάθε τμήματος, προκύπτει και η αντίστοιχη παράμετρος στο πεδίο DS (πάντα με βάση τον EC8), με τη μορφή που απαιτείται από το QuakeIST (EC8IIA-EC8IIE).



Εικόνα 6.2: Ψηφιοποιημένος χάρτης στο QGIS



Εικόνα 6.3: Διαχωρισμός εδαφικών τμημάτων

Μετά τον υπολογισμό του DS, χρειάζεται να γίνει υπολογισμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των εδαφικών τμημάτων. Ανοίγοντας τον Πίνακα Περιεχομένων του επιπέδου με τα εδαφικά τμήματα, χρησιμοποιείται το εργαλείο “Field Calculator”. Αφού επιλέξουμε οι υπολογισμοί μας να τοποθετηθούν σε μια νέα στήλη, ορίσουμε τον τύπο των δεδομένων και ψηφία (πραγματικός αριθμός με 10 ψηφία), επιλέγουμε από το μενού Geometry της επιλογής \$area την πρώτη φορά και \$perimeter τη δεύτερη. Το εμβαδόν και η περίμετρος αντίστοιχα δημιουργήθηκαν ως επιπλέον στήλες του πίνακα του επιπέδου.

Για τον υπολογισμό όλων των δεδομένων βασιζόμαστε στο σύστημα συντεταγμένων WGS84, το οποίο αφενός είναι συμβατό με το Quake1ST και αφετέρου είναι πιο διαδομένο λόγω της

διανθούς εφαρμογής του. Για τον υπολογισμό των συντεταγμένων του κέντρου βάρους, θα δημιουργήσουμε ένα καινούριο επίπεδο, χρησιμοποιώντας το εργαλείο “Polygon Centroids”, από το μενού Vector, Geometry Tools. Το συγκεκριμένο εργαλείο δημιουργεί ένα νέο επίπεδο με τα σημεία που αναζητούμε. Ακολούθως, μέσω του “Field Calculator” μέσα στον Πίνακα Περιεχομένων του νέου επιπέδου, δημιουργούμε δύο νέες στήλες με τον ίδιο τρόπο όπως και προηγουμένως. Αυτήν τη φορά θα χρησιμοποιήσουμε τις συναρτήσεις $\$x$ και $\$y$, για να υπολογίσουμε το γεωγραφικό πλάτος και μήκος.

Για την εξαγωγή των δεδομένων σε μορφή διαχειρίσιμη από το QuakeIST χρησιμοποιήθηκε το Plugin του QGIS “XyTools”. Αφού το κατεβάσουμε και ενεργοποιήσουμε, χρησιμοποιούμε το εργαλείο “Save attribute table as Excel file” από το μενού Vector, XY Tools. Αφού εξάγουμε τα δεδομένα που υπολογίσαμε σε Excel και φροντίσουμε η διάταξη και η μορφή να είναι όπως στον Πίνακα 5.1, αποθηκεύουμε το αρχείο σε μορφή κειμένου (.txt) στη θέση \in\shake\surface ground. Το αποτέλεσμα που προκύπτει παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.4.

surface ground motion.txt - Notepad

File	Edit	Format	View	Help				
SUID	Lat	Long	AREA	PERIIM	DS			
1	35.517587		24.021586		130694.000000	1774.000000	EC8IIE	
2	35.519428		24.021056		35950.000000	1567.000000	EC8IIE	
3	35.518285		24.015748		9245.000000	474.000000	EC8IIE	
4	35.523099		24.051433		208313.000000	2062.000000	EC8IIE	
5	35.520932		24.043096		123308.000000	2362.000000	EC8IIE	
6	35.506744		24.037131		261758.000000	5157.000000	EC8IIE	
7	35.507710		24.050724		5276.000000	474.000000	EC8IIE	
8	35.517905		24.011008		4585.000000	477.000000	EC8IIB	
9	35.516795		24.012069		20838.000000	732.000000	EC8IIB	
10	35.516803		24.014870		107832.000000	1402.000000	EC8IIB	
11	35.516066		24.021374		96663.000000	1945.000000	EC8IIB	
12	35.524485		24.056648		112698.000000	2112.000000	EC8IIB	
13	35.520656		24.048923		369441.000000	4722.000000	EC8IIB	
14	35.518067		24.035915		30015.000000	1092.000000	EC8IIB	
15	35.506044		24.022334		226722.000000	2934.000000	EC8IIB	
16	35.510460		24.055011		415972.000000	2672.000000	EC8IIB	
17	35.510664		24.040918		1344031.000000	5443.000000	EC8IIB	
18	35.513799		24.013913		528814.000000	4097.000000	EC8IIC	
19	35.516290		24.010220		53710.000000	1360.000000	EC8IIC	
20	35.504503		24.008306		157164.000000	2360.000000	EC8IIC	
21	35.506417		24.018001		130010.000000	2120.000000	EC8IIC	
22	35.511689		24.026198		539221.000000	3073.000000	EC8IIC	
23	35.513625		24.031489		210016.000000	2233.000000	EC8IIC	
24	35.516443		24.042574		802061.000000	4375.000000	EC8IIC	
25	35.524740		24.062776		192775.000000	2133.000000	EC8IIC	
26	35.517667		24.057494		1003495.000000	4078.000000	EC8IIC	
27	35.509118		24.013191		1124734.000000	4466.000000	EC8IID	

Εικόνα 6.4: Πίνακας εδαφικών συνθηκών

6.2. Πίνακας τρωτότητας

Στο QuakeIST οι κατασκευές πρέπει να περιγράφονται με τους όρους της χωρικής τους θέσης (συντεταγμένες) και της σεισμικής τους συμπεριφοράς. Οι κατασκευές είναι κτίρια, νοσοκομεία, σχολεία, κλπ. Κάθε τύπος αντικειμένου θα έχει έναν σχετικό πίνακα τρωτότητας. Εφόσον το έδαφος είναι καθορισμένο και χαρακτηρισμένο, θα πρέπει να δημιουργηθούν οι πίνακες τρωτότητας για τα κτίρια της εξεταζόμενης περιοχής. Το συγκεκριμένο εγχείρημα είναι και το πιο περίπλοκο, καθώς χρειάζεται η λήψη ορισμένων παραδοχών και η ομαδοποίηση της τρωτότητας των κτιρίων. Στον Πίνακα 6.2 παρατίθενται τα στοιχεία που εμπεριέχει ο εν λόγω πίνακας τρωτότητας που χρησιμοποιήθηκε.

Πίνακας 6.2: Στοιχεία τρωτότητας κτιρίων

\in\objects\vulnerabilities\Buildings.txt			
Field Name	Field Description	Field Class	Values Domain
VClass	Vulnerability Class	Integer (Long)	
CalcProc	Calculus Procedure	Text[6]	{G&L;CS,CSBL,N2,Frg}
Vu	Vulnerability	Float (Double)	
Q	Equivalent Macro Seismic Ductility	Float (Double)	
Te	Elastic Period (s)	Float (Double)	
Sdy	Yeld Displacement (cm)	Float (Double)	
Say	Yeld Capacity (cm/s2)	Float (Double)	
Sdu	Ultimate Displacement (cm)	Float (Double)	
Sau	Ultimate Capacity (cm/s2)	Float (Double)	
Duct	Ductility	Float (Double)	
k	Histeresis Correction Factor	Float (Double)	
m1	Median, μ_1 , for Damage Grade 1 (cm, cm/s2)	Float (Double)	
b1	(Log) Standard Deviation, β_1 , for Damage Grade 1	Float (Double)	
m2	Median, μ_2 , for Damage Grade 2 (cm, cm/s2)	Float (Double)	
b2	(Log) Standard Deviation, β_2 , for Damage Grade 2	Float (Double)	
m3	Median, μ_3 , for Damage Grade 3 (cm, cm/s2)	Float (Double)	
b3	(Log) Standard Deviation, β_3 , for Damage Grade 3	Float (Double)	
m4	Median, μ_4 , for Damage Grade 4 (cm, cm/s2)	Float (Double)	
b4	(Log) Standard Deviation, β_4 , for Damage Grade 4	Float (Double)	

Για τις τιμές της τρωτότητας χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές της μελέτης των Lagomarsino & Giovinazzi (2006), ενώ για διαφοροποιήσεις από αυτές με βάση τα χαρακτηριστικά των κτιρίων, ελήφθησαν υπόψη οι οδηγίες της μελέτης των Giovinazzi & Lagomarsino (2004). Με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα για το αστικό συγκρότημα των Χανίων και με βάση της κατηγορίες τιμών τρωτότητας της προαναφερθείσας μελέτης, ελήφθησαν ορισμένες τιμές, στη βάση κάποιων παραδοχών, που αναφέρονται αναλυτικά στη συνέχεια.

Αρχικά, θεωρούμε ότι υπάρχουν δύο βασικά υλικά κατασκευής κτιρίων στην περιοχή μελέτης:

- Με φέροντα οργανισμό από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ ή RC).
- Με φέροντα οργανισμό από λιθοδομή/τοιχοποιία (Μ).

Η παραδοχή αυτή δεν πλήττει την αξιοπιστία της μελέτης, καθώς στην εξεταζόμενη περιοχή τα κτίρια με διαφορετικά υλικά κατασκευής είναι ελάχιστα.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι τα διαθέσιμα δεδομένα είναι ανά οικοδομικό τετράγωνο και όχι ανά κτίριο. Επομένως, και τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν θα είναι αντίστοιχης κλίμακας. Όπως είναι προφανές, σε κάθε τετράγωνο τα χαρακτηριστικά των κτιρίων είναι διαφορετικά. Οπότε, δημιουργήθηκαν τρεις κατηγορίες οικοδομικών τετραγώνων ανάλογα με το υλικό δόμησης:

- 0-25% κτίρια από λιθοδομή και 75-100% κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- 25-75%, κτίρια από λιθοδομή και 25-75% κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα.
- 75-100% κτίρια από λιθοδομή και 0-25% κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα.

Η τιμή της δομικής τρωτότητας πάρθηκε με γραμμική παρεμβολή ανάλογα με το ποσοστό του κάθε υλικού κατασκευής. Επίσης, οι κατηγορίες οικοδομικών τετραγώνων ανάλογα με τον αριθμό ορόφων είναι δύο:

- Μέχρι και 3 ορόφους.
- Πάνω από 3 ορόφους.

Για το κάθε οικοδομικό τετράγωνο χρησιμοποιείται ο μέσος όρος αριθμός ορόφων των περιεχόμενων κτιρίων. Οι αρχικές τιμές που ελήφθησαν για τις τρωτότητες των κατασκευών είναι αυτές που φαίνονται στον Πίνακα 6.3.

Πίνακας 6.3: Τιμές τρωτότητας των κτιρίων της πόλης των Χανίων

	Χαρακτηρισμός	V	Q	T	ay	μ	dy	du
M6L	Χαμηλά κτίρια λιθοδομής	0.57	2.3	0.211	0.324	4.79	0.0036	0.0171
M6H	Ψηλά κτίρια λιθοδομής	0.65	2.3	0.355	0.256	3.25	0.0080	0.0260
RC1L	Χαμηλά κτίρια από Ο/Σ	0.50	2.3	0.437	.0363	3.00	0.0173	0.0518
RC1H	Ψηλά κτίρια από Ο/Σ	0.48	2.3	0.642	0.263	3.00	0.0269	0.0806

Η επίδραση της παλαιότητας της κατασκευής εισάγεται μέσω της τιμής “state of preservation”, σύμφωνα με την οποία τα κτίρια χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες παλαιότητας σύμφωνα με τη μελέτη των Giovinazzi & Lagomarsino (2004):

- Τα κτίρια που έχουν κατασκευαστεί μέχρι και το 1960, όπου η τιμή της τρωτότητας αυξάνεται κατά 0.04 και 0.02 για τα κτίρια από λιθοδομή και από Ο/Σ, αντίστοιχα.
- Κτίρια κατασκευασμένα από το 1961 έως και το 1990, όπου η τιμή της τρωτότητας αυξάνεται κατά 0.01 για τα κτίρια από Ο/Σ και μένει αμετάβλητη για τα κτίρια από λιθοδομή.
- Κτίρια από το 1991 έως και σήμερα (σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν και τα υπό κατασκευή κτίρια), όπου η τιμή της τρωτότητας μειώνεται κατά 0.04 για τα κτίρια από λιθοδομή και μένει αμετάβλητη για τα αντίστοιχα από Ο/Σ.

Επίσης, για κατασκευές από λιθοδομή με στέγη, η τρωτότητα αυξάνεται κατά 0.04, ενώ η αντίστοιχη για τα κτίρια από Ο/Σ παραμένει ανεπηρέαστη. Τα υπόλοιπα κελιά του πίνακα τρωτότητας δεν θα χρησιμοποιηθούν, λόγω έλλειψης αξιόπιστων δεδομένων.

VClass	CalcProc	Vu	Q	Te	Sdy	Say	Sdu	Sau	Duct	k	m1	b1
1	G&L	0.5175	2.3	0.40875	0.358125	3.22375	0.0155875	0.0474625	0	0	0	0
2	G&L	0.5225	2.3	0.40875	0.358125	3.22375	0.0155875	0.0474625	0	0	0	0
3	G&L	0.53125	2.3	0.40875	0.358125	3.22375	0.0155875	0.0474625	0	0	0	0
4	G&L	0.53625	2.3	0.40875	0.358125	3.22375	0.0155875	0.0474625	0	0	0	0
5	G&L	0.50375	2.3	0.40875	0.358125	3.22375	0.0155875	0.0474625	0	0	0	0
6	G&L	0.50875	2.3	0.40875	0.358125	3.22375	0.0155875	0.0474625	0	0	0	0
7	G&L	0.54	2.3	0.324	0.3435	3.895	0.01045	0.03445	0	0	0	0
8	G&L	0.56	2.3	0.324	0.3435	3.895	0.01045	0.03445	0	0	0	0
9	G&L	0.565	2.3	0.324	0.3435	3.895	0.01045	0.03445	0	0	0	0
10	G&L	0.585	2.3	0.324	0.3435	3.895	0.01045	0.03445	0	0	0	0
11	G&L	0.515	2.3	0.324	0.3435	3.895	0.01045	0.03445	0	0	0	0
12	G&L	0.535	2.3	0.324	0.3435	3.895	0.01045	0.03445	0	0	0	0
13	G&L	0.5625	2.3	0.23925	0.328875	4.56625	0.0053125	0.0214375	0	0	0	0
14	G&L	0.5975	2.3	0.23925	0.328875	4.56625	0.0053125	0.0214375	0	0	0	0
15	G&L	0.59875	2.3	0.23925	0.328875	4.56625	0.0053125	0.0214375	0	0	0	0
16	G&L	0.63375	2.3	0.23925	0.328875	4.56625	0.0053125	0.0214375	0	0	0	0
17	G&L	0.52625	2.3	0.23925	0.328875	4.56625	0.0053125	0.0214375	0	0	0	0
18	G&L	0.56125	2.3	0.23925	0.328875	4.56625	0.0053125	0.0214375	0	0	0	0
19	G&L	0.51	2.3	0.606125		0.262125	3.03125	0.0245375	0.073775	0	0	0
20	G&L	0.515	2.3	0.606125		0.262125	3.03125	0.0245375	0.073775	0	0	0

Εικόνα 6.5: Πίνακας τρωτότητας των κτιρίων της πόλης των Χανίων

Με βάση τα προαναφερθέντα δεδομένα ολοκληρώνεται ο πίνακας των τρωτοτήτων, που φαίνεται στην Εικόνα 6.5, και αποθηκεύεται σε μορφή αρχείου txt στο φάκελο in\objects\vulnerabilities. Η μέθοδος υπολογισμού που ορίστηκε στο QuakeIST είναι η G&L, όπως ορίστηκε στην εργασία των Sá et al. (2016). Η μέθοδος αυτή παραγματοποιεί ανάλυση σεισμικού κινδύνου, βασιζόμενη στην αξιολόγηση των τοπικών συνθηκών. Αναπτύχθηκε από τους Giovinazzi & Lagomarsino (2004) με σκοπό τον προγραμματισμό στρατηγικών προστασίας από σεισμούς και

τη διαχείριση εκτάκτων αναγκών. Πρόκειται για μια μακρο-σεισμική μέθοδο αξιολόγησης της τρωτότητας μιας κατοικημένης περιοχής, βασιζόμενη στη θεωρία πιθανοτήτων των ασαφών συνόλων και τους ορισμούς της μακροσφαιρικής κλίμακας.

6.3. Πίνακας κτιρίων

Μετά τον καθορισμό των εδαφικών συνθηκών και του πίνακα τρωτότητας των κτιρίων της πόλης των Χανίων, ακολουθεί ο καθορισμός του πίνακα του QuakeIST των κτιρίων της πόλης των Χανίων. Τα δεδομένα που απαιτούνται φαίνονται στον Πίνακα 6.4. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται αναφέρονται σε κάθε οικοδομικό τετράγωνο.

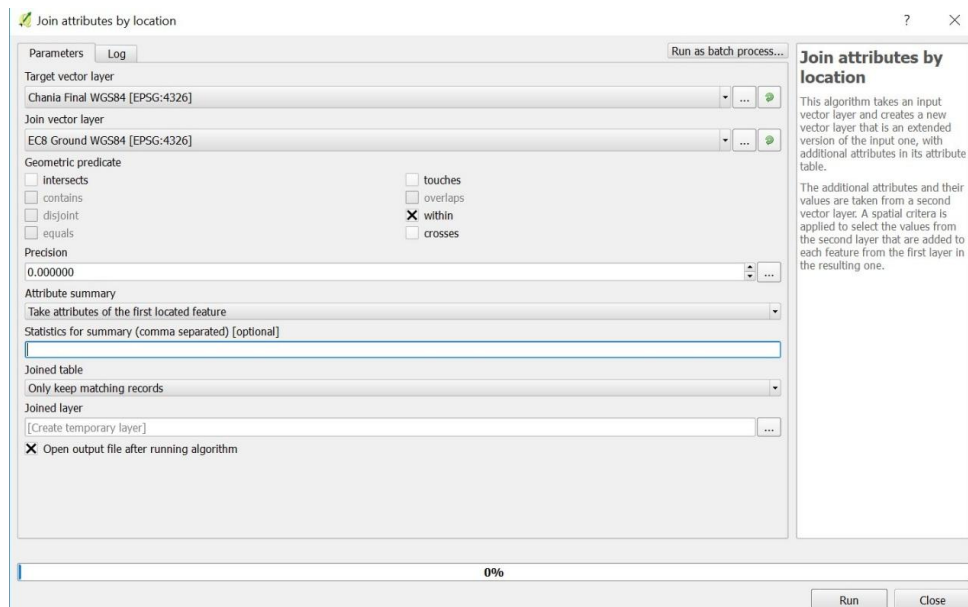
Πίνακας 6.4: Στοιχεία πίνακα του QuakeIST των κτιρίων της πόλης των Χανίων

\in\objects\some_object.txt		
Field Name	Field Description	Field Class
Oid	Object Unique Identifier	Integer (Long)
TYPE	Object Type (optional)	Text [20]
SUID	Surface Ground Motion ID	Integer (Long)
Lat	Latitude (decimal degrees)	Float (Double)
Lng	Longitude (decimal degrees)	Float (Double)
N	Number of Objects at (Lat, Long)	Float (Double)
VClass	Vulnerability Class	Integer (Long)

Για τη δημιουργία του πίνακα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από τη μελέτη Sarris et al. (2010). Η βάση δεδομένων για κάθε οικοδομικό τετράγωνο έχει δεδομένα για τις συντεταγμένες του και τον αριθμό των κτιρίων που εμπεριέχονται σε αυτό. Επομένως, χρειάζεται μόνο ο καθορισμός της δομικής τρωτότητας και οι εδαφικές συνθήκες του συγκεκριμένου οικοδομικού τετραγώνου (δεδομένα από πίνακες που ήδη έχουν δημιουργηθεί). Πρέπει να σημειωθεί ότι όλα τα δεδομένα της παραπάνω μελέτης είναι σε σύστημα συντεταγμένων GGRS87/ Greek Grid, επομένως έγινε μετατροπή μέσω του QGIS σε WGS84.

Για τον καθορισμό της τρωτότητας, χρησιμοποιείται κατάλληλη συνάρτηση στο λογισμικό Excel, έτσι ώστε να καθορίζεται η τιμή από τον πίνακα που δημιουργήθηκε στην προηγούμενη ενότητα, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε οικοδομικού τετραγώνου. Για τον καθορισμό των εδαφικών συνθηκών χρησιμοποιούμε το λογισμικό QGIS. Συγκεκριμένα το εργαλείο “Join Attributes by location” του μενού Vector, Data Management Tools. Με αυτόν τον τρόπο συνδέουμε (δημιουργώντας ένα νέο επίπεδο) τα επίπεδα των κτιρίων με αυτό των εδαφικών συνθηκών (Εικόνα 6.6). Επιλέγοντας “within” και “Only keep matching records” έχει ως

αποτέλεσμα ένα νέο επίπεδο, το οποίο θα έχει όλα τα δεδομένα των κτιρίων, αλλά επίσης και τα δεδομένα των εδαφικών συνθηκών του τμήματος του εδάφους που βρίσκεται το εξεταζόμενο οικοδομικό τετράγωνο. Με τρόπο ανάλογο με τις προηγούμενες ενότητες, το shape file μετατρέπεται σε Excel και μετά σε txt (Εικόνα 6.7) και τοποθετείται στο φάκελο \in\objects.



Εικόνα 6.6: Διαδικασία “Join Attributes by location”

ID	TYPE	SUID	Lat	Lng	N	VClass		
23	Ktirio	3	35.52363		24.04998	5	5	
26	Ktirio	6	35.5247	24.05767	3	6		
27	Ktirio	6	35.52275		24.05578	10	16	
28	Ktirio	6	35.52259		24.05816	11	10	
30	Ktirio	3	35.52248		24.04628	4	10	
31	Ktirio	6	35.5213	24.05661	4	12		
32	Ktirio	3	35.52215		24.04554	3	9	
33	Ktirio	6	35.52115		24.05474	3	1	
34	Ktirio	3	35.52168		24.05029	9	5	
35	Ktirio	8	35.52147		24.05761	4	7	
37	Ktirio	6	35.52105		24.05244	8	1	
38	Ktirio	6	35.52101		24.05092	3	1	
40	Ktirio	6	35.5207	24.0468	21	9		
41	Ktirio	3	35.52117		24.04537	1	16	
44	Ktirio	3	35.52106		24.04356	8	8	
45	Ktirio	3	35.52104		24.0427	2	1	
46	Ktirio	3	35.52096		24.04229	3	10	
47	Ktirio	3	35.52102		24.0419	8	10	
48	Ktirio	3	35.5209	24.04151	1	16		
49	Ktirio	3	35.52086		24.04094	16	8	
50	Ktirio	3	35.52065		24.03977	2	12	
51	Ktirio	8	35.52004		24.05821	7	1	
52	Ktirio	6	35.52039		24.04488	3	9	
53	Ktirio	3	35.52057		24.04377	11	10	

Εικόνα 6.7: Ενδεικτικός πίνακας κτιρίων

6.4. Άλλες κατασκευές

Όπως έγινε με τα κτίρια, υπάρχει δυνατότητα να προστεθούν και άλλες κατασκευές που βρίσκονται εντός της περιοχής μελέτης. Τέτοιες κατασκευές μπορεί να είναι, σταθμοί υψηλής τάσης, δίκτυα κοινής ωφέλειας, όπως δίκτυα ύδρευσης και φυσικού αερίου, σχολεία, νοσοκομεία γέφυρες, κλπ. Για κάθε επιπλέον κατασκευή που προστίθεται χρειάζεται να δημιουργείται και ο αντίστοιχος πίνακας τρωτότητας, όπως έγινε στα κτίρια.

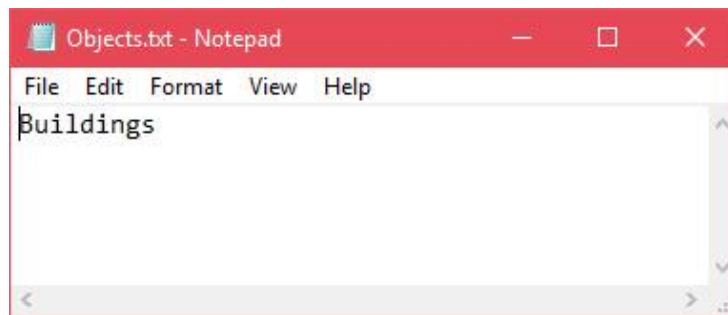
Όπως παρατηρούμε στον Πίνακα 6.5, ο πίνακας των άλλων κατασκευών διαφέρει από αυτόν των κτιρίων. Στην παρούσα εργασία δεν θα εξετασθούν άλλες κατασκευές, λόγω έλλειψης πρωτογενών δεδομένων και αδυναμίας υλοποίησης του κατάλληλου πίνακα τρωτότητας.

Πίνακας 6.5: Στοιχεία άλλων κατασκευών

\in\objects\vulnerabilities\Buildings.txt			
Field Name	Field Description	Field Class	Values Domain
VClass	Vulnerability Class	Integer (Long)	
CalcProc	Calculus Procedure	Text[6]	{G&L;CS,CSBL,N2,Frg}
Vu	Vulnerability	Float (Double)	
Q	Equivalent Macro Seismic Ductility	Float (Double)	
Te	Elastic Period (s)	Float (Double)	
Sdy	Yeld Displacement (cm)	Float (Double)	
Say	Yeld Capacity (cm/s2)	Float (Double)	
Sdu	Ultimate Displacement (cm)	Float (Double)	
Sau	Ultimate Capacity (cm/s2)	Float (Double)	
Duct	Ductility	Float (Double)	
k	Histeresis Correction Factor	Float (Double)	
m1	Median, μ_1 , for Damage Grade 1 (cm, cm/s2)	Float (Double)	
b1	(Log) Standard Deviation, β_1 , for Damage Grade 1	Float (Double)	
m2	Median, μ_2 , for Damage Grade 2 (cm, cm/s2)	Float (Double)	
b2	(Log) Standard Deviation, β_2 , for Damage Grade 2	Float (Double)	
m3	Median, μ_3 , for Damage Grade 3 (cm, cm/s2)	Float (Double)	
b3	(Log) Standard Deviation, β_3 , for Damage Grade 3	Float (Double)	
m4	Median, μ_4 , for Damage Grade 4 (cm, cm/s2)	Float (Double)	
b4	(Log) Standard Deviation, β_4 , for Damage Grade 4	Float (Double)	

6.5. Λίστα κατασκευών

Προκειμένου το QuakeIST να εξετάσει όλες τις πληροφορίες που αφορούν τα κτίρια και τις λοιπές κατασκευές, πρέπει να ορίσουμε τα αρχεία που δημιουργήσαμε ώστε να χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Αυτό γίνεται στο αρχείο \ in \ objects \ Objects.txt, απλά γράφοντας ονόματα αρχείων σε κάθε γραμμή και αποθηκεύοντας το απλά ως αρχείο κειμένου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6.8.



Εικόνα 6.8: Αρχείο λίστας κατασκευών

6.6. Σεισμικό σενάριο

Αφού έχουν εισαχθεί όλα τα δεδομένα στο QuakeIST, χρειάζεται να ορίσουμε το σεισμικό σενάριο σύμφωνα με το οποίο θα κάνει τους υπολογισμούς. Το QuakeIST περιέχει μια βιβλιοθήκη με αρκετά μοντέλα, έτσι ώστε ο χρήστης να εφαρμόσει το πλησιέστερο στις δικές του ανάγκες. Εκτός από τα έτοιμα σενάρια που διαθέτει το QuakeIST, δίνει επιπλέον τη δυνατότητα στον χρήστη να φτιάξει το δικό του «εξωτερικό σενάριο» (external scenario). Για να γίνει αυτό, χρειάζεται να υπάρχουν διαθέσιμα σεισμικά δεδομένα για την εξεταζόμενη περιοχή. Στην περίπτωση του εξωτερικού σεναρίου, που επιλέχθηκε και στην παρούσα μελέτη, το QuakeIST θα υπολογίσει τη χωρική μεταβολή της εδαφικής κίνησης χρησιμοποιώντας τα σεισμικά και εδαφικά δεδομένα της περιοχής. Η δομή των σεισμικών δεδομένων που θα πρέπει να εισαχθούν παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.6.

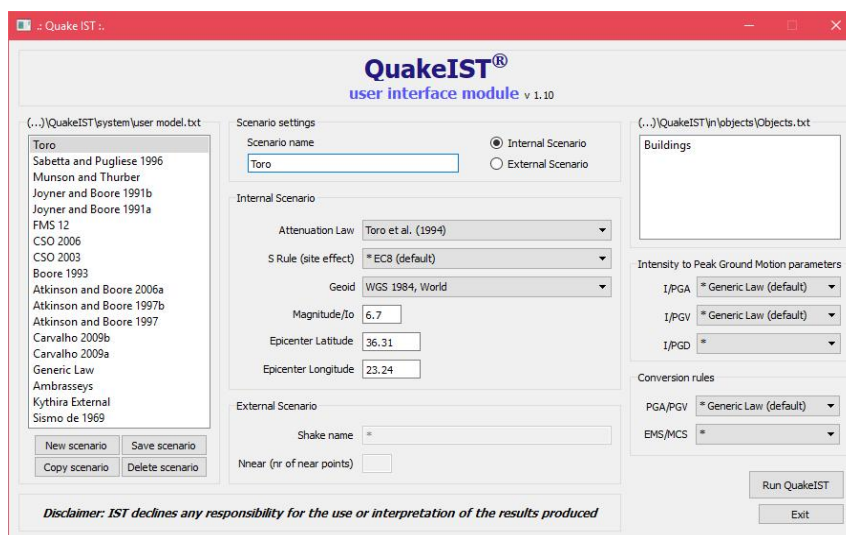
Πίνακας 6.6: Στοιχεία εξωτερικού σεισμικού σεναρίου

\in\shake\external scenario name.txt				
Line 0	Scenario name (up to 255 characters)			
Line 1	Scenario description (up to 255 characters)			
Line 2	Ground Shaking Units {EMS, MMS, MSK, MCS, m/s ² , cm/s ² , g, m/s, cm/s}			
Line 3 ...	Geoid name			
Line 4 ...	Field Name	Field Description	Field Class	Observations
	Lat	WGS84 Latitude (in decimal degrees)	Float (Double)	
	Long	WGS84 Longitude (in decimal degrees)	Float (Double)	
	ShakeV	Ground Shaking Value (in Ground Shaking Units specified in Line 2)	Float (Double)	

Στη παρούσα μελέτη θα χρησιμοποιηθεί ως βασικό σενάριο ο σεισμός που έλαβε χώρα στην περιοχή των Κυθήρων το 2006 με μέγεθος 6.7 Ρίχτερ. Τα δεδομένα που απαιτούνται για την εισαγωγή του σεισμικού γεγονότος στο QuakeIST προέρχονται από τη μελέτη των Konstantinou et al. (2006). Ο πίνακας της Εικόνα 6.9 αποθηκεύεται σε μορφή txt και τοποθετείται στο φάκελο \in\shake\external scenario.

Kythira		
Scenario generated in Kythira, Greece, in 8 Jan 2006 with Mw6.7 mg		
WGS 1984, World		
36.300000	22.970000	120.0000
36.472000	23.101000	130.0000
35.517000	24.021000	41.00000
36.820000	21.961000	24.00000
35.318000	25.102000	50.00000
37.931000	23.698000	17.00000
37.960000	23.610000	16.00000
37.930000	22.930000	23.00000
37.960000	23.670000	25.00000
37.960000	23.730000	6.000000
37.973000	23.718000	6.000000
38.000000	23.820000	13.00000
38.000000	23.710000	28.00000
38.001000	23.774000	11.00000
38.000000	23.790000	10.00000
38.020000	23.690000	20.00000
37.101000	25.374000	3.000000
38.000000	22.630000	26.00000
38.320000	23.318000	13.00000
38.390000	24.050000	5.000000
38.470000	23.620000	7.000000
38.240000	21.720000	12.00000

Εικόνα 6.9: Πίνακας μοντέλου εξωτερικού σεναρίου



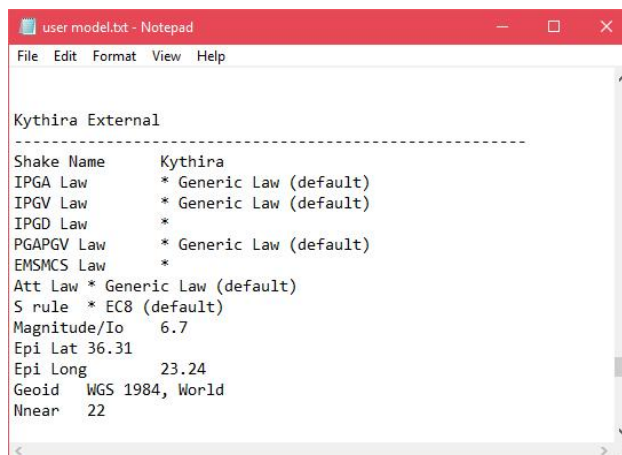
Εικόνα 6.10: Μενού εφαρμογής usermodule.exe

Τέλος, θα πρέπει να ορίσουμε στο QuakeIST τη χρήση του εξωτερικού σεναρίου. Αυτό γίνεται μέσω της εφαρμογής QuakeIST.bat (Εικόνα 6.10) που βρίσκεται μέσα στο φάκελο system. Μέσω της εφαρμογής προσαρμόζεται ανάλογα το αρχείο user model.txt (Εικόνα 6.11) στον φάκελο system, το οποίο ορίζει το πώς θα κάνει όλους τους υπολογισμούς το QuakeIST. Αφού ολοκληρωθεί και αυτό το στάδιο, με εκκίνηση της εφαρμογής QuakeIST.exe, το λογισμικό κάνει τους απαιτούμενους υπολογισμούς και δημιουργεί τα αρχεία αποτελεσμάτων.

6.7. Αποτελέσματα

Στις επόμενες σελίδες γίνεται αναλυτική γεωγραφική παρουσίαση (με χρήση του QGIS) των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Τα

αποτελέσματα βασίζονται στην κατηγοριοποίηση της κατάστασης των κτιρίων σύμφωνα με τον Πίνακα 6.7.



Εικόνα 6.11: Αρχείο user model.txt

Στις Εικόνες 6.12 έως 6.19, απεικονίζονται σε μορφή χαρτών όλα τα δεδομένα τα οποία εισήχθησαν στο QGIS σε μορφή πινάκων. Αρχικά, οι Εικόνες 6.12 έως 14 απεικονίζουν τα κτίρια ανάλογα με τη χρονολογία κατασκευής τους. Όπως είναι αναμενόμενο, κτίρια κατασκευασμένα πολλά χρόνια πριν αναμένεται να εμφανίζουν μεγαλύτερη σεισμική τρωτότητα. Αντιθέτως, πιο σύγχρονα κτίρια, που έχουν μελετηθεί με τα πρόσφατα υψηλά επίπεδα ασφαλείας που επιβάλλουν οι νέοι κανονισμοί, και έχουν κατασκευασθεί με υλικά υψηλής αντοχής και χωρίς τη φθορά του χρόνου, αναμένεται να εμφανίσουν περιορισμένες βλάβες.

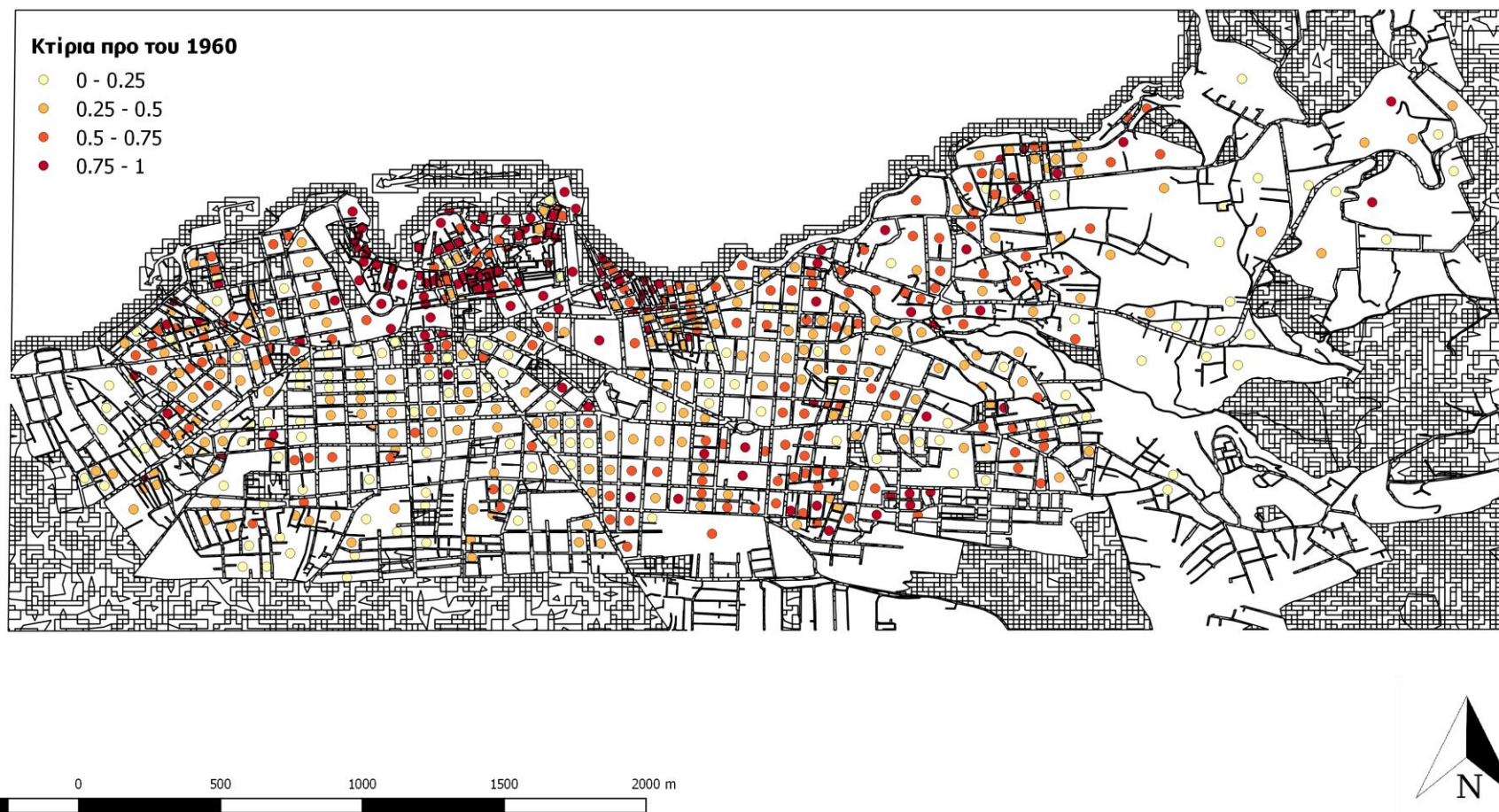
Παρατηρούμε ο αριθμός των κτιρίων κατασκευασμένων πριν το 1960 είναι αρκετά μεγάλος. Τα κτίρια αυτά συγκεντρώνονται κυρίως στην περιοχή της παλαιάς πόλης και στην περιοχή του Κουμ Καπί. Αλλά και στο υπόλοιπο τμήμα της ακτογραμμής εμφανίζεται αυξημένο ποσοστό παλαιών κτιρίων, όπως επίσης και στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη. Συνεπώς, τα πιο παλιά κτίρια συγκεντρώνονται στο πιο βόρειο τμήμα του αστικού συγκροτήματος (με εξαίρεση την περιοχή του Αγίου Ιωάννη), παράλληλα της ακτογραμμής. Στο νότιο και κεντρικό τμήμα του αστικού συγκροτήματος παρατηρείται αυξημένος αριθμός κτιρίων μεσαίας παλαιότητας. Έτσι χαρακτηρίζονται τα κτίρια που φτιάχτηκαν κατά την περίοδο της πιο απότομης ανοικοδόμησης της πόλης, κατά τα έτη 1961-1990. Παρατηρούμε ότι τα κτίρια αυτής της παλαιότητας δημιουργούν μια ζώνη, νοτίως της παραλιακής ζώνης που προαναφέρθηκε, που καλύπτει όλο το υπόλοιπο τμήμα του πολεοδομικού συγκροτήματος (με εξαίρεση την περιοχή του Αγίου Ιωάννη). Τέλος, παρατηρούμε ότι είναι λίγα τα σύγχρονα κτίρια, κατασκευασμένα μετά το 1991. Αυτά βρίσκονται διασκορπισμένα στο πολεοδομικό συγκρότημα, αρκετά στο νοτιότερο τμήμα της

πόλης αλλά κυρίως στην ανατολική πλευρά, προς την περιοχή του Ακρωτηρίου, όπου είναι και η πιο πρόσφατη επέκταση του πολεοδομικού συγκροτήματος των Χανίων.

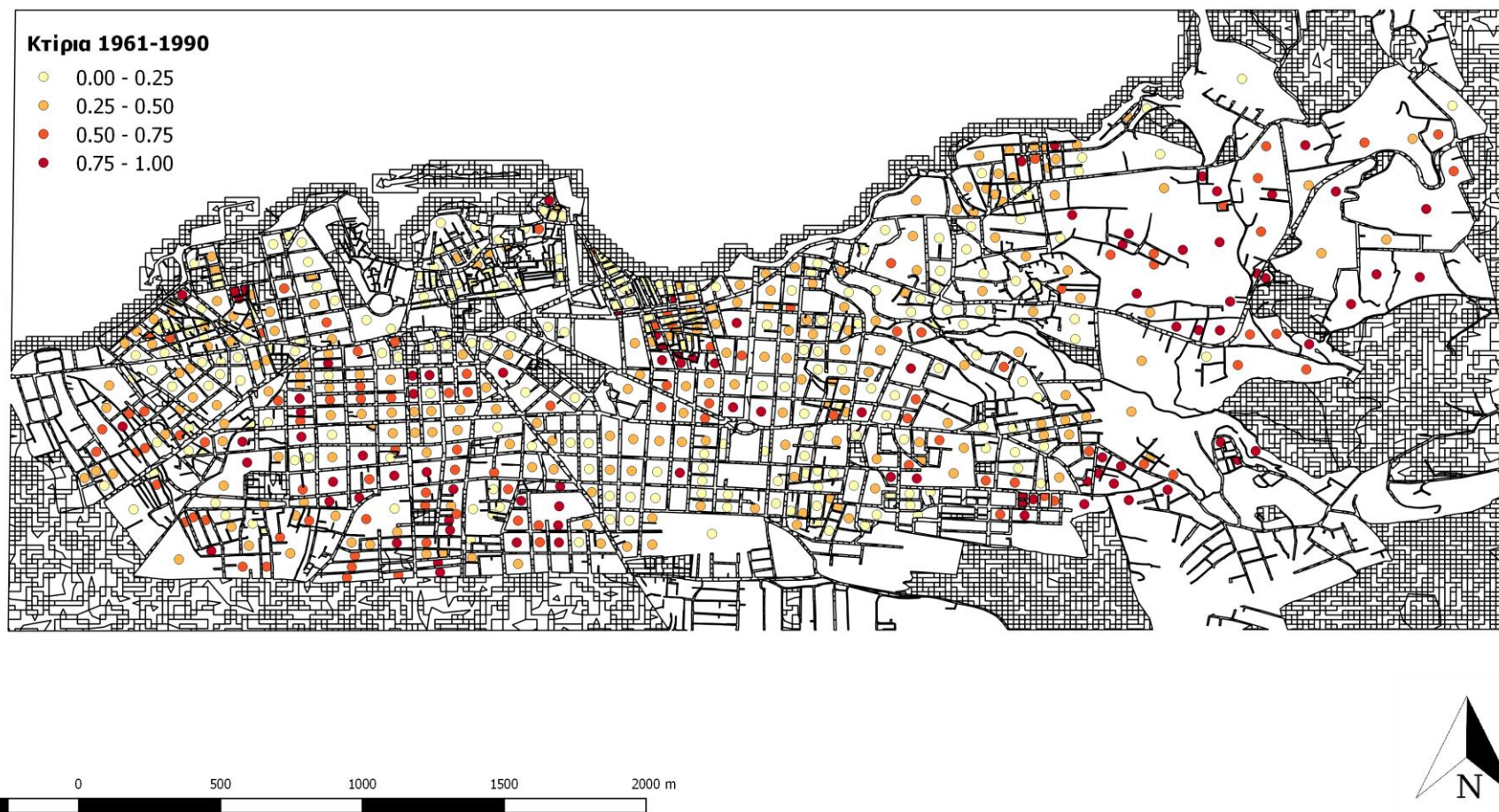
Πίνακας 6.7: Κατηγορίες κτιρίων ανάλογα με τη βλάβη του υπέστησαν (Πηγή: Sá et al. 2016)

DI	
Impact level	Impact descriptor <i>Indirect descriptor that measures which are the disruptions and influences (physical, functional, social, economic and environmental) that a given geographic area is subjected when exposed to an adverse event.</i>
V	From serious disruption at physical and functional level to paralysis of the entire system: buildings, population, infrastructure, health, mobility, administrative and political structures, among others. Lack of conditions for the exercise of the functions and activities of daily life. High cost for recover.
IV	Starts the paralysis of main buildings, housing, administrative and political systems. The region affected by the disaster presents moderate damage and a slice percentage of total collapse of buildings, as well as victims and injuries and a considerable number of homeless because their houses have been damaged, which, although not collapse, are enough to lose its function of housing. Normal daily activities are disrupted; school activities are suspended; economic activities are at a stand-still.
III	Part of the population may permanently lose their property and need to permanent be relocated, which means strong disturbances of everyday life. This level is determined by significant dysfunction in terms of equipment's, critical infrastructures and losses of some assets and certain disorders involving the conduct of professional activities for some time. The most affected areas show significant problems in mobility due to the existence of debris or damage to the road network. Starts significant problems in providing food and water, which must be ensured by the Civil Protection.
II	The region affected by the disaster presents few homeless (about 5%) due to the occurrence of some damage to buildings, affecting the habitability of a given geographical area. Some people may experience problems of access to water, electricity and/or gas. Some cases require temporary relocation.
I	The region affected by the disaster continues with their normal functions. No injured, killed or displaced people are registered. Some light damage may occur (non-structural damage) that can be repaired in a short time and sometimes exists a temporary service interruption. The political process begins with an awareness that the problem exists as well as some investments in strengthening policy and risk mitigation is/should be made.

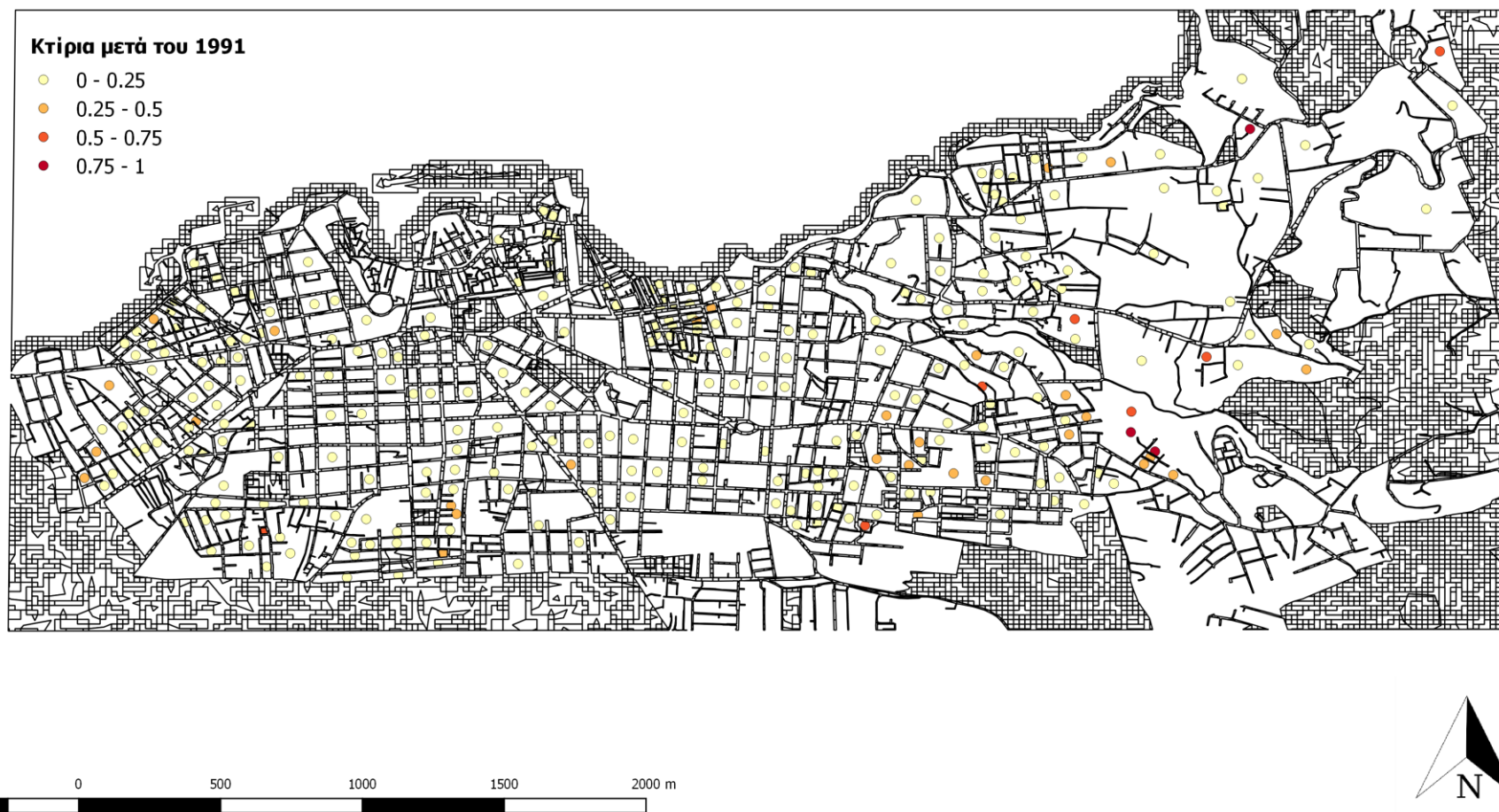
Στην Εικόνα 6.15 παρουσιάζεται ο μέσος αριθμός ορόφων των κτιρίων της πόλης. Αμέσως γίνεται αντιληπτό ότι η συντριπτική πλειοψηφία των κτιρίων έχει τρεις ή λιγότερους ορόφους. Οικοδομικά τετράγωνα με μέσο αριθμό ορόφων πάνω από τρεις ορόφους είναι λίγα και συγκεντρώνονται κυρίως σε κεντρικές περιοχές, όπως στην περιοχή των δικαστηρίων, αλλά και στο κέντρο της πόλης (κοντά στη δημοτική αγορά). Κτίρια με μεγάλο αριθμό ορόφων αναμένεται να είναι πιο ευαίσθητα στις επιβαλλόμενες δυναμικές ταλαντώσεις, αλλά αυτό φυσικά εξαρτάται κι από άλλες παραμέτρους (συχνотικό περιεχόμενο σεισμού, τοπικές εδαφικές συνθήκες, κλπ).



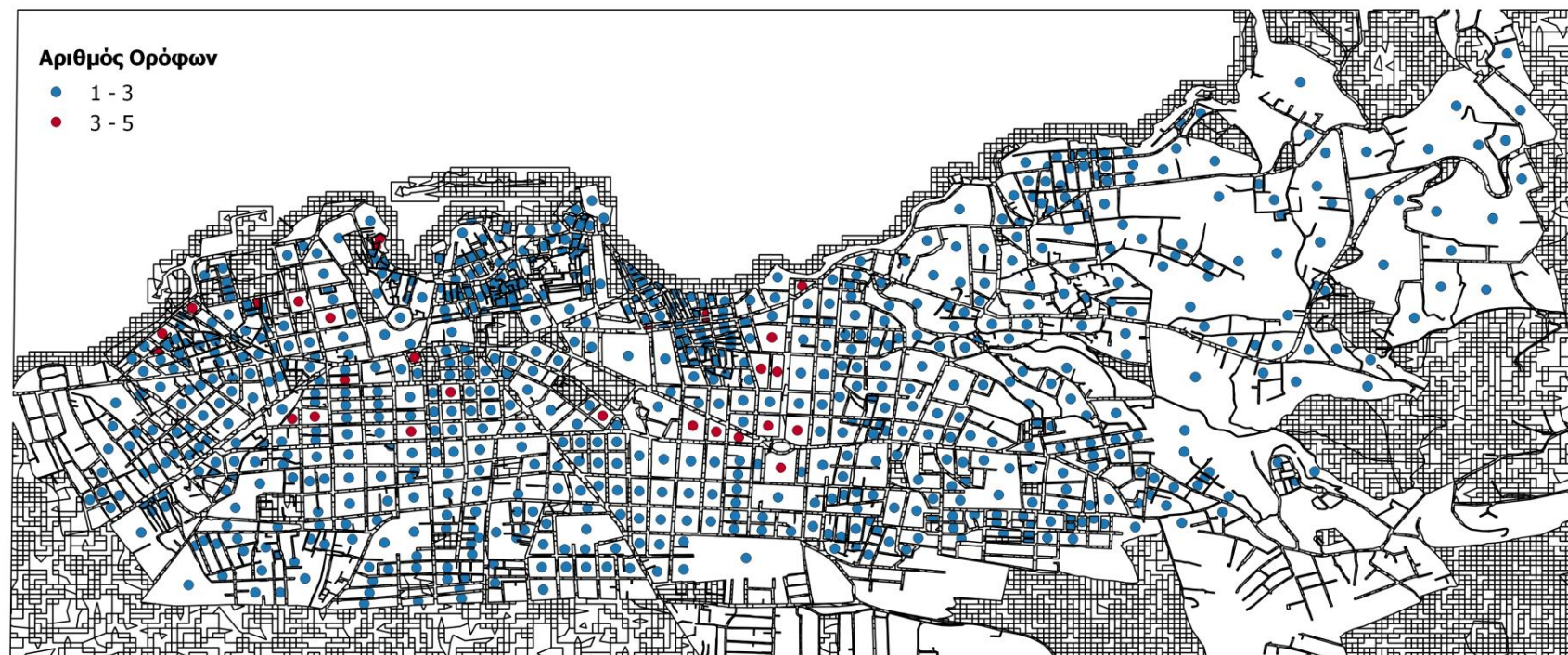
Εικόνα 6.12: Ποσοστό κτιρίων εντός οικοδομικού τετραγώνου κατασκευής πριν το 1960



Εικόνα 6.13: Ποσοστό κτιρίων εντός οικοδομικού τετραγώνου κατασκευής μεταξύ 1961-1990



Εικόνα 6.14: Ποσοστό κτιρίων εντός οικοδομικού τετραγώνου κατασκευής μετά το 1991

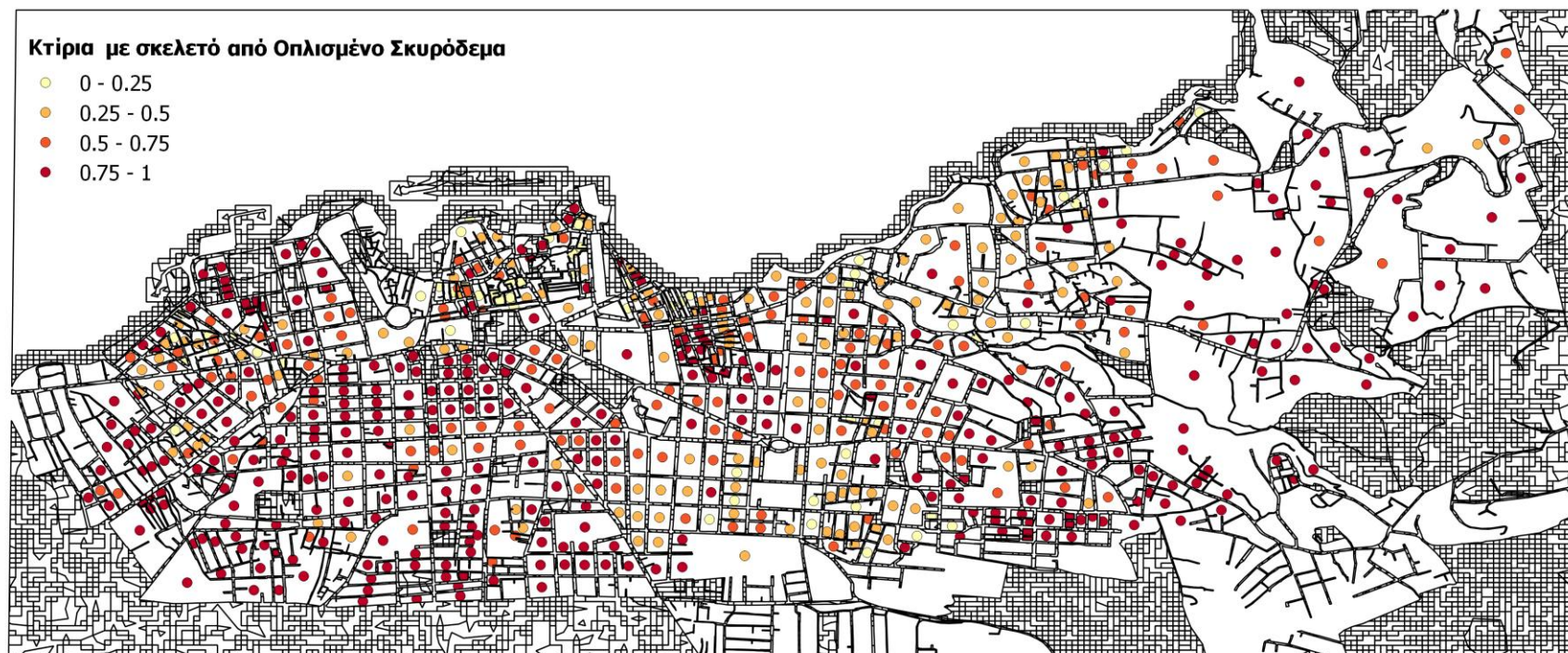


Εικόνα 6.15: Μέσος όρος ορόφων κτιρίων εντός κάθε οικοδομικού τετραγώνου

Στις Εικόνες 6.16 και 6.17 γίνεται παρουσίαση των οικοδομικών τετραγώνων ανάλογα με το υλικό κατασκευής των κτιρίων τους. Συγκεκριμένα, καταγράφεται το ποσοστό κτιρίων με σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα και από λιθοδομή ανά οικοδομικό τετράγωνο. Έχει ήδη αναφερθεί, ότι έχει ληφθεί η παραδοχή ότι εντός του πολεοδομικού συγκροτήματος υπάρχουν μόνο κτίρια αυτών των δύο υλικών. Παρατηρούμε ότι, όπως είναι και αναμενόμενο, η πλειοψηφία των κτιρίων είναι με σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αυτά βρίσκονται σε αυξημένα ποσοστά σε όλη την έκταση της πόλης. Κτίρια από λιθοδομή εμφανίζονται σε μεγάλο αριθμό στην περιοχή της παλαιάς πόλης. Ταυτόχρονα εμφανίζονται πολλά και στο υπόλοιπο τμήμα της ακτογραμμής ανατολικά της παλαιάς πόλης, στην περιοχή του Κουμ Καπί και της Χαλέπας. Επίσης, αυξημένα ποσοστά κτιρίων από λιθοδομή βρίσκουμε και στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη. Γενικά, κτίρια από λιθοδομή εμφανίζονται στα περισσότερα τμήματα του πολεοδομικού συγκροτήματος (π.χ., στην περιοχή του Ακρωτηρίου, στη Νέα Χώρα, κλπ), αλλά περιορίζονται σε μεμονωμένα ή λίγα οικοδομικά τετράγωνα, χωρίς να παρουσιάζουν κάποια άλλη, εκτός από τις προαναφερθείσες, συγκεντρώσεις. Το γεγονός ότι εμφανίζονται σε αρκετά σημεία της πόλης, καταδεικνύει τη σημασία της μελέτης της πόλης ως σύστημα.

Στην Εικόνα 6.18 παρουσιάζονται ο αριθμός των κτιρίων με στέγη. Παρατηρείται ότι η κατανομή των κτιρίων με στέγη ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό την κατανομή των λίθινων και παλαιών κτιρίων. Αυτό ασφαλώς είναι αναμενόμενο, διότι τα σύγχρονα κτίρια με σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα συνήθως κατασκευάζονται με δώμα. Κτίρια με στέγη βρίσκονται σε μεγάλο ποσοστό στην περιοχή της παλαιάς πόλης, αλλά και πιο ανατολικά (Κουμ Καπί και Χαλέπα), όπως επίσης και στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη. Μεγάλος αριθμός εντοπίζεται και στην περιοχή προς το Ακρωτήρι, όπου οι κατοικίες έχουν πιο παραδοσιακή αρχιτεκτονική (η περιοχή άλλωστε αποτελεί τα όρια του πολεοδομικού συγκροτήματος με πιο αραιά δόμηση). Ελάχιστα κτίρια με στέγες εμφανίζονται στο κεντρικό και στο νότιο τμήμα της πόλης. Τα κτίρια με στέγες αναμένεται να έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία σε σεισμό, έχοντας δυσμενείς συνέπειες τόσο για τα ίδια, αλλά και πιθανώς και για τα γειτονικά κτίρια.

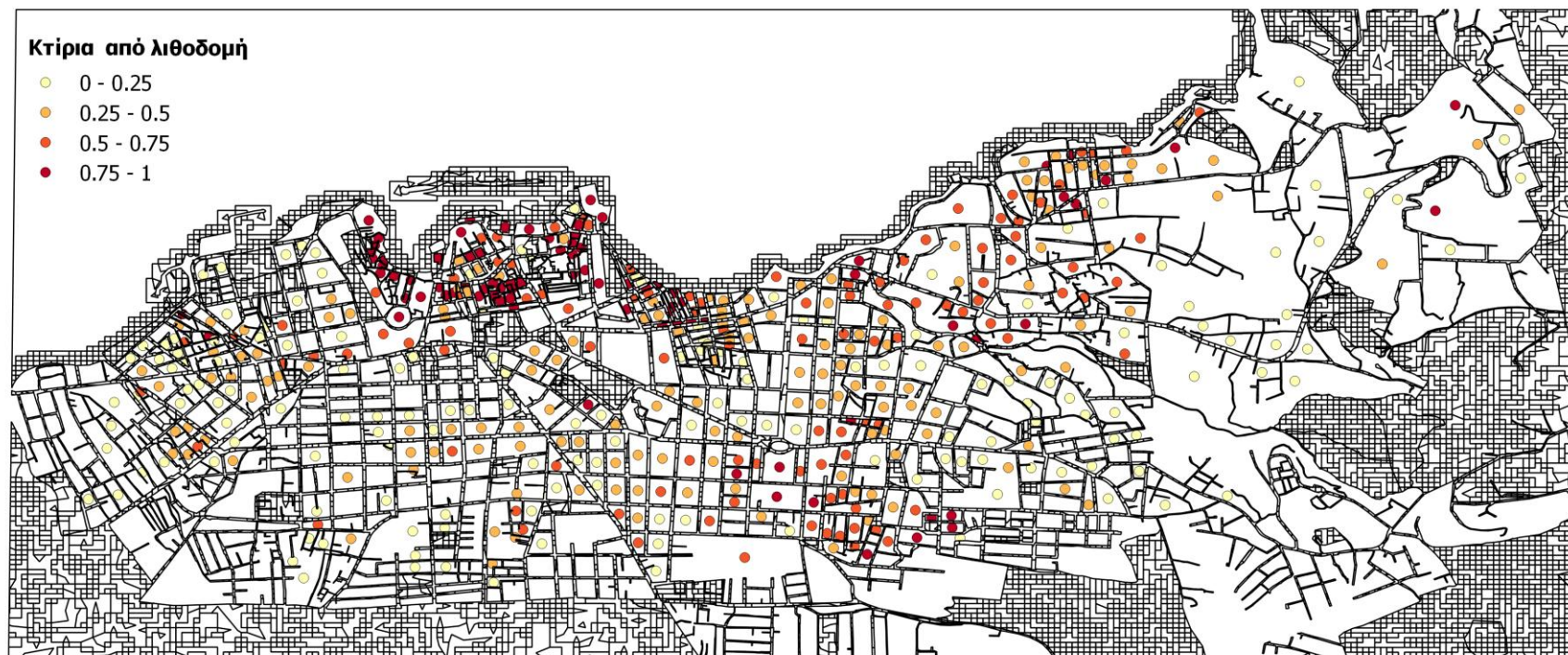
Στην Εικόνα 6.19 παρουσιάζονται ο αριθμός των κτιρίων ανά οικοδομικό τετράγωνο. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κτιρίων, τόσο μεγαλύτερες αναμένονται και οι πιθανότητες αυξημένων βλαβών, λόγω επιρροής του ενός κτιρίου στο άλλο (από δυναμικές συγκρούσεις, από καταπτώσεις, κλπ). Αυξημένη πυκνότητα κτιρίων εμφανίζεται στην περιοχή της παλαιάς πόλης, καθώς και στο κεντρικό και στο νότιο τμήμα του πολεοδομικού συγκροτήματος των Χανίων.



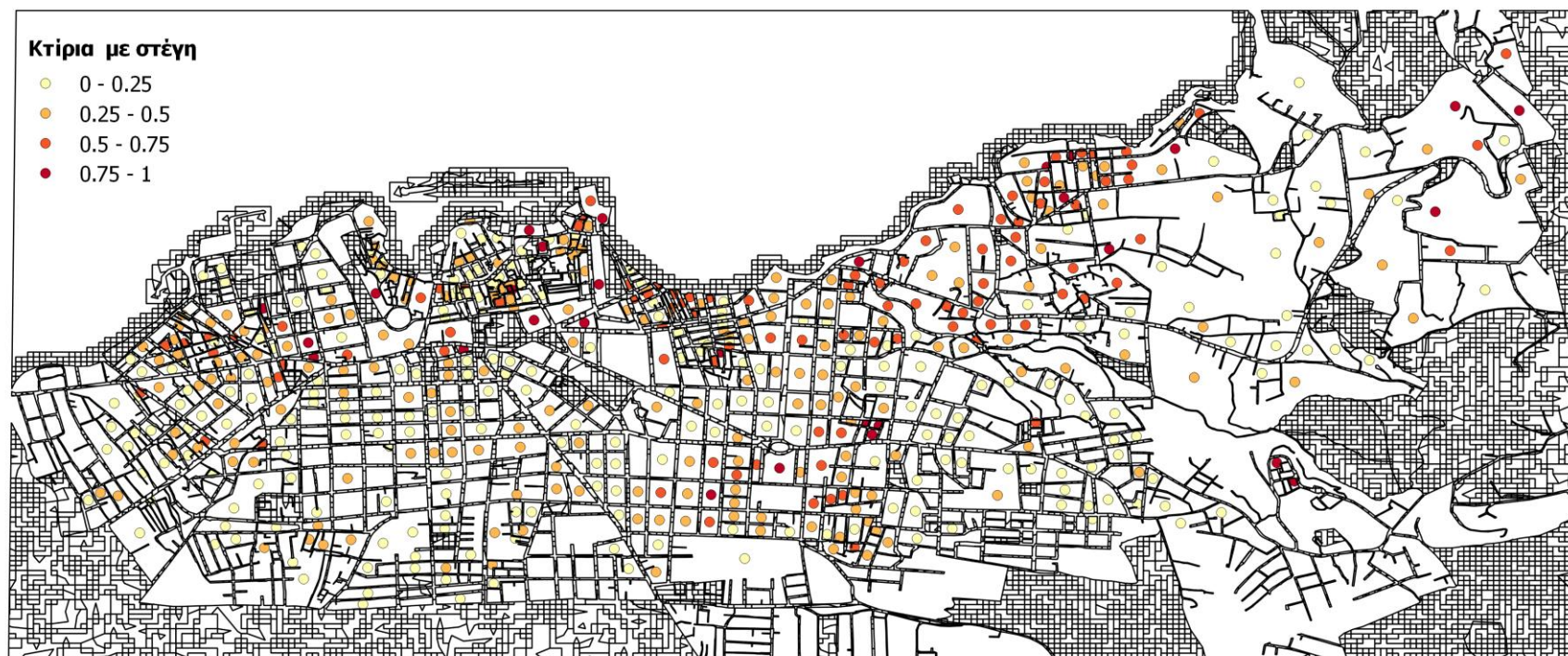
500 0 500 1000 1500 2000 m



Εικόνα 6.16: Ποσοστό κτιρίων με σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα εντός κάθε οικοδομικού τετραγώνου



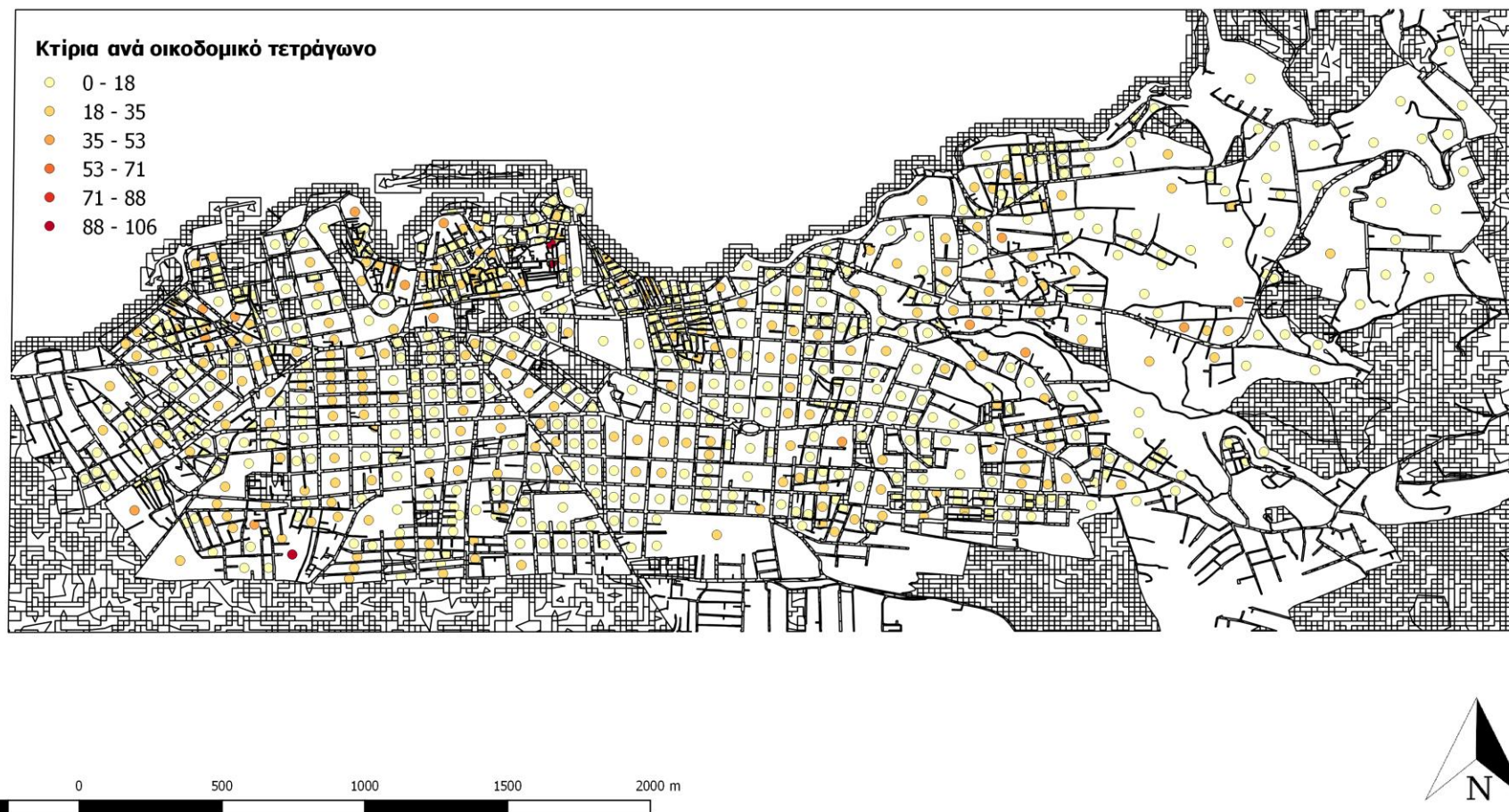
Εικόνα 6.17: Ποσοστό κτιρίων από λιθοδομή εντός κάθε οικοδομικού τετραγώνου



500 0 500 1000 1500 2000 m



Εικόνα 6.18: Ποσοστό κτιρίων με στέγη εντός κάθε οικοδομικού τετραγώνου



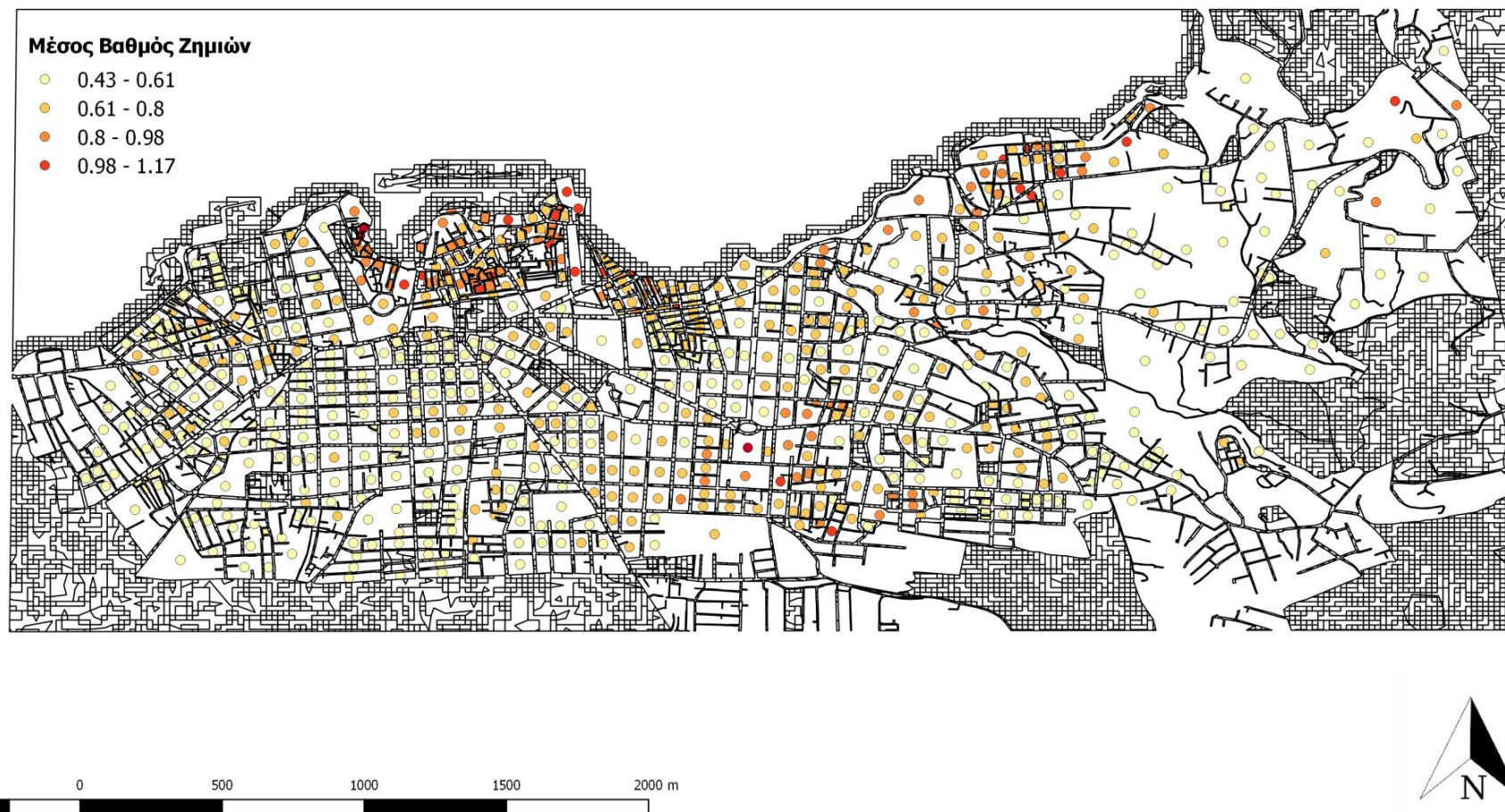
Εικόνα 6.19: Αριθμός κτιρίων ανά οικοδομικό τετράγωνο

Στις Εικόνες 6.20 έως 6.25 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του QuakeIST για την εκτίμηση του σεισμικού κινδύνου. Μετά την εξαγωγή των παραπάνω αποτελεσμάτων, είναι απαραίτητη η κριτική αξιολόγησή τους, αλλά και η σύγκρισή τους με παρόμοιες μελέτες που έχουν διεξαχθεί στο παρελθόν στα Χανιά.

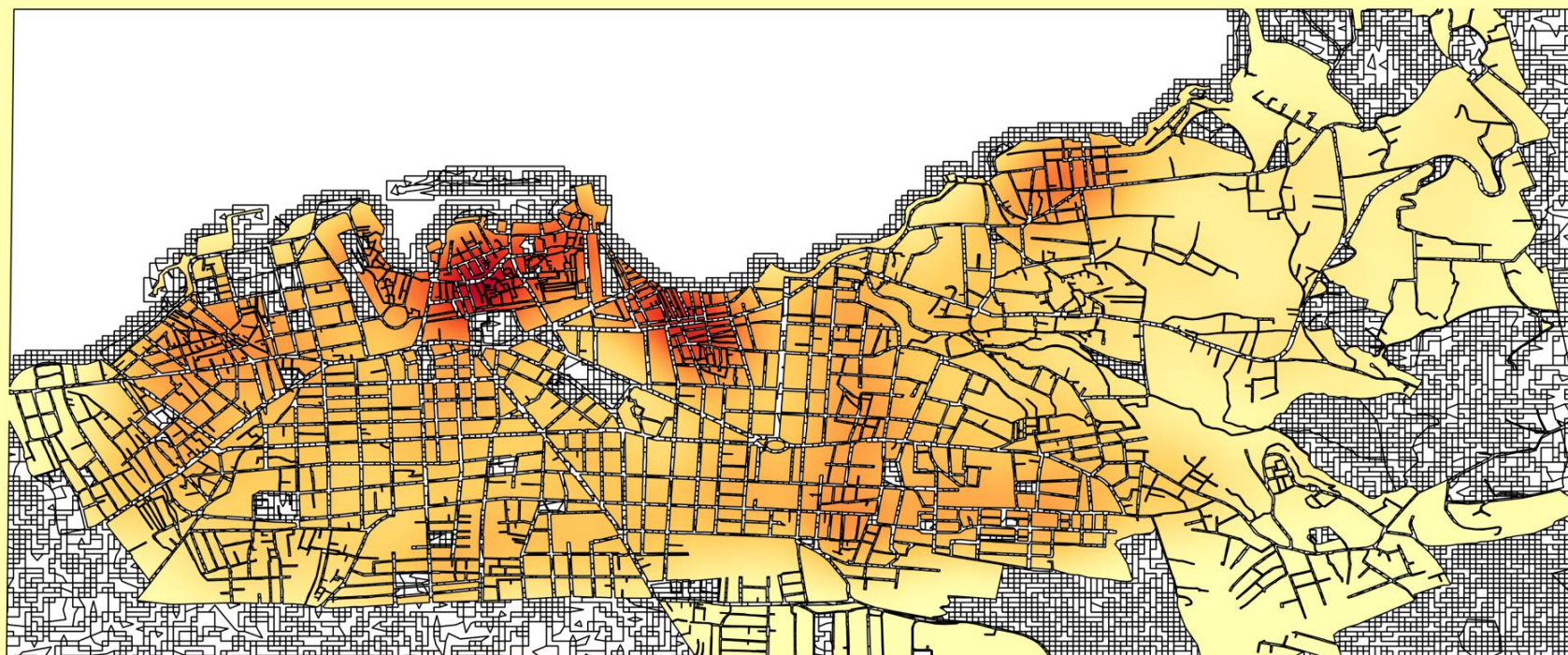
Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη σεισμική επικινδυνότητα εμφανίζεται στην περιοχή της παλιάς πόλης των Χανίων. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο λόγω της παλαιότητας των κτιρίων, λόγω της κατασκευής τους από λιθοδομή, κατά κύριο λόγο, αλλά και λόγω των πιο “μαλακών” εδαφικών σχηματισμών που υπάρχουν στη συγκεκριμένη περιοχή. Παράλληλα μεγάλη σεισμική επικινδυνότητα εμφανίζεται και στην περιοχή του Κουμ Καπί, αλλά και σε μέρος της περιοχής του Άγιου Ιωάννη. Και στις δύο περιοχές κυριαρχούν τα παλιά κτίρια (κατασκευής προ του 1960) και το υλικό κατασκευής τους είναι η λιθοδομή. Ιδιαίτερα στη περιοχή του Κουμ Καπί εμφανίζονται και “μαλακά” εδάφη, όπως και στην περιοχή της παλιάς πόλης, ενώ στην περιοχή του Αγίου Ιωάννη παρατηρείται μεγάλος αριθμός κτιρίων με στέγη.

Επιπροσθέτως, στο κεντρικό τμήμα του αστικού συγκροτήματος, παρά την αναμενόμενη ποικιλομορφία, εμφανίζεται μια “μέση” σεισμική επικινδυνότητα. Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται, αν και υπαρκτές, δεν είναι τόσο έντονες, δεν υπάρχει δηλαδή μεγάλη απόκλιση από τη μέση κατάσταση. Ενδεχομένως, να αναμένονταν μεγαλύτερες διαφοροποιήσεις λόγω της μεγάλης έκτασης της περιοχής. Με μια ανάγνωση της οικοδομικής “εξέλιξης” της πόλης, συμπεραίνεται ότι υπήρξε μία σχετικά ομαλή και ομοιόμορφη κατανομή, κυρίως λόγω έντονης οικοδομικής ανάπτυξης μετά την περίοδο της μεταπολίτευσης. Αυτό φαίνεται και από το γεγονός ότι η πλειοψηφία των κτιρίων είναι με σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα και είναι κτισμένα την περίοδο 1961-1990.

Η περιοχή με τη μικρότερη σεισμική επικινδυνότητα εμφανίζεται περιμετρικά του πολεοδομικού συγκροτήματος, από τη περιοχή των Παχιανών ως την αρχή της περιοχής του Ακρωτηρίου (με εξαίρεση τον Άγιο Ιωάννη). Παρατηρείται αυτή η σαφής κατανομή παρά το γεγονός ότι πρόσφατα κτισμένα κτίρια εμφανίζονται κατά κύριο λόγο μόνο στην περιοχή του Ακρωτηρίου. Η έκταση κοντά την περιοχή του Ακρωτηρίου εμφανίζει έντονη ποικιλομορφία λόγω της πρόσφατης επέκτασης της πόλης προς τη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Όμως, αυτό είναι κάτι που δεν αποτυπώνεται ιδιαίτερα στους παραχθέντες χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας.



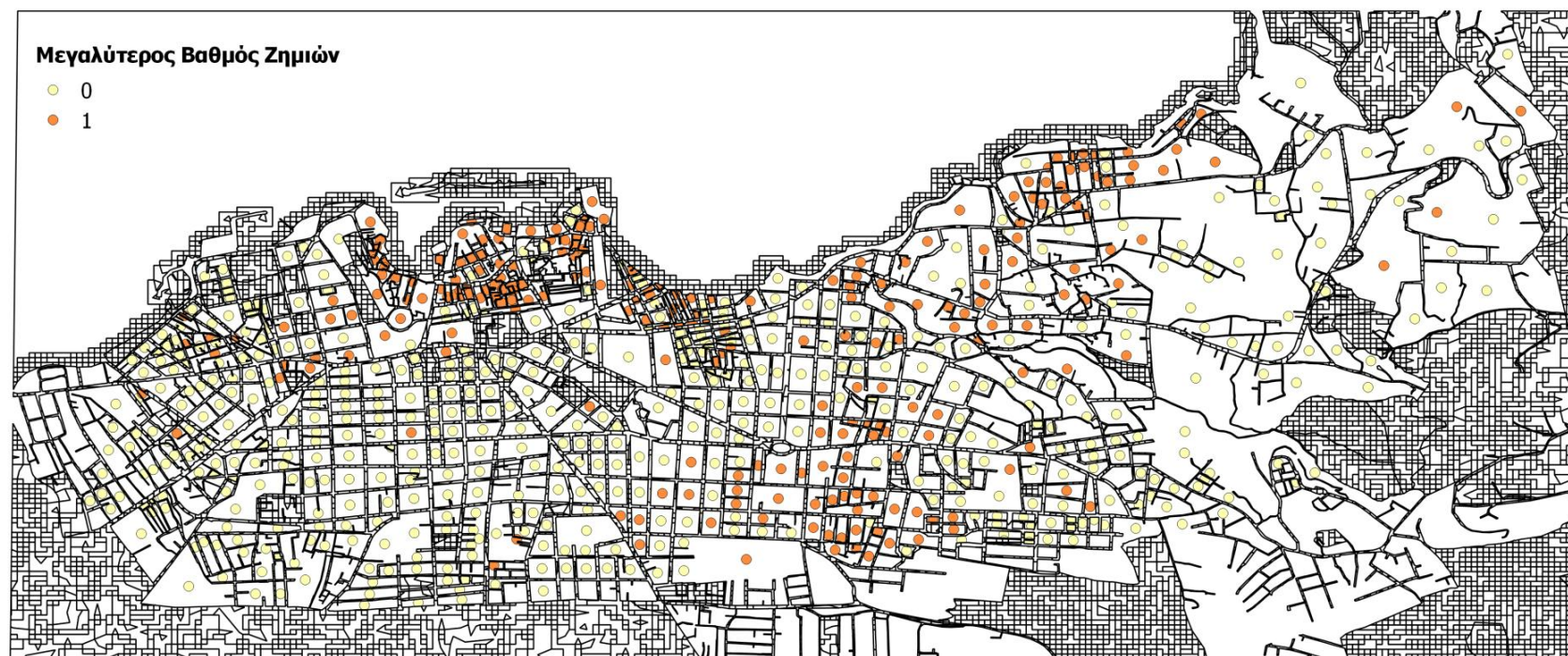
Εικόνα 6.20: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο



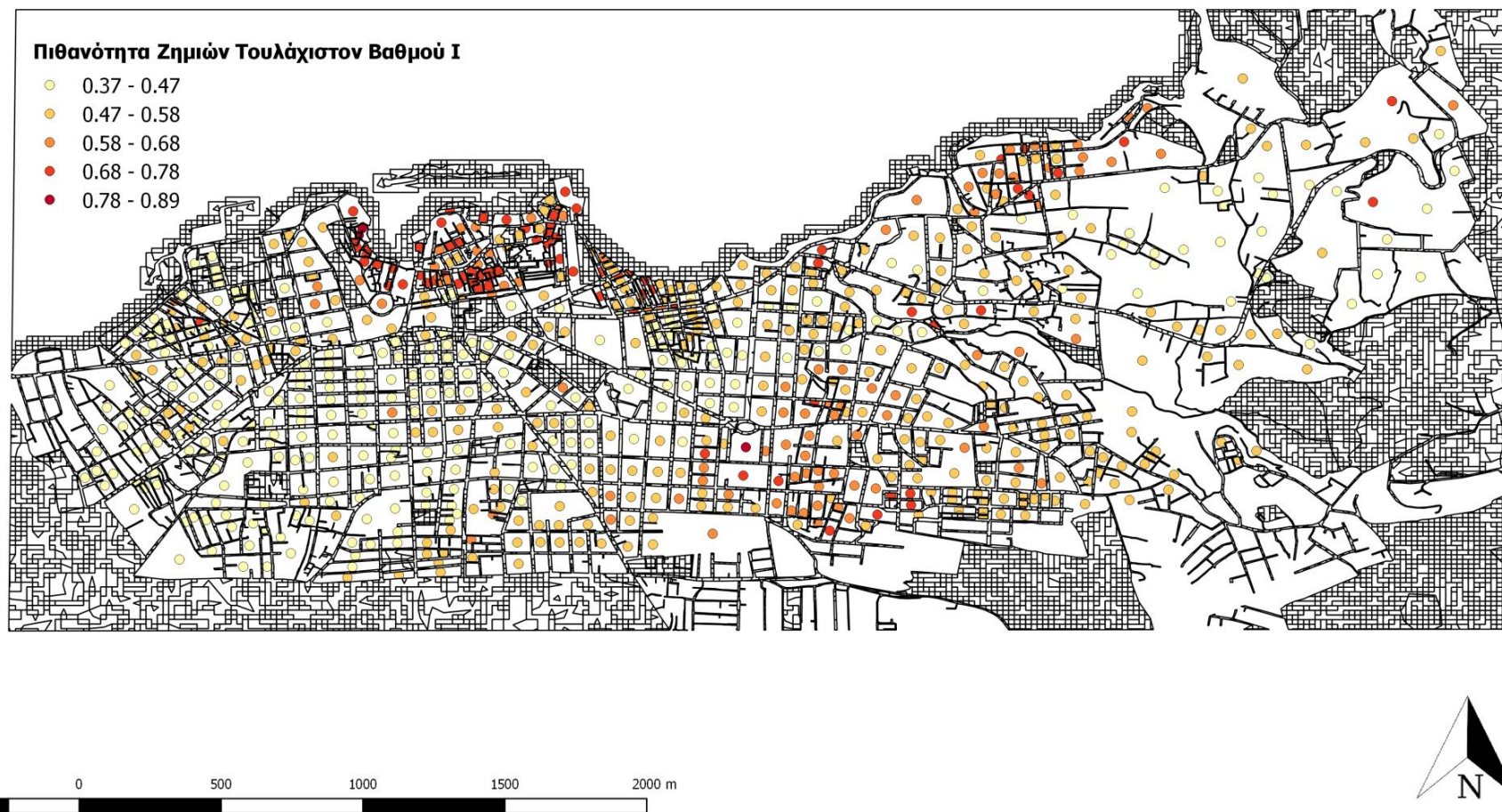
500 0 500 1000 1500 2000 m



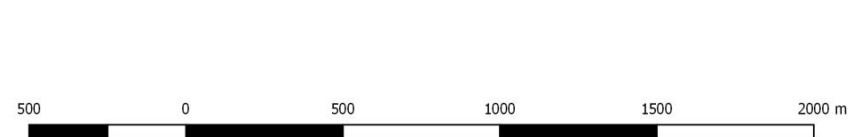
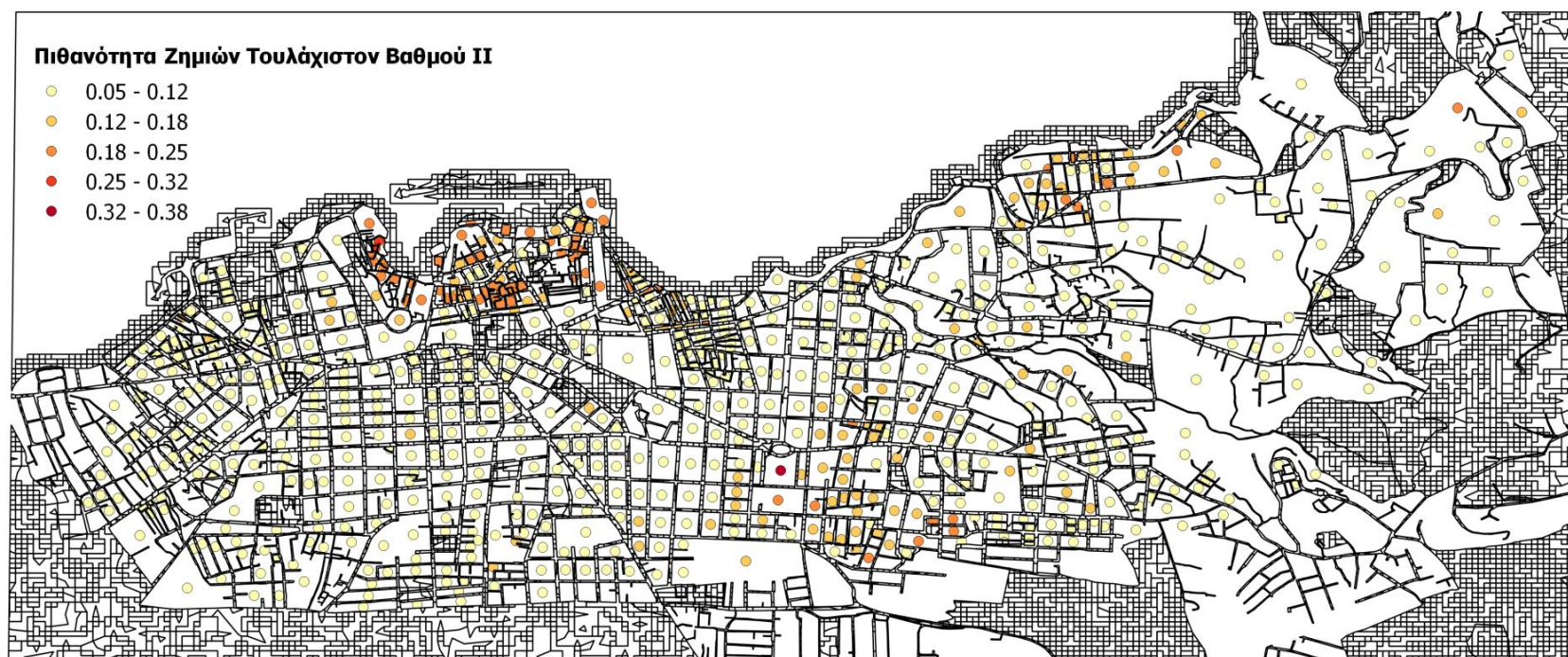
Εικόνα 6.21: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο



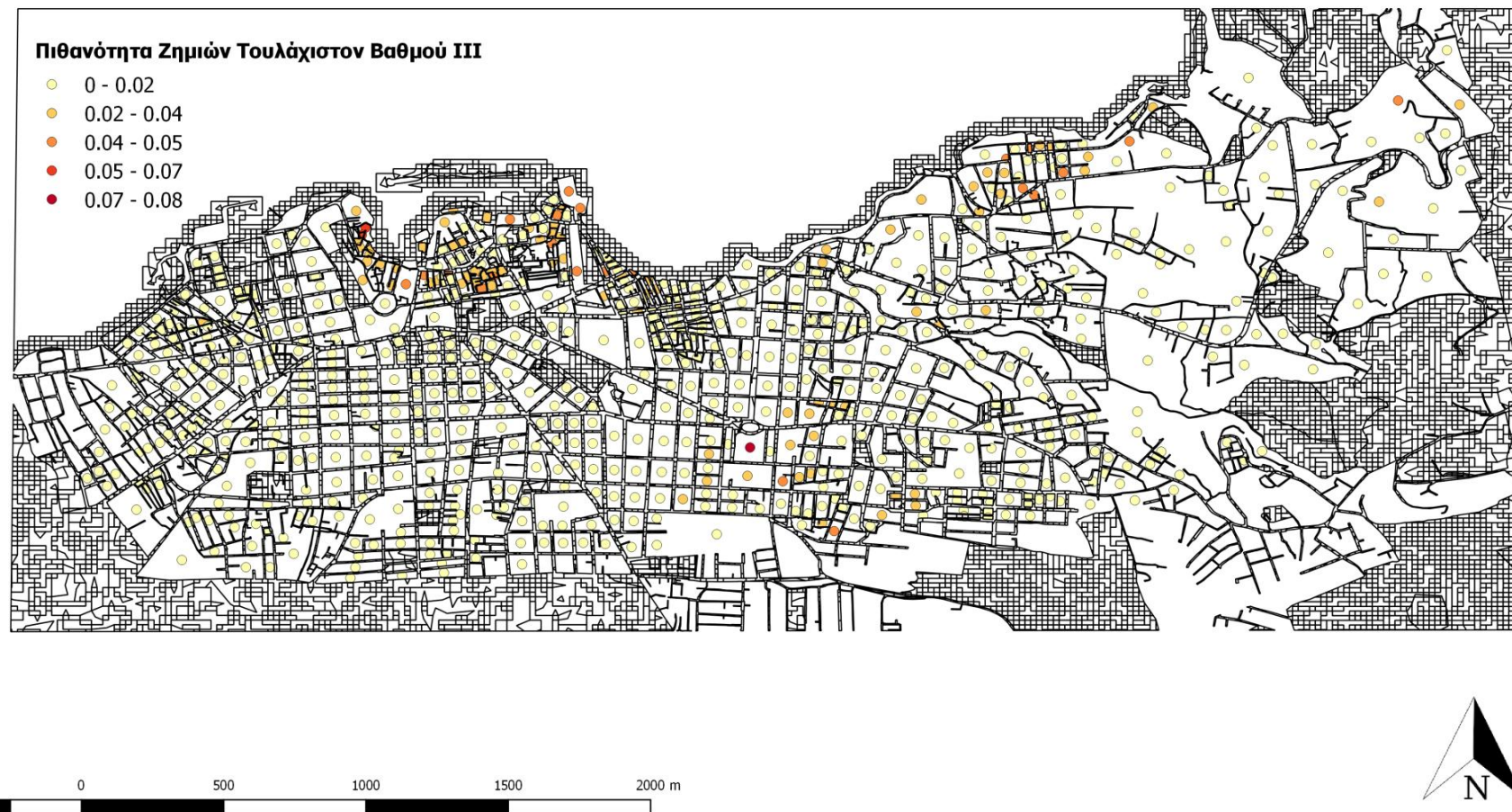
Εικόνα 6.22: Εκτιμώμενος μέγιστος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο



Εικόνα 6.23: Πιθανότητα εμφάνισης ζημιών τουλάχιστον Βαθμού Ι ανά οικοδομικό τετράγωνο



Εικόνα 6.24: Πιθανότητα εμφάνισης ζημιών τουλάχιστον Βαθμού II ανά οικοδομικό τετράγωνο

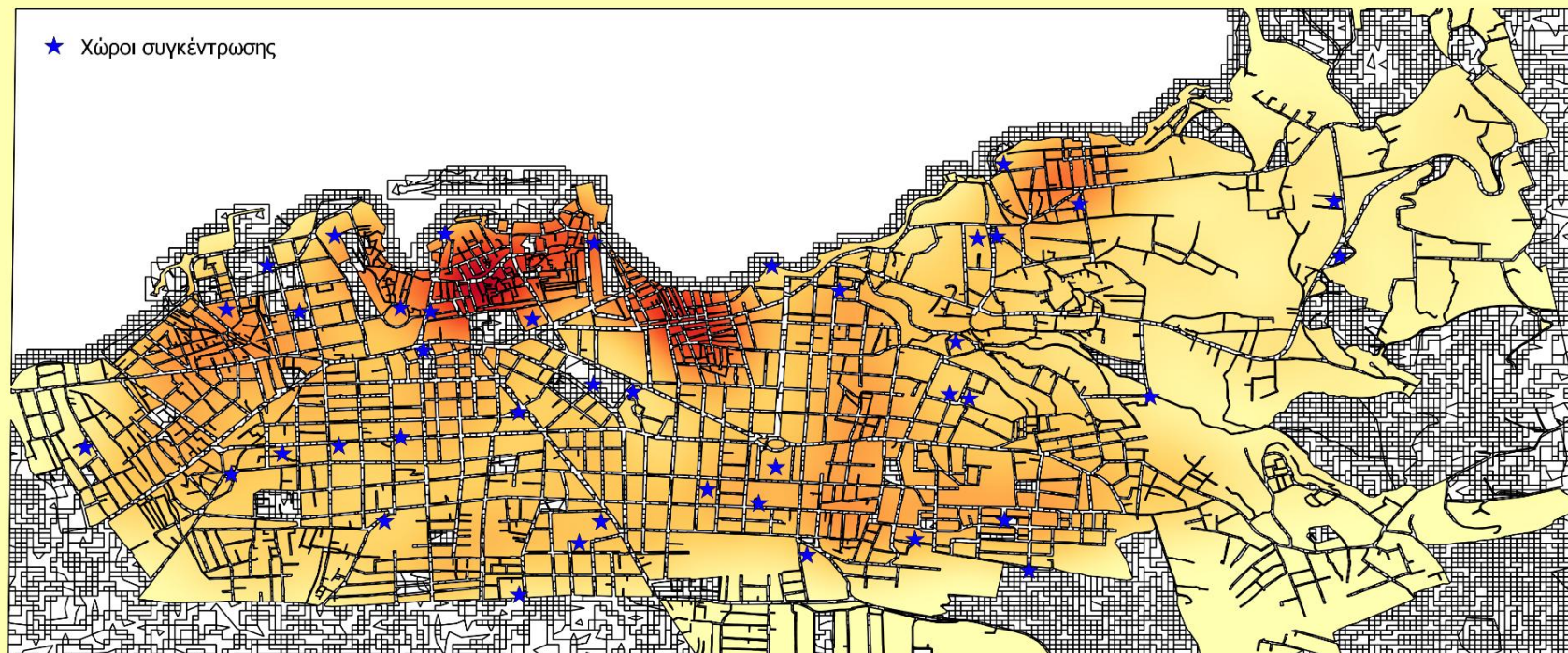


Εικόνα 6.25: Πιθανότητα εμφάνισης ζημιών τουλάχιστον Βαθμού ΙΙΙ ανά οικοδομικό τετράγωνο

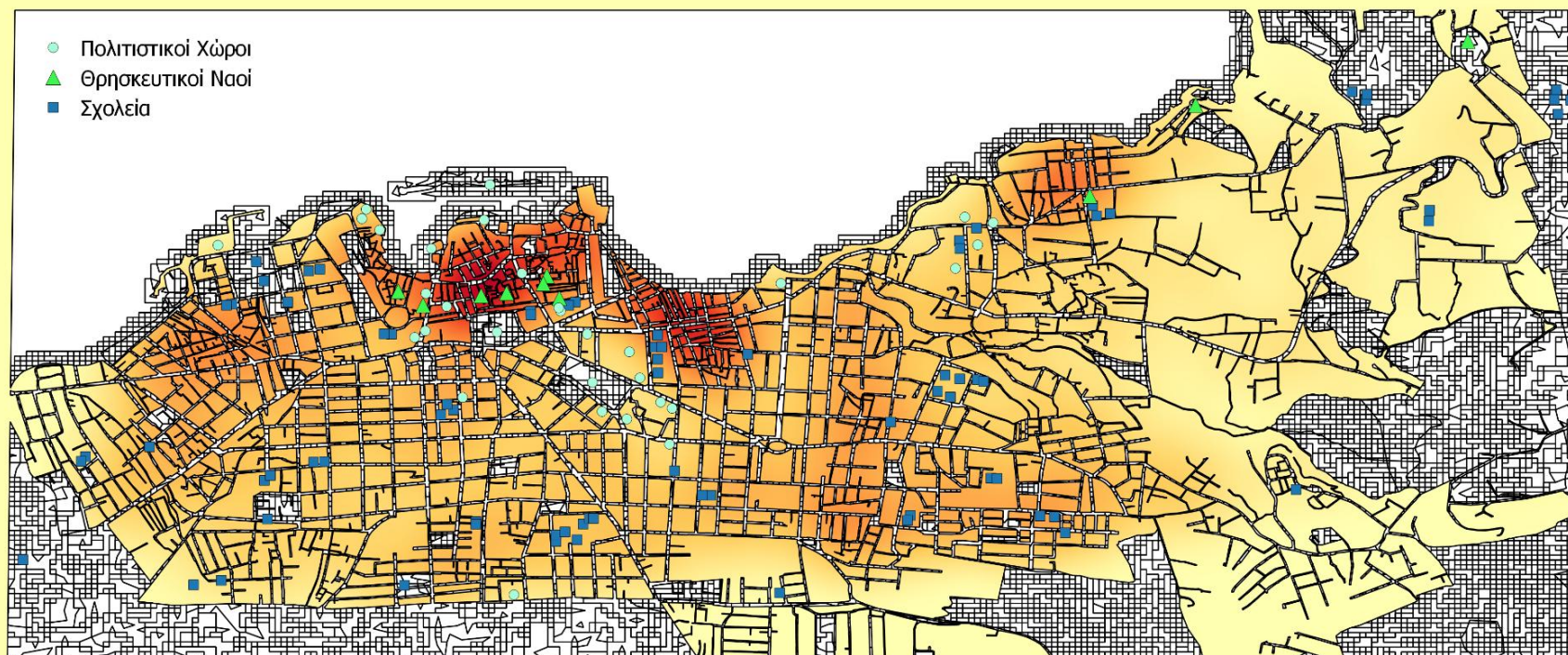
Στις Εικόνες 6.26 έως 6.28 παρατίθενται διάφορες κρίσιμες θέσεις στην πόλη των Χανίων, η χωροθέτηση των οποίων κρίνεται σημαντική στην περίπτωση σεισμού. Σχετικά με τους ορισθέντες χώρους συγκέντρωσης σε περίπτωση έκτακτων αναγκών παρατηρούμε ότι βρίσκονται περιμετρικά και όχι εντός της πιο επικίνδυνης ζώνης (παλαιά πόλη). Αυτό λειτουργεί προς την πλευρά της ασφάλειας αν και ο βασικός λόγος για τη μη χωροθέτηση εντός της ζώνης ήταν πιθανώς η έλλειψη ελεύθερου χώρου. Επίσης, παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει χώρος συγκέντρωσης στις πιο επικίνδυνες περιοχές (Κουμ Καπί και Άγιου Ιωάννη). Οι υπόλοιποι χώροι βρίσκονται στις ζώνες μέσης και χαμηλής επικινδυνότητας, σε ελεύθερους χώρους επί κεντρικών οδικών αρτηριών. Προτιμώνται οι κεντρικές οδικές αρτηρίες, καθώς λόγω μεγέθους και συντήρησης, η πιθανότητα να μην είναι προσπελάσιμες είναι μικρότερη.

Ενδιαφέρον, επίσης παρουσιάζουν και άλλοι χώροι, που από τη φύση της λειτουργίας τους, υπάρχει συγκέντρωση πληθυσμού, και ιδιαιτέρως παιδιών. Στις Εικόνες 6.29 και 6.30 καταγράφεται η θέση τέτοιων χώρων και συγκεκριμένα Κτιρίων Υγείας, Χώρων Στάθμευσης, Παιδικών Χαρών, Σχολείων, Θρησκευτικών Ναών και χώρων “Πολιτισμού”, που προσελκύουν αρκετό κόσμο, ιδιαιτέρως κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής τουριστικής περιόδου. Τα κτίρια υγείας (ΕΚΑΒ, κλινικές) βρίσκονται σε περιοχές μέσης και χαμηλής σεισμικής επικινδυνότητας και η θέση τους επί κεντρικών οδικών αρτηριών (τα περισσότερα τουλάχιστον) διευκολύνει την προσβασιμότητα σε αυτά. Παρομοίως, οι παιδικές χαρές βρίσκονται με ελάχιστες εξαιρέσεις σε “ασφαλείς” χώρους. Η μεγαλύτερη εξαίρεση είναι η παιδική χαρά στην περιοχή μεταξύ παλαιού λιμανιού και Κουμ Καπί. Οι χώροι στάθμευσης βρίσκονται διασκορπισμένοι σε όλο το τμήμα της πόλης, κάτι που σημαίνει ότι δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που εντοπίζονται σε “επικίνδυνες” ζώνες. Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις απαιτείται αξιολόγηση της περιοχής, για να ληφθούν όλα τα απαραίτητα μέτρα για την ασφάλεια, αλλά και διερεύνηση πιθανότητας χρήσης του ως χώρους συγκέντρωσης (αν δεν είναι ήδη).

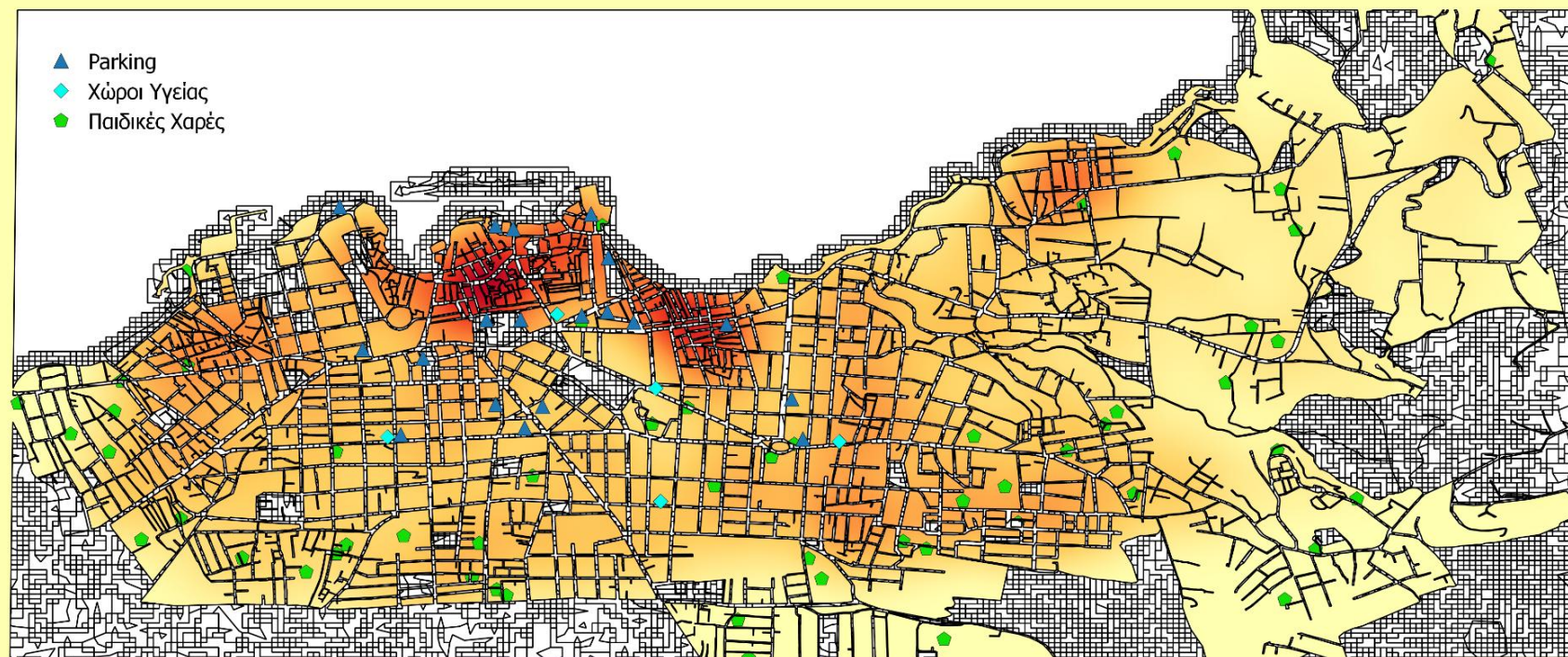
Σε ό,τι αφορά τα σχολεία, ευτυχώς δεν υπάρχει κάποιο κτίριο στις επικίνδυνες ζώνες, όμως υπάρχουν αρκετά κοντά σε αυτές. Δεν προκύπτει ανησυχία άμεσης διακινδύνευσης, χρειάζεται όμως μέριμνα για να αποφευχθούν έμμεσοι κίνδυνοι. Απαιτείται κατάλληλος σχεδιασμός για κάθε κτίριο ξεχωριστά για κατάρτιση συγκεκριμένου σχεδίου και διαδρομής έκτακτης ανάγκης των μαθητών προς κάποιο χώρο συγκέντρωσης. Αντίθετα με τα σχολεία, οι θρησκευτικού ναοί και οι πολιτιστικοί χώροι βρίσκονται κατά μεγάλη πλειοψηφία εντός της επικίνδυνης ζώνης της παλαιάς πόλης. Χρειάζεται συντήρηση τους, όπως και των γειτονικών κτιρίων και των κτιρίων που βρίσκονται στη διαδρομή που οδηγεί σε αυτούς. Απαιτείται δημιουργία σχεδίου δράσης, αντίστοιχου με αυτό των σχολείων, που θα εφαρμοστεί σε περίπτωση ισχυρού σεισμού.



Εικόνα 6.26: Σημεία συγκέντρωσης σε περίπτωση εκτάκτου γεγονότος (Sarris et al, 2010)



Εικόνα 6.27: Θέσεις πολιτιστικών χώρων, θρησκευτικών ναών και σχολείων (Πηγή: Δήμος Χανίων)



500 0 500 1000 1500 2000 m



Εικόνα 6.28: Θέσεις χώρων στάθμευσης, χώρων υγείας και παιδικών χαρών(Πηγή: Δήμος Χανίων)

6.8. Συγκρίσεις αποτελεσμάτων

Μετά την εξαγωγή των αποτελεσμάτων κάθε μελέτης, κρίνεται απαραίτητη η αξιολόγησή τους. Στην παρούσα εργασία αυτό γίνεται με δύο τρόπους: με σύγκριση των αποτελεσμάτων με παρόμοια μελέτη, αλλά και με βάση πραγματικές επιπτώσεις από παλαιότερο σεισμικό φαινόμενο. Τόσο οι συγκλίσεις όσο και οι αποκλίσεις στα αποτελέσματα είναι χρήσιμες, καθώς οδηγούν την επιστημονική κοινότητα και τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων προς ορισμένα συμπεράσματα, που με τη σειρά τους οδηγούν σε συγκεκριμένες ενέργειες, αλλά και περιγράφουν διάφορες αβεβαιότητες, οι οποίες θα αποτελέσουν προϊόν μελλοντικής έρευνας.

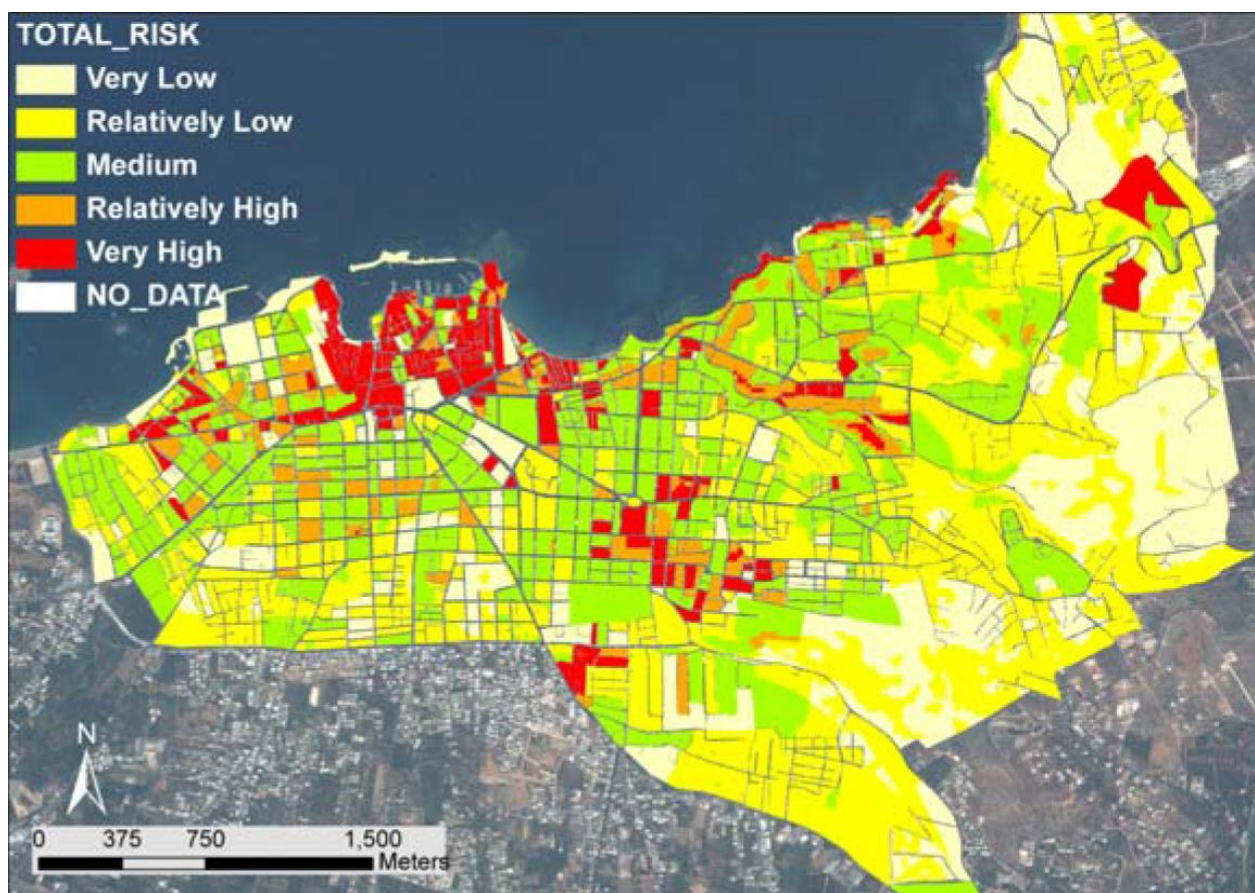
6.8.1. Σύγκριση με προηγούμενη μελέτη

Τα αποτελέσματα της παρούσας μελέτης μπορούν άμεσα να έρθουν σε αντιπαραβολή με αυτά της μελέτης των Sarris et al. (2010). Η θεματολογία των δύο μελετών είναι όμοια, δηλαδή η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας του πολεοδομικού συγκροτήματος της πόλης των Χανίων, η προσέγγιση όμως είναι διαφορετική. Συγκεκριμένα, στην εργασία των Sarris et al. (2010) χρησιμοποιήθηκε ένα τοπικό μοντέλο και στα διάφορα δομικά και γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής δόθηκαν συγκεκριμένα βάρη σπουδαιότητας. Με τη χρήση των συγκεκριμένων βαρών σπουδαιότητας, προσαρμοσμένων σε κατάλληλες εξισώσεις, μελετήθηκε η σεισμική επικινδυνότητα της πόλης των Χανίων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 6.29.

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα της μελέτης των Sarris et al. (2010), γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι βρίσκονται σε συμφωνία με αυτά της παρούσας μελέτης. Η αξιολόγηση της επικινδυνότητας γίνεται με χαρακτηρισμό του κάθε οικοδομικού τετραγώνου από “Σχετικά Χαμηλού Κινδύνου” έως “Πολύ Υψηλού Κινδύνου”. Παρατηρούμε ότι σχηματίζονται, όπως και στη παρούσα μελέτη, τρεις ζώνες επικινδυνότητας. Η πρώτη ζώνη, της υψηλής επικινδυνότητας βρίσκεται κυρίως κοντά στην ακτογραμμή, ιδίως στην περιοχή της παλαιάς πόλης και του Κουμ Καπί. Επίσης, θέσεις με υψηλό κίνδυνο παρατηρούνται και στην περιοχή του Άγιου Ιωάννη. Η δεύτερη ζώνη, μέσης επικινδυνότητας, εμφανίζεται στο αμέσως νοτιότερο τμήμα από αυτό της πρώτης ζώνης (με εξαίρεση την περιοχή του Άγιου Ιωάννη). Τέλος, το νοτιότερο μέρος του πολεοδομικού συγκροτήματος είναι αυτό που εν γένει παρουσιάζει τη χαμηλότερη επικινδυνότητα. Πέρα από αυτή τη κοινή κατηγοριοποίηση και στις δύο μελέτες, φαίνεται να υπάρχει “κοινή γραμμή” και σε πιο περιορισμένης έκτασης αυξομειώσεις σε συγκεκριμένες

περιοχές, όπως σε συγκεκριμένες θέσεις στη Χαλέπα, στα Λενταριανά και στη Νέα Χώρα, όπου εμφανίζεται αυξημένη επικινδυνότητα.

Το γεγονός ότι η σύγκλιση μεταξύ των δύο μελετών είναι μεγάλη, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι μεγάλο μέρος των πρωτογενών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν κοινό, βοηθάει στην εξαγωγή του συμπεράσματος ότι και οι δύο μεθοδολογίες και διαδικασίες που ακολουθήθηκαν δίνουν ρεαλιστικά αποτελέσματα. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα είναι ιδιαίτερα σημαντικό, αφού ο βασικός στόχος τέτοιων μελετών είναι να κριθεί κατά πόσο μπορούν τα διάφορα μοντέλα να χρησιμοποιηθούν για την όσο το δυνατό πιο ασφαλή πρόβλεψη επιπτώσεων κάθε φυσικού (ή και ανθρωπογενούς) κινδύνου.



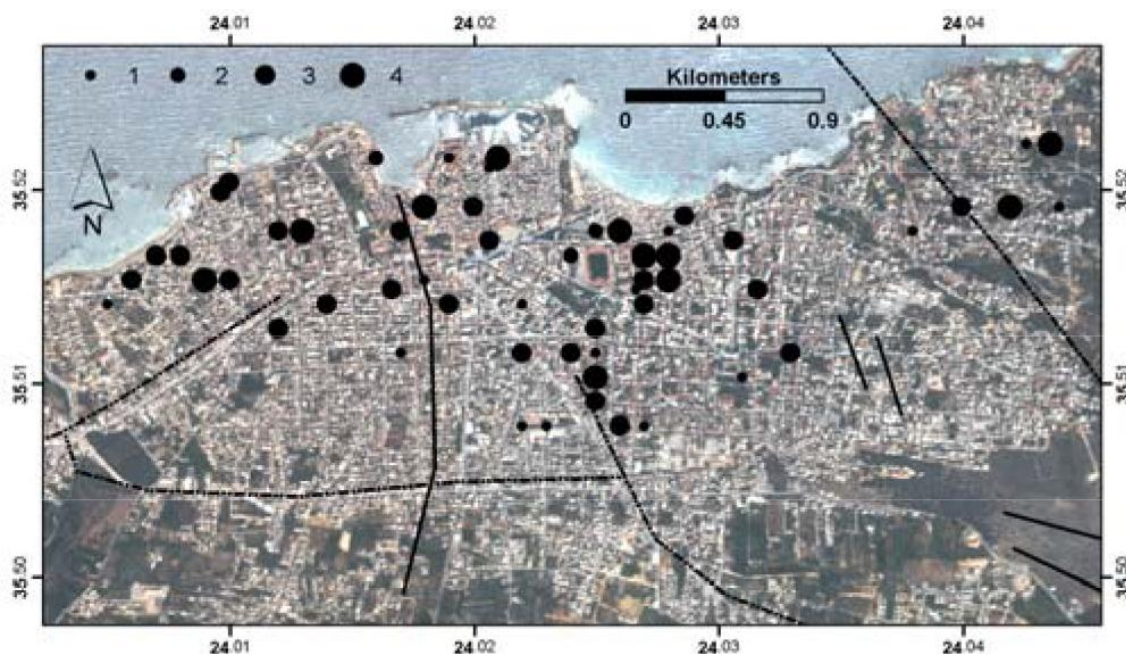
Εικόνα 6.29: Σεισμική επικινδυνότητα ανά οικοδομικό τετράγωνο κατά Sarris et al (2010)

6.8.2. Σύγκριση με αποτελέσματα σεισμικών γεγονότων

Το δεύτερο μέρος της κριτικής των αποτελεσμάτων της παρούσας μελέτης είναι η σύγκριση των επιπτώσεων προηγούμενων σεισμικών γεγονότων με όσα προέκυψαν, ως εκτίμηση, από την παρούσα μελέτη. Αυτό θα γίνει κυρίως με τη χρήση των καταγραφών που προέκυψαν σύμφωνα

με τους Kouli et al. (2006) από τον σεισμό με μέγεθος $M=6.7$, που συνέβη στις 8 Ιανουαρίου 2006, κοντά στην περιοχή των Κυθήρων.

Στη μελέτη των Kouli et al. (2006) (Εικόνα 6.30) το επίπεδο των ζημιών κατατάχθηκε σε τέσσερις κλάσεις (1, 2, 3, 4) με αυξανόμενο επίπεδο ζημιάς. Συνολικά έντεκα κτίρια υπέστησαν σοβαρές ζημιές και έχρηζαν πλήρους ανακατασκευής (κλάση 4), τριάντα ήταν μερικώς κατεστραμμένα και θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μόνο μετά από επισκευή (κλάση 3), τέσσερα θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν χωρίς επισκευή (κλάση 2) και εικοσιτρία εμφάνισαν μικρού μεγέθους ζημιές.



Εικόνα 6.30: Θέσεις και κατηγοριοποίηση ζημιών εξαιτίας του σεισμού των Κυθήρων (Πηγή: Kouli et al. 2006)

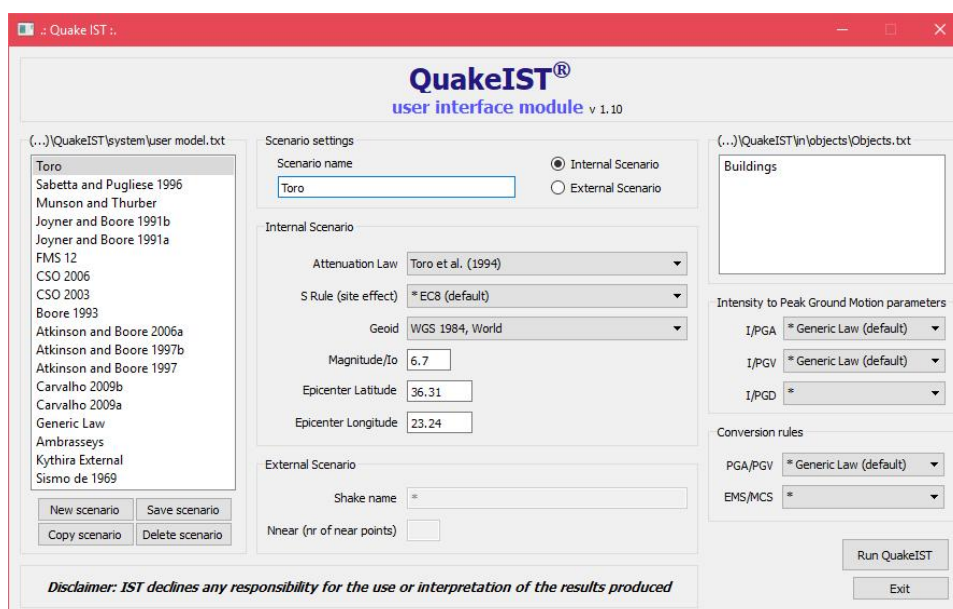
Τα κτίρια που εμφάνισαν βλάβες βρίσκονται κυρίως στο βόρειο τμήμα της πόλης των Χανίων. Τα σοβαρά κατεστραμμένα κτίρια κατασκευάστηκαν πριν από το 1970, ενώ τα κτίρια που κατασκευάστηκαν μετά το 1970 εμφάνισαν μετρίου μεγέθους ή απειροελάχιστες μικροζημιές. Δεκατρία από τα κτίρια με βλάβες κατασκευάστηκαν κατά τη διάρκεια ή μετά το 1980, ενώ πέντε από αυτά υπέστησαν μέτρια ζημιά απαιτώντας επισκευή.

Η χωρική κατανομή των κατεστραμμένων κτιρίων επαληθεύει σε μεγάλο βαθμό της μεθοδολογία που εφαρμόστηκε στην παρούσα μελέτη για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.30, η πλειονότητα των κτιρίων με σοβαρές (κλάσης 4) και μέτριες (τάξης 3) ζημιές, βρίσκονταν εντός των ορίων της πρώτης ζώνης υψηλού κινδύνου (παλαιά πόλη, παράκτια ζώνη, Κουμ Καπί, Άγιος Ιωάννης). Τα

υπόλοιπα κατεστραμμένα κτίρια εντοπίστηκαν σε περιοχές της δεύτερης ζώνης, των οποίων η επικινδυνότητα ήταν αυξημένη, κυρίως λόγω του αυξημένου ποσοστού των παλαιών κτιρίων εντός των συγκεκριμένων οικοδομικών τετραγώνων.

6.9. Διερεύνηση με ενσωματωμένους σχέσεις εξασθένησης

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες, για την προσομοίωση της σεισμικής κίνησης χρησιμοποιήθηκε η επιλογή του εξωτερικού σεναρίου του QuakeIST, εισαγάγαμε δηλαδή δεδομένες επιταχύνσεις που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια ενός σεισμού σε διάφορα σημεία της περιοχής. Το γεγονός ότι εμφανίστηκε σύγκλιση τόσο με προηγούμενη έρευνα, όσο και με τις πραγματικές επιπτώσεις του σεισμού ενισχύει την αξιοπιστία της μεθόδου. Θα ήταν όμως ιδιαίτερως χρήσιμη η προσομοίωση του μοντέλου, όχι με εξωτερικό σενάριο, αλλά με τη χρήση σχέσεων εξασθένησης, που διατίθενται στη βιβλιοθήκη του QuakeIST. Η διερεύνηση αυτή είναι χρήσιμη, τόσο για περαιτέρω σύγκριση και αξιολόγηση των εξαχθέντων αποτελεσμάτων, όσο και για τον προσδιορισμό της σχέσης που δίνει την πιο ρεαλιστική προσέγγιση, έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για προσομοιώσεις μελλοντικών σεισμικών γεγονότων. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει τόσο ποιοτικά (εντοπισμός πιο επικίνδυνων περιοχών της πόλης), όσο και ποσοτικά (σύγκριση μεταξύ μέσου αναμενόμενου βαθμού βλαβών).



Εικόνα 6.31: Μενού προσαρμογής σεναρίου προσομοίωσης

Στην Εικόνα 6.31 παρουσιάζεται το μενού καθορισμού των σχέσεων εξασθένησης. Για να έχουμε συγκρίσιμα αποτελέσματα με αυτά του εξωτερικού σεναρίου, χρησιμοποιούνται τα

στοιχεία του ίδιου σεισμικού γεγονότος των Κυθήρων. Το σύστημα συντεταγμένων παραμένει το WGS84 και για τις εδαφικές συνθήκες θα χρησιμοποιηθούν και πάλι τα προβλεπόμενα από τον αντισεισμικό κανονισμό EC8. Η προσομοίωση εσωτερικού σεναρίου θα γίνει με τις σχέσεις εξασθένησης που διαθέτει η βιβλιοθήκη του QuakeIST και έχουν εφαρμογή στην Ευρώπη. Πιο συγκεκριμένα, θα χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις των: Ambraseys 1996 (Ambraseys et al. 1996), που αφορά την περιοχή της Ευρώπης, Carvalho 2009a και Carvalho 2009b (Carvalho et al., 2009), που αφορά συγκεκριμένη περιοχή της Πορτογαλίας, CSO 2003, στατιστική βάση με έδρα την Ιρλανδία, Sabetta & Pugliese 1996 (Sabetta et al. 1996), που αφορά τη γειτονική περιοχή της Ιταλίας και τέλος θα χρησιμοποιηθεί η “μέση κατάσταση”, ένας μέσος όρος όλων των νόμων εξασθένησης κατά το QuakeIST (Generic Law). Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων συγκρίσιμων ποιοτικά και ποσοτικά τόσο μεταξύ τους, όσο και με το εξωτερικό σενάριο, για τα υπόλοιπα στοιχεία του μοντέλου (π.χ., μετατροπή PGA σε PGV, Ένταση σε PGA κλπ) θα χρησιμοποιήσουμε τη “μέση” κατάσταση.

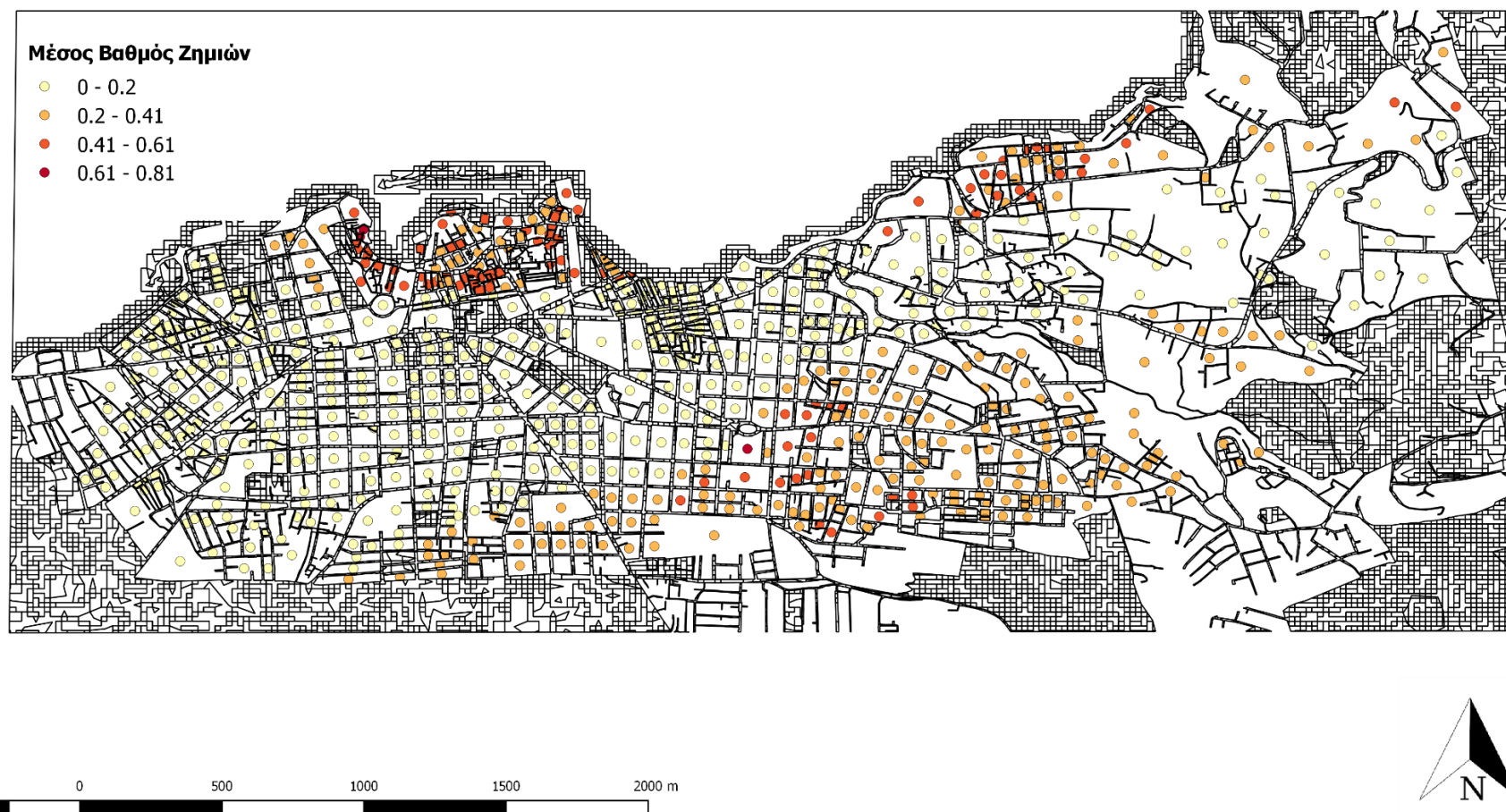
Στις Εικόνες 6.32 έως 6.37 παρουσιάζεται ο μέσος εκτιμώμενος βαθμός ζημιών για κάθε μία από τις προαναφερθείσες σχέσεις. Παρά τις αποκλίσεις και συγκλίσεις που εμφανίζουν, αυτό που γίνεται σαφές είναι ότι υπάρχουν συγκεκριμένες περιοχές οι οποίες εμφανίζουν αυξημένη επικινδυνότητα. Πιο συγκεκριμένα, πρωτίστως η περιοχή της παλαιάς πόλης, του Κουμ Καπί και του Αγίου Ιωάννη και δευτερευόντως η παράκτια (κυρίως) περιοχή της Χαλέπας και μέρος της Νέας Χώρας. Το συμπέρασμα αυτό είναι κοινό σε όλες τις προσομοιώσεις, είτε εξωτερικού είτε εσωτερικού σεναρίου.

Τα αποτελέσματα σύμφωνα με την εξίσωση Ambraseys 1996 (Εικόνα 6.32) φαίνεται να δίνουν μια εικόνα μικρότερης επικινδυνότητας. Όλες οι τιμές είναι αρκετά χαμηλότερες από αυτές του εξωτερικού σεναρίου, ενώ δεν είναι έκδηλο το φαινόμενο δημιουργίας των τριών ζωνών επικινδυνότητας. Εμφανίζονται κατά κύριο λόγο είτε κτίρια με αρκετά μεγάλη επικινδυνότητα, είτε κτίρια με πολύ μικρή επικινδυνότητα, πάντα συγκριτικά με τα εξαχθέντα αποτελέσματα του εξωτερικού σεναρίου. Ταυτόχρονα εμφανίζονται κάποια αποτελέσματα, όχι τόσο ορθολογικά, όπως αυξημένη επικινδυνότητα στο ανατολικό σε σχέση με το δυτικό τμήμα, μια συγκέντρωση αυξημένης επικινδυνότητας πέριξ των πυρήνων μέγιστου βαθμού, όπως επίσης και μία επικίνδυνη ζώνη στο νότιο τμήμα. Όλα τα παραπάνω δημιουργούν μια δυσπιστία για τη ρεαλιστικότητα της εφαρμογής της εν λόγω σχέσης για την περιοχή της πόλης των Χανίων.

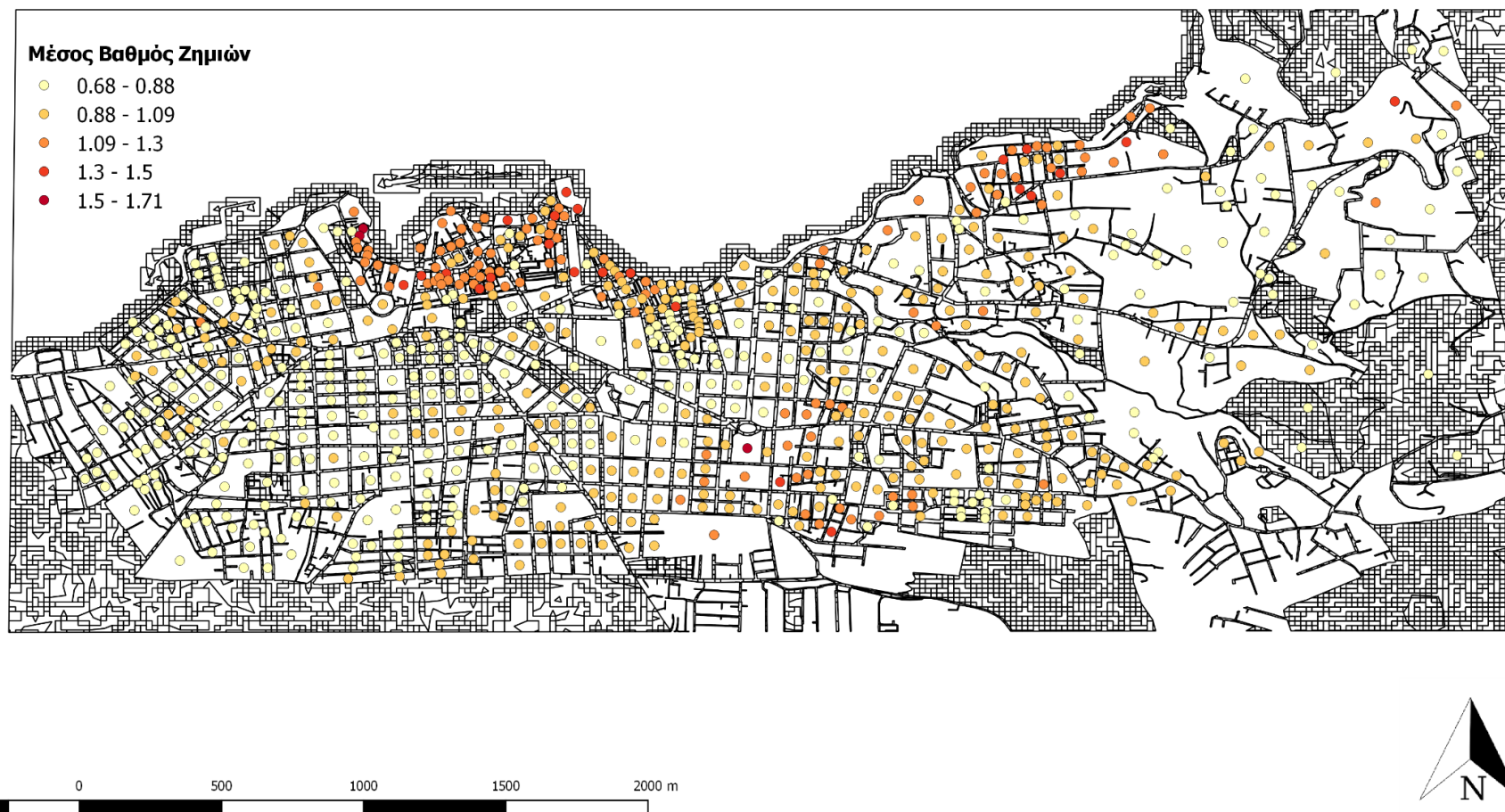
Στην Εικόνα 6.33 παρατίθενται τα αποτελέσματα σύμφωνα με το νόμο του Carvalho 2009a. Γενικά, η επικινδυνότητα εμφανίζεται λίγο αυξημένη σε σχέση με το μοντέλο του εξωτερικού σεναρίου, αν και στην περιοχή του κεντρικού πολεοδομικού συγκροτήματος της πόλης (όπου παρουσιάζεται η μικρότερη σεισμική επικινδυνότητα) οι διαφορές δεν είναι μεγάλες. Η περιοχή του κέντρου του πολεοδομικού συγκροτήματος εμφανίζει μια σχετικά ομαλή διανομή. Αξιοσημείωτη είναι η μικρή επικινδυνότητα της περιοχής του Κουμ Καπί και της Νέας Χώρας. Τα σχετικά αυξημένα νούμερα επικινδυνότητας σε γενικές γραμμές, σε συνδυασμό με τα μη αναμενόμενα αποτελέσματα στις περιοχές του Κουμ Καπί, Νέας Χώρα, δημιουργούν ερωτηματικά για την αξιοπιστία του μοντέλου στην περιοχή μελέτης.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σύμφωνα με τη σχέση Carvalho 2009b (Εικόνα 6.34) αποτελεί μία σύνθεση των αποτελεσμάτων των σχέσεων Ambraseys 1996 και Carvalho 2009a. Γενικά, οι τιμές εμφανίζονται μειωμένες σε σχέση με το εξωτερικό σενάριο, τα όριά τους είναι κοντά σε αυτά της προσομοίωσης με βάση τη σχέση Ambraseys 1996. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι (εκτός από τις τιμές που δεν απέχουν πολύ), η κατανομή του βαθμού επικινδυνότητας παρουσιάζεται πολύ συγγενής με αυτή του εξωτερικού σεναρίου. Παρατηρείται μια δημιουργία ζωνών με ένα αρκετά ομαλό τρόπο. Εξαίρεση αποτελούν και πάλι περιοχές όπως το Κουμ Καπί, η Νέα Χώρα που η επικινδυνότητά τους εμφανίζεται μικρότερη. Το σενάριο αυτό δείχνει να δίνει μια σχετικά ρεαλιστική εικόνα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα μοντέλα εξασθένησης, πάντα αναφορικά με το εξωτερικό σενάριο και σε σχέση και με τα ευρήματα και τις επιτόπιες παρατηρήσεις. Βέβαια, χρήζει περισσότερης διερεύνησης για την πλήρη επαλήθευση και αποδοχή του.

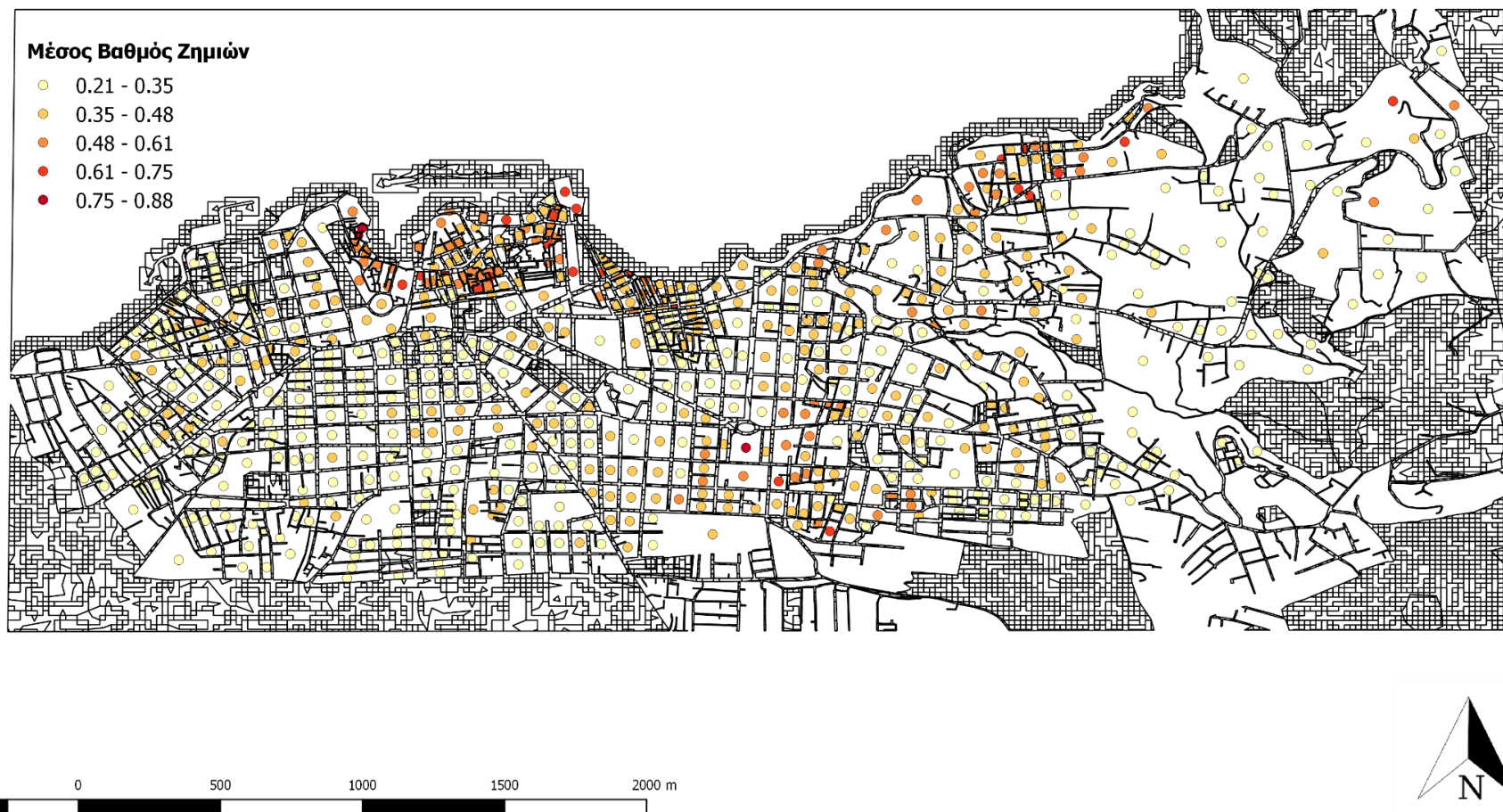
Αντιθέτως, τα εξαχθέντα αποτελέσματα σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης CSO 2003 δείχνουν ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Εξετάζοντας την Εικόνα 6.35 παρατηρούμε τους δείκτες επικινδυνότητας ιδιαίτερος αυξημένους συγκριτικά με όλα τα μοντέλα, αλλά και με αυτό του εξωτερικού σεναρίου. Από την υπάρχουσα εμπειρία σχετικά με την πόλη των Χανίων γίνεται αντιληπτό ότι και ποσοτικώς τα αποτελέσματα δεν είναι ρεαλιστικά. Παρά το γεγονός ότι η κατανομή της επικινδυνότητας παρουσιάζει μια σχετικά λογική εικόνα, παρόμοια με αυτή της σχέσης Carvalho 2009b, το μοντέλο CSO 2003 δεν μπορεί να θεωρηθεί ρεαλιστικό για τα Χανιά.



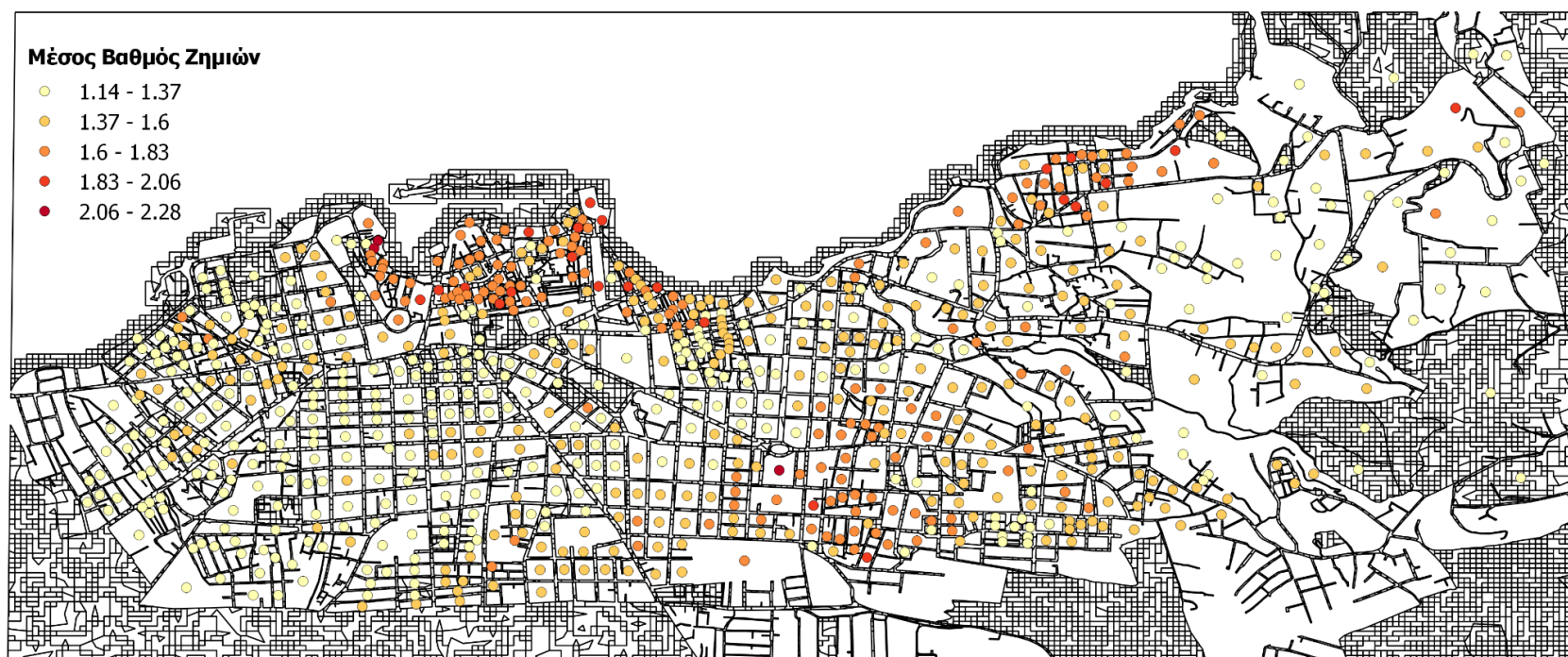
Εικόνα 6.32: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης Ambraseys 1996



Εικόνα 6.33: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης Carvalho 2009a



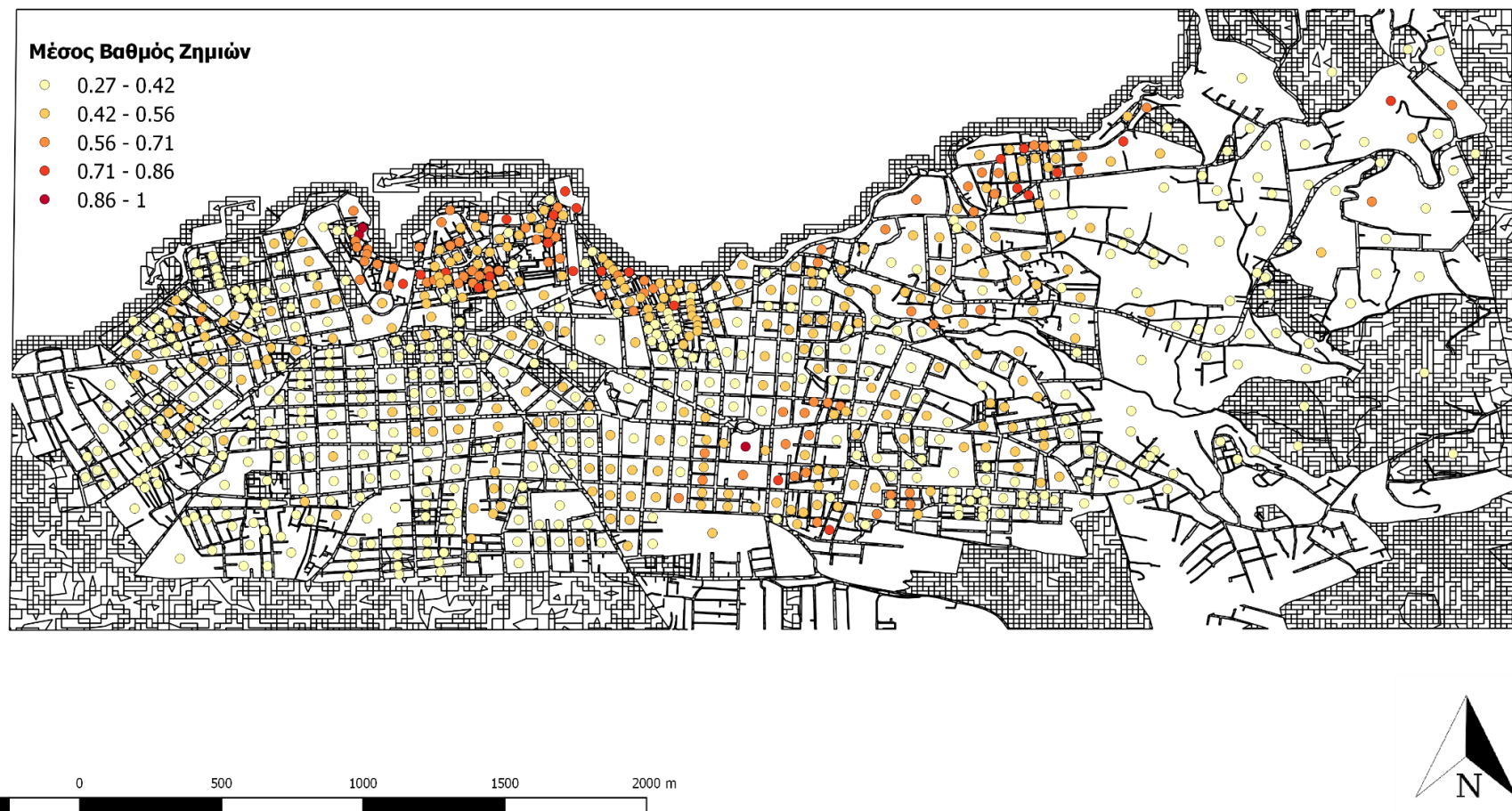
Εικόνα 6.34: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης Carvalho 2009b



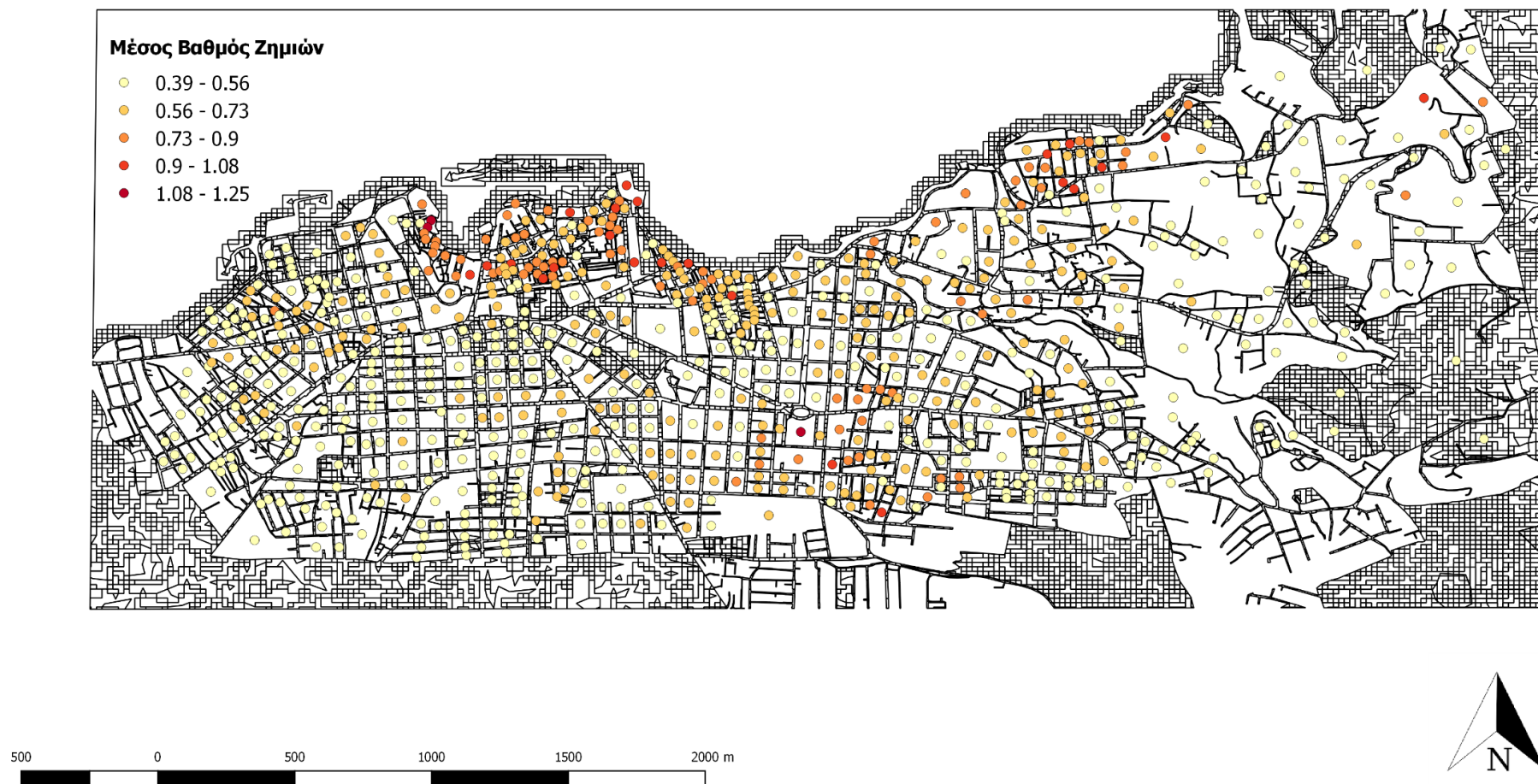
Εικόνα 6.35: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης CSO 2003

Το μοντέλο Sabetta & Pugliese 1996 (Εικόνα 6.36) αποτελεί μελέτη και εφαρμογή της περιοχής της Ιταλίας, χώρος γειτονικός της περιοχής ενδιαφέροντος, κάτι που δίνει επιπλέον βαρύτητα στα εξαχθέντα αποτελέσματα. Στην Εικόνα 6.36 παρατηρούμε ότι το συγκεκριμένο μοντέλο είναι ότι πιο κοντινό στα αποτελέσματα του εξωτερικού σεναρίου αλλά και της μελέτης των Sarris et.al. (2010). Πιο συγκεκριμένα, τα επίπεδα των βαθμών επικινδυνότητας που εμφανίζονται είναι ανάλογα (στο μοντέλο Sabetta & Pugliese 1996 είναι ελαφρώς χαμηλότερα) αυτών που προέκυψαν από το εξωτερικό σενάριο. Ταυτόχρονα, υπάρχει συμφωνία και στην κατανομή της επικινδυνότητας. Το πολεοδομικό συγκρότημα μπορεί να χωριστεί σε τρεις ζώνες με τρόπο παρόμοιο με αυτό του εξωτερικού σεναρίου. Η περιοχή του Κουμ Καπί εμφανίζει υψηλή (και σε κάποια τμήματα μέση) επικινδυνότητα, ενώ η περιοχή της Νέας Χώρας χαμηλή προς μέση. Ο συγκεκριμένος νόμος εξασθένησης φαίνεται να παρέχει από κάθε άποψη αρκετά ρεαλιστικά αποτελέσματα. Συνίσταται επομένως η περαιτέρω διερεύνηση της εφαρμογής του στα Χανιά, τόσο για την εξακρίβωση της αξιοπιστίας του, όσο και για τη επιπλέον εξέλιξη και προσαρμογή της σχέσης στα τοπικά δεδομένα.

Η Εικόνα 6.37 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της επικινδυνότητας των Χανίων χρησιμοποιώντας το μοντέλο “Generic Law” του QuakeIST, το οποίο αποτελεί τη σύνθεση των διαθέσιμων στη βιβλιοθήκη μοντέλων. Η επιλογή αυτή γίνεται για να εξεταστεί εάν το λογισμικό μπορεί να οδηγήσει σε ρεαλιστικά αποτελέσματα στη συγκεκριμένη περιοχή ενδιαφέροντος εφαρμόζοντας μια σύνθεση σχέσεων εξασθένησης. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση της πόλης των Χανίων, τα εξαχθέντα αποτελέσματα του μέσου μοντέλου, είναι ιδιαίτερος κοντά σε αυτά του εξωτερικού μοντέλου και της μελέτης των Sarris et.al. (2010). Μεγάλη συμφωνία προκύπτει τόσο στα ποσοτικά χαρακτηριστικά (τιμές), όσο και στα ποιοτικά (κατανομή). Η προσέγγιση των δύο μεθόδων είναι τόσο μεγάλη που μπορεί να θεωρηθεί ότι πρακτικά δίνουν τα ίδια αποτελέσματα. Αυτό το συμπέρασμα αναβαθμίζει τη σημασία του λογισμικού QuakeIST, καθώς τα αποτελέσματα δείχνουν ότι μέσω του QuakeIST και του μέσου μοντέλου του, μπορεί να αποτιμηθεί ρεαλιστικά η σεισμική επικινδυνότητα των Χανίων για διάφορα μελλοντικά σενάρια.



Εικόνα 6.36: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης Sabetta & Pugliese 1996



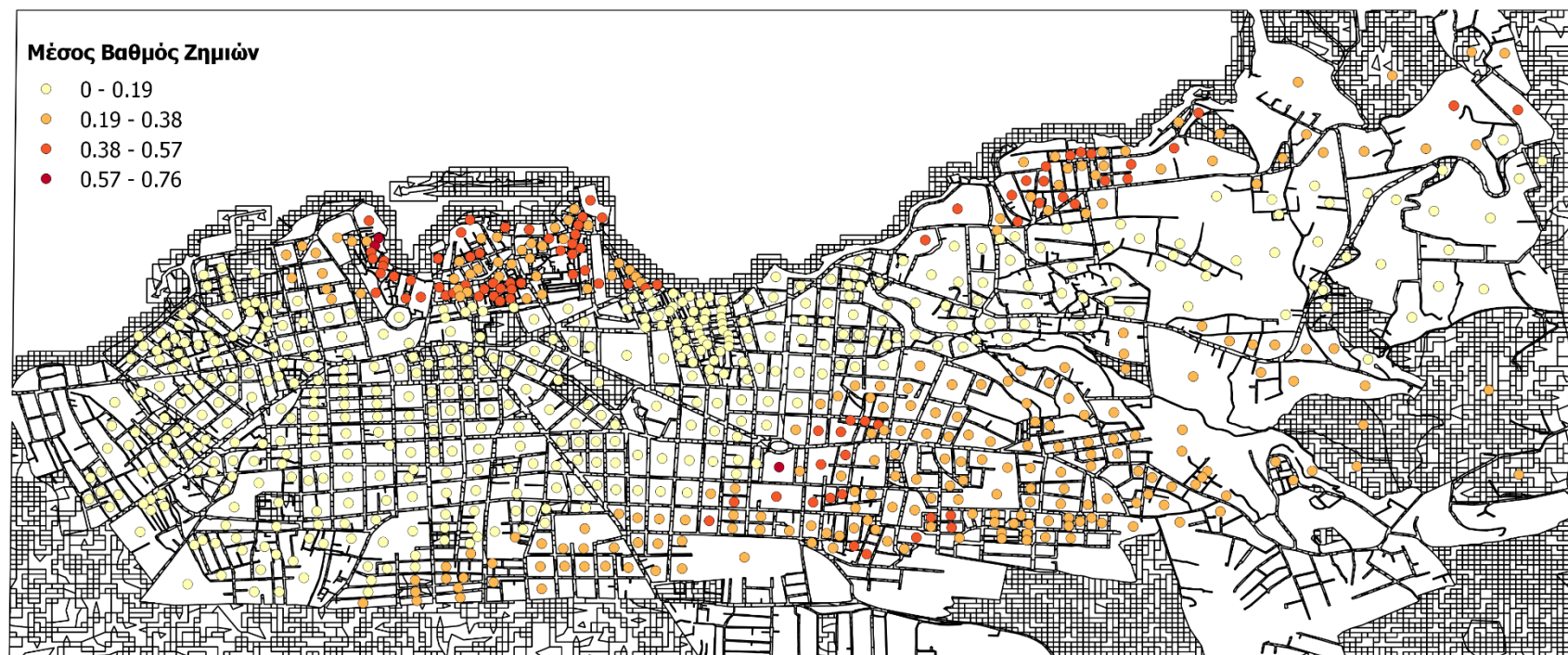
Εικόνα 6.37: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη μέση τιμή των διατιθέμενων σχέσεων εξασθένησης της βιβλιοθήκης του QuakeIST (Generic Law)

6.10. Διερεύνηση με άλλο σεισμικό σενάριο

Ενδιαφέρον, επίσης, παρουσιάζει η διερεύνηση της επικινδυνότητας της περιοχής και οι αναμενόμενες ζημιές, με χρήση δεδομένων από άλλα σεισμικά γεγονότα. Για τον λόγο αυτόν επιλέχθηκε να γίνει μια σύντομη διερεύνηση και για τον πρόσφατο σεισμό της 12^{ης} Σεπτεμβρίου 2012, μεγέθους $M_w=5.3$, που έλαβε χώρα πλησίον του νησιού της Γαύδου. Τα στοιχεία ελήφθησαν από τη σχετική μελέτη του ΙΤΣΑΚ (2012). Τα δεδομένα που προκύπτουν από τον συγκεκριμένο σεισμό κρίνονται ενδιαφέροντα, καθώς πρόκειται για σεισμό μεγέθους ικανού να προκαλέσει σημαντικές ζημιές. Ταυτόχρονα, προέρχεται από το νότιο τμήμα του Νομού, επομένως θα δώσει κάποιες ενδείξεις για την επικινδυνότητα του αστικού συγκροτήματος των Χανίων από σεισμική διέγερση που προέρχεται από τον νότο. Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή των διατιθέμενων σχέσεων εξασθένησης της βιβλιοθήκης του QuakeIST (Generic Law). Επειδή, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, είναι η προσέγγιση που δίνει τα πιο συναφή αποτελέσματα με αυτά του εξωτερικού σεναρίου και παλαιότερων μελετών και πραγματικών σεισμικών αποτελεσμάτων.

Στην Εικόνα 6.38 παρουσιάζεται η εκτίμηση του μέσου βαθμού ζημιών που θα προκύψουν στα κτίρια της πόλης των Χανίων. Με πρώτη ματιά, αμέσως διαφαίνεται ότι παρουσιάζεται η ίδια συγκέντρωση επικινδυνότητας, όπως και σε όλα τα προηγούμενα μοντέλα που εφαρμόστηκαν. Στην περίπτωση του σεισμού της Γαύδου, όμως οι εκτιμώμενες καταστροφές είναι σαφώς μικρότερες από αυτές που προέκυψαν από τον σεισμό των Κυθήρων. Ο σεισμός της Γαύδου εκτιμάται ότι έχει ζημιές έως και 40% μικρότερες, χωρίς να επηρεάσει ουσιαστικά το αστικό συγκρότημα, όπως και όντως συνέβη.

Συγκρίνοντας τις δύο σεισμικές δονήσεις και λαβάνοντας υπόψη ότι αποτελούν τα ισχυρότερα σεισμικά γεγονότα που συνέβησαν κοντά στην πόλη τα τελευταία χρόνια, αποτελεί μία ένδειξη ότι η πόλη κινδυνεύει περισσότερο από σεισμό βόρεια/δυτικά του αστικού συγκροτήματος. Οι νότιοι σεισμοί δεν αναμένεται να πλήξουν ιδιαίτερα την πόλη λόγω και της απομείωσης της έντασης των σεισμικών κυμάτων από τη διάδοση τους δια μέσου του βραχώδους ορεινού όγκου της ενδοχώρας του νομού Χανίων. Προφανώς, αυτό είναι σχετικό και πρέπει να εξετάζεται ανά περίπτωση, αφού όπως αναλύθηκε και στην παρούσα εργασία η σεισμική επικινδυνότητα και η επακόλουθη δομική τρωτότητα είναι εξαιρετικά πολύπλοκα και πολυπαραμετρικά θέματα.



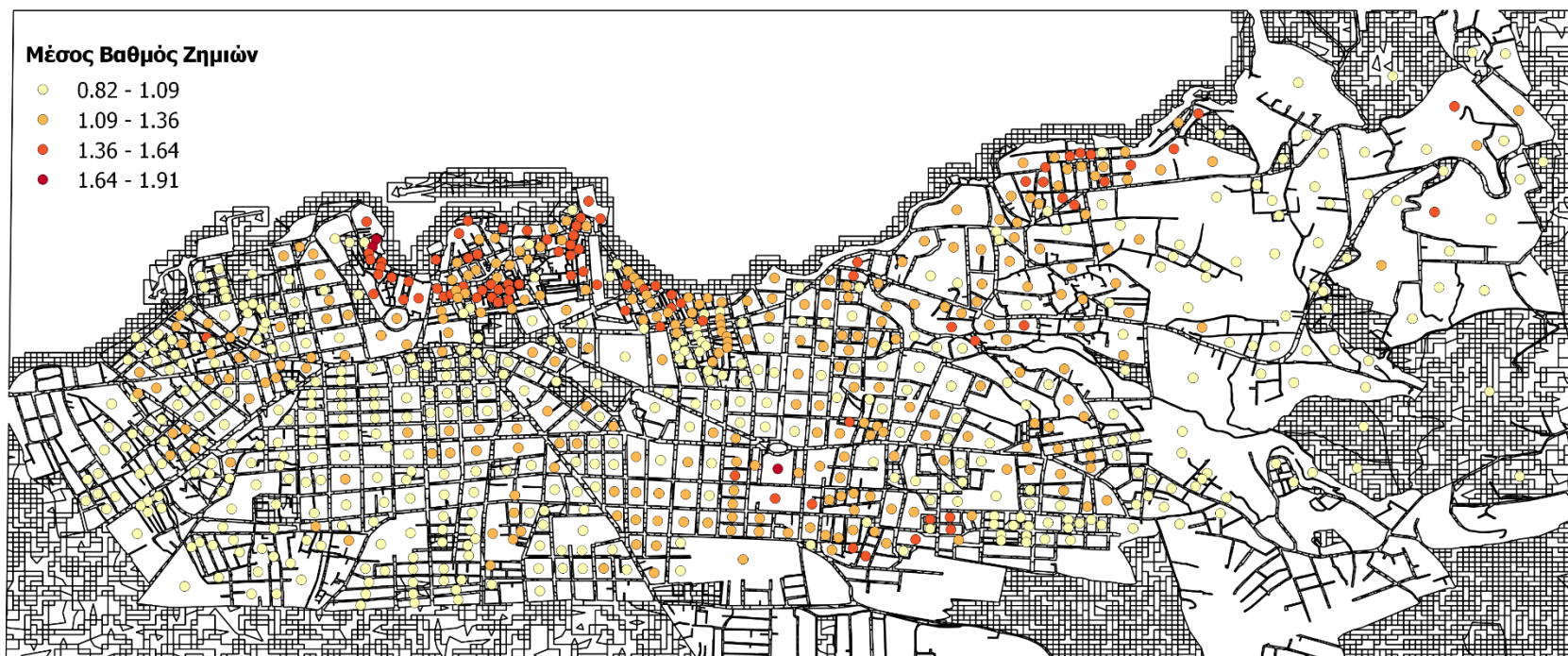
Εικόνα 6.38: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο από τον σεισμό της Γαύδου του 2012

6.11. Διερεύνηση για ακραία σεισμικά σενάρια

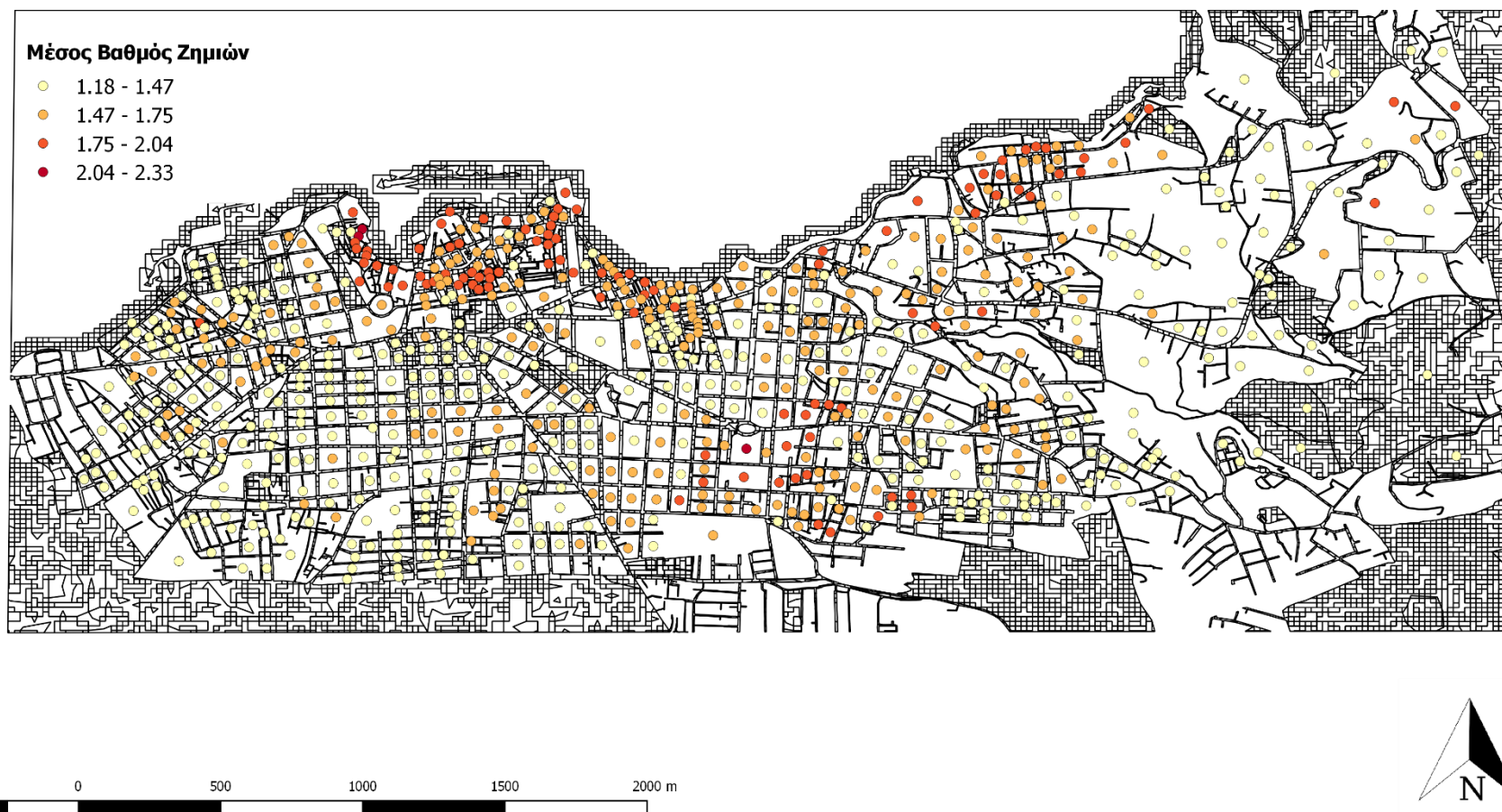
Για να εξαχθεί μια πιο γενική εικόνα για τη σεισμική επικινδυνότητα της πόλης των Χανίων υπό πολύ δυσμενέστερες συνθήκες, κρίθηκε χρήσιμη μια απλουστευτική διερεύνηση για μελλοντική σεισμική διέγερση, μεγαλύτερου μεγέθους και επιπτώσεων στις κτιριακές κατασκευές της πόλης από αυτές που ήδη εξετάστηκαν. Λόγω ελλείψεως δεδομένων για μεγάλους σεισμούς ($M > 6.0$) από ρήγματα κοντινότερα στα Χανιά από τους οποίους θα μπορούσαν να προκύψουν μεγάλες βλάβες και καταρρεύσεις κτιρίων, θα χρησιμοποιηθούν κάποια στοιχεία από τον σεισμό των Κυθήρων, αυξάνοντας το μέγεθος σε πολύ υψηλές, ακραίες τιμές: $M=7.50$, $M=8.00$ και $M=8.50$. Για τους λόγους που παρουσιάστηκαν προηγουμένως, η διερεύνηση θα γίνει με χρήση του Generic Law μοντέλου εξασθένησης του λογισμικού QuakeIST.

Στις Εικόνες 6.39 έως 6.41 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των τιμών του μέσου βαθμού ζημιών που αναμένεται να εμφανιστούν για τις τρεις προαναφερθείσες περιπτώσεις. Τα μεγέθη των τριών σεναρίων είναι πολύ μεγάλα, δεν αφορούν πραγματικά ή δυνητικά δεδομένα από το ρήγμα που έδωσε τον σεισμό των Κυθήρων, αποτελούν καθαρά υποθέσεις εργασίας έτσι ώστε να διερευνηθεί η συμπεριφορά των κτιρίων της πόλης σε δυσμενέστερα σεισμικά σενάρια. Επομένως, είναι αναμενόμενο να παρουσιαστούν μεγαλύτερα επίπεδα βλαβών από αυτά που προέκυψαν στις προηγούμενες ενότητες για τον πραγματικό σεισμό των Κυθήρων.

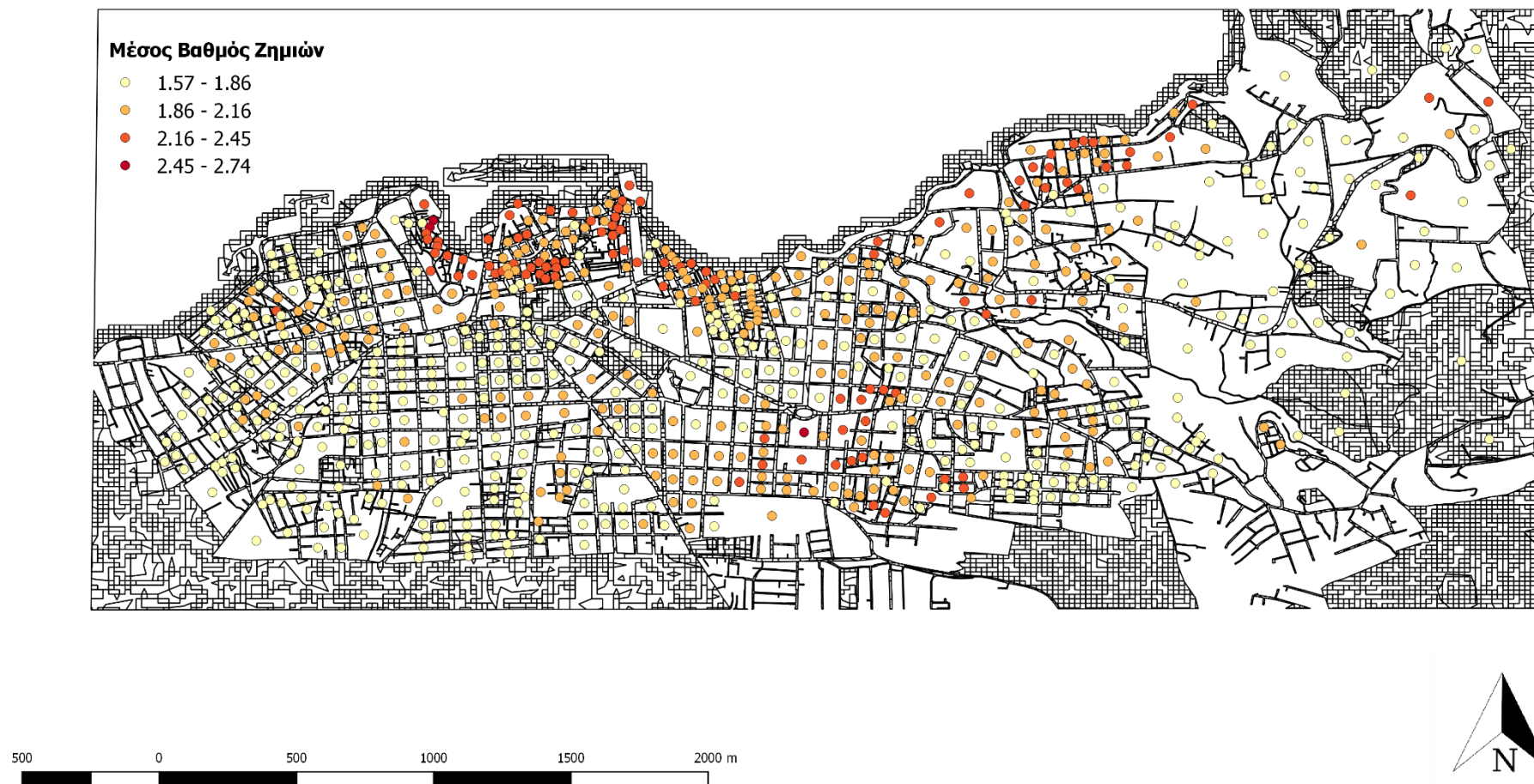
Πιο συγκεκριμένα, για σενάριο μεγέθους $M=7.50$, παρατηρούμε ότι οι ζώνες υψηλής επικινδυνότητας εμφανίζουν ζημιές της τάξης του 1.50, ενώ οι ζώνες μέσης επικινδυνότητας περίπου 1.20. Παρατηρούνται, επομένως, σχετικά ήπιες ζημιές που δεν αναμένεται να πλήξουν ιδιαίτερα την πόλη. Για σενάριο μεγέθους $M=8.00$, οι επικίνδυνες ζώνες θα εμφανίζουν ζημιές περίπου 1.80, ενώ οι μέσης επικινδυνότητας 1.50. Για σενάριο με μέγεθος $M=8.50$, τα φαινόμενα γίνονται ακόμα πιο έντονα, οι επικίνδυνες περιοχές θα έχουν ζημιές λίγο μικρότερες από 2.50, οι μέσης επικινδυνότητας πάνω από 2.00, ενώ είναι πιθανόν να υπάρχουν κτίρια με ζημιές έως και τρίτου βαθμού. Συμπερασματικά, αξιολογώντας ποιοτικά τα παραπάνω αποτελέσματα, προκύπτει ότι ποιοτικά εξακολουθεί να υφίσταται η κατηγοριοποίηση σε τρεις ζώνες, ενώ ποσοτικά τα αποτελέσματα είναι -όπως ήταν αναμενόμενο- δυσμενέστερα όσο κλιμακώνεται το σεισμικό μέγεθος. Χρειάζεται επομένως να ληφθούν υπόψιν πολλά και όσο γίνεται πιο ρεαλιστικά σεισμικά σενάρια κατά τη λήψη σχετικών μέτρων και αποφάσεων από τους αρμόδιους φορείς για την ορθή και έγκαιρη προετοιμασία και αντισεισμική προστασία της πόλης.



Εικόνα 6.39: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο υπό πολύ υψηλή σεισμική διέγερση $M=7.50$



Εικόνα 6.40: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο υπό ακραία σεισμική διέγερση $M=8.00$



Εικόνα 6.41: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο υπό εξαιρετικά ακραία σεισμική διέγερση $M=8.50$

Κεφάλαιο 7^ο: Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μία προσπάθεια για την εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε ένα σύνθετο γεωλογικά και κατασκευαστικά περιβάλλον, όπως αυτό της ευρύτερης περιοχής της πόλης των Χανίων. Αντικειμενικά ο στόχος αυτός αποτελεί ένα ιδιαίτερα σύνθετο και πολυδιάστατο ζήτημα, εξαιτίας των πολλών παραγόντων και αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στη διερεύνηση του.

Τα στοιχεία που προέκυψαν για τη σεισμική επικινδυνότητα τόσο του κάθε οικοδομικού τετραγώνου χωριστά, όσο και ολόκληρων τμημάτων, γειτονιών και περιοχών ως σύνολο, μπορούν να παράσχουν ουσιαστική πληροφόρηση για τον προγραμματισμό των διαδικασιών αντιμετώπισης κρίσεων από τις δημόσιες υπηρεσίες και φορείς, για την ανάπτυξη της πόλης, για τον χωροταξικό σχεδιασμό των μελλοντικών υποδομών, κλπ.

Για παράδειγμα, οι χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας μπορεί να δώσουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με την επιλογή της κατάλληλης θέσης για την κατασκευή έργων υποδομής ζωτικής σημασίας κατά τη διάρκεια μιας κρίσης (π.χ., το νοσοκομείο ή το κτίριο της πυροσβεστικής υπηρεσίας). Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι υφιστάμενοι κανονισμοί σχεδιασμού καθώς και οι σύγχρονες τεχνικές και υλικά κατασκευής μπορούν να παράσχουν πιο αντισεισμικά κτίρια σε σχέση με το πρόσφατο παρελθόν, ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα σε περίπτωση επιλογής της θέσης για την κατασκευή μιας νέας υψηλής σπουδαιότητας κτιριακής υποδομής είναι να εξασφαλίζεται η ανεμπόδιστη πρόσβαση σε αυτήν κατά τη διάρκεια μίας κρίσης, κι αντίστοιχα να ληφθεί μέριμνα για να διευκολυνθεί η πρόσβαση σε μία υφιστάμενη.

Οπότε, βάσει των πληροφοριών που παρέχονται από τους χάρτες σεισμικής επικινδυνότητας των Χανίων, τέτοιες τοποθεσίες μπορούν να επιλεγούν στην περίμετρο της πόλης και κατά μήκος κύριων οδών που εισέρχονται στο κέντρο της χωρίς να διασχίζουν τις ζώνες υψηλού κινδύνου. Για

παράδειγμα, το παλαιό νοσοκομείο της πόλης –το οποίο πρόσφατα εντάχθηκε και πάλι στις υπηρεσίες δημόσιας υγείας- βρίσκεται κοντά στο τμήμα υψηλού κινδύνου της ακτογραμμής και οι περισσότεροι από τους κύριους δρόμους πρόσβασης διασχίζουν ζώνες υψηλού κινδύνου. Συνεπώς, σε περίπτωση ισχυρού σεισμού μερικές από τις βασικές οδούς πρόσβασης θα μπορούσαν να μπλοκαριστούν από πιθανές καταστροφές, καθιστώντας προβληματική την πρόσβαση στον χώρο αυτόν.

Επιπλέον, τα συμπεράσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις υπηρεσίες δημόσιας προστασίας για τον καθορισμό των κατάλληλων σημείων συγκέντρωσης προκειμένου να καλυφθούν σωστά οι περιοχές υψηλού κινδύνου και να προστετευθεί ο πληθυσμός των μόνιμων κατοίκων αλλά και των επισκεπτών, ο αριθμός των οποίων είναι ιδιαίτερα αυξημένος κατά την τουριστική περίοδο. Επί του παρόντος, τα επιλεγμένα σημεία συγκέντρωσης καλύπτουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις περιοχές υψηλού κινδύνου, αλλά η κατανομή τους δεν είναι τόσο ομοιόμορφη στην υπόλοιπη πόλη.

Ασφαλώς μια διπλωματικά εργασία δεν μπορεί να καλύψει διεξοδικά όλες τις παραμέτρους του σεισμικού κινδύνου σε μια περιοχή. Χρειάζεται συνεχής έρευνα, σύγκριση και συσχέτιση των εξαχθέντων συμπερασμάτων συναφών εργασιών. Συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία αφήνει ανοικτό το ενδεχόμενο περαιτέρω διερεύνησης με εφαρμογή της ίδια μεθοδολογίας μέσω του λογισμικού QuakeIST ή και διαφορετικής, έτσι ώστε να ληφθούν υπόψη ακόμα περισσότερες παράμετροι και αβεβαιότητες. Πιο συγκεκριμένα, μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε στο καθορισμό της επικινδυνότητας να υπεισέρχονταν και παράγοντες που αφορούν το δίκτυο ύδρευσης, το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, το οδικό δίκτυο, όπως επίσης και να μελετηθούν διεξοδικά κτίρια μεγάλης σπουδαιότητας, όπως τα σχολεία και οι μεγάλοι χώροι συνάθροισης κοινού. Τα προαναφερθέντα παραδείγματα και οι πολυάριθμες άλλες εφαρμογές που μπορούν να προκύψουν, αναδεικνύουν τη σημασία τέτοιων μελετών για την προστασία των πόλεων από σεισμούς και καταδεικνύουν την υποχρέωση του κράτους να συνδράμει στην υλοποίησή τους σε κάθε πόλη.

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2.1: Τροποποιημένη κλίμακα σεισμικής έντασης Mercalli, MMI-Modified Mercalli Intensity (Πηγή: Σπυράκος, 2010).....	14
Πίνακας 2.2: Συσχέτιση των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων κλιμάκων έντασης (Πηγή Τσελέντης, 1997)	15
Πίνακας 2.3: Σύγκριση μεταξύ τυπικών μεθόδων εκτίμησης της τρωτότητας (Πηγή: Αργυρούδης 2010)	22
Πίνακας 5.1: Πίνακας άντλησης δεδομένων από δημοσιευμένες μελέτες κατά περίπτωση κατασκευής (Πηγή: Sá et al 2016)	47
Πίνακας 6.1: Στοιχεία εδαφικών συνθηκών	52
Πίνακας 6.2: Στοιχεία τρωτότητας κτιρίων.....	55
Πίνακας 6.3: Τιμές τρωτότητας των κτιρίων της πόλης των Χανίων	56
Πίνακας 6.4: Στοιχεία πίνακα του QuakeIST των κτιρίων της πόλης των Χανίων.....	58
Πίνακας 6.5: Στοιχεία άλλων κατασκευών	60
Πίνακας 6.6: Στοιχεία εξωτερικού σεισμικού σεναρίου	61
Πίνακας 6.7: Κατηγορίες κτιρίων ανάλογα με τη βλάβη του υπέστησαν (Πηγή: Sá et al. 2016)	64

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 2.1: Χαρακτηριστικά σεισμικού φαινομένου (Πηγή: www.oasp.gr).....	6
Εικόνα 2.2: Είδη Ρηγμάτων (Πηγή: www.geodifhs.com).....	7
Εικόνα 2.3: Η δομή του εσωτερικού της Γης (Πηγή: www.oasp.gr).....	8
Εικόνα 2.4: Κίνηση λιθοσφαιρικών πλακών (Πηγή: www.oasp.gr)	9
Εικόνα 2.5: Ολίσθηση και σύγκλυση λιθοσφαιρικών πλακών (Πηγή: www.oasp.gr)	9
Εικόνα 2.6: Η Λιθόσφαιρα της Γης αποτελούμενη από επτά μεγάλες πλάκες (Αφρικανική, Ευρασιατική, Ινδο-Αυστραλιανή, Ανταρκτική, πλάκα του Ειρηνικού, Βορειο-Αμερικανική, Νοτιο-Αμερικανική) και αρκετές μικρότερες. Οι πλάκες κινούνται προς διαφορετικές διευθύνσεις (Πηγή: www.oasp.gr)	10
Εικόνα 2.7: Κλίμακα Έντασης MM (Πηγή: ΟΑΣΠ).....	13
Εικόνα 2.8: Παράδειγμα Ισόσειστων καμπύλων για τον σεισμό της Αμοργού το 1956 (Πηγή: http://earthquake-now.blogspot.gr).....	15
Εικόνα 3.1: Η γεωλογία της περιοχής ενδιαφέροντος σύμφωνα με το χάρτη του ΙΓΜΕ (φύλλο Χανιά, 1:50000), (Παπαδόπουλος Η., 2013)	24
Εικόνα 3.2: Γεωλογία του πολεοδομικού συγκροτήματος των Χανίων (τροποποιημένο από Bastelli (2002))......	25
Εικόνα 3.3: Χάρτης της γεωγραφικής κατανομής των επικέντρων όλων των γνωστών επιφανειακών σεισμών στην ευρύτερη περιοχή του Νομού Χανίων για μεγέθη $MW \geq 5.0$ (Μουντράκης και συνεργ., 2004).....	26
Εικόνα 3.4: Γεωγραφική κατανομή των επικέντρων των σεισμών ενδιαμέσου βάθους (Παπαιωάννου και συν. 2008).....	27

Εικόνα 4.1: Διαδικασία Χρήσης ενός ΓΣΠ (Πηγή: http://ces.iisc.ernet.in/hpg-/envis/Remote/section153.htm).	30
Εικόνα 4.2: Μοντέλο σχεσιακής βάσης δεδομένων διαφόρων θεματικών επιπέδων – Layers (Πηγή: www.gembc.ca).	34
Εικόνα 4.3: Εφαρμογές των ΓΣΠ (Πηγή: http://www.northaugusta.net/).	36
Εικόνα 5.1: Επίπεδα QuakeIST (Πηγή: Sá et al. 2016)	43
Εικόνα 5.2: Δομή QuakeIST (Πηγή: Sá et al, 2016)	45
Εικόνα 6.1: Χάρτης κατηγοριών εδάφους στο αστικό συγκρότημα με βάση των EC8 (Πηγή: Pelekis et al. 2013)	52
Εικόνα 6.2: Ψηφιοποιημένος χάρτης στο QGIS.....	53
Εικόνα 6.3: Διαχωρισμός εδαφικών τμημάτων.....	53
Εικόνα 6.4: Πίνακας εδαφικών συνθηκών	54
Εικόνα 6.5: Πίνακας τρωτότητας των κτιρίων της πόλης των Χανίων	57
Εικόνα 6.6: Διαδικασία “Join Attributes by location”	59
Εικόνα 6.7: Ενδεικτικός πίνακας κτιρίων.....	59
Εικόνα 6.8: Αρχείο λίστας κατασκευών.....	61
Εικόνα 6.9: Πίνακας μοντέλου εξωτερικού σεναρίου	62
Εικόνα 6.10: Μενού εφαρμογής usermodule.exe.....	62
Εικόνα 6.11: Αρχείο user model.txt.....	63
Εικόνα 6.12: Ποσοστό κτιρίων εντός οικοδομικού τετραγώνου κατασκευής πριν το 1960	65
Εικόνα 6.13: Ποσοστό κτιρίων εντός οικοδομικού τετραγώνου κατασκευής μεταξύ 1961-1990 ...	66
Εικόνα 6.14: Ποσοστό κτιρίων εντός οικοδομικού τετραγώνου κατασκευής μετά το 1991.....	67
Εικόνα 6.15: Μέσος όρος ορόφων κτιρίων εντός κάθε οικοδομικού τετραγώνου	68
Εικόνα 6.16: Ποσοστό κτιρίων με σκελετό από οπλισμένο σκυρόδεμα εντός κάθε οικοδομικού τετραγώνου.....	70
Εικόνα 6.17: Ποσοστό κτιρίων από λιθοδομή εντός κάθε οικοδομικού τετραγώνου.....	71
Εικόνα 6.18: Ποσοστό κτιρίων με στέγη εντός κάθε οικοδομικού τετραγώνου	72
Εικόνα 6.19: Αριθμός κτιρίων ανά οικοδομικό τετράγωνο.....	73
Εικόνα 6.20: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο	75

Εικόνα 6.21: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο	76
Εικόνα 6.22: Εκτιμώμενος μέγιστος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο	77
Εικόνα 6.23: Πιθανότητα εμφάνισης ζημιών τουλάχιστον Βαθμού Ι ανά οικοδομικό τετράγωνο ..	78
Εικόνα 6.24: Πιθανότητα εμφάνισης ζημιών τουλάχιστον Βαθμού ΙΙ ανά οικοδομικό τετράγωνο .	79
Εικόνα 6.25: Πιθανότητα εμφάνισης ζημιών τουλάχιστον Βαθμού ΙΙΙ ανά οικοδομικό τετράγωνο	80
Εικόνα 6.26: Σημεία συγκέντρωσης σε περίπτωση εκτάκτου γεγονότος (Sarris et al, 2010).....	82
Εικόνα 6.27: Θέσεις πολιτιστικών χώρων, θρησκευτικών ναών και σχολείων (Πηγή: Δήμος Χανίων)	83
Εικόνα 6.28: Θέσεις χώρων στάθμευσης, χώρων υγείας και παιδικών χαρών(Πηγή: Δήμος Χανίων)	84
Εικόνα 6.29: Σεισμική επικινδυνότητα ανά οικοδομικό τετράγωνο κατά Sarris et al (2010).....	86
Εικόνα 6.30: Θέσεις και κατηγοριοποίηση ζημιών εξαιτίας του σεισμού των Κυθήρων (Πηγή: Kouli et al. 2006)	87
Εικόνα 6.31: Μενού προσαρμογής σεναρίου προσομοίωσης.....	88
Εικόνα 6.32: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης Ambraseys 1996.....	91
Εικόνα 6.33: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης Carvalho 2009a	92
Εικόνα 6.34: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης Carvalho 2009b	93
Εικόνα 6.35: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης CSO 2003.....	94
Εικόνα 6.36: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη σχέση εξασθένησης Sabetta & Pugliese 1996	96
Εικόνα 6.37: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο σύμφωνα με τη μέση τιμή των διατιθέμενων σχέσεων εξασθένησης της βιβλιοθήκης του QuakeIST (Generic Law)	97
Εικόνα 6.38: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο από τον σεισμό της Γαύδου του 2012	99
Εικόνα 6.39: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο υπό πολύ υψηλή σεισμική διέγερση $M=7.50$	101
Εικόνα 6.40: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο υπό ακραία σεισμική διέγερση $M=8.00$	102

Εικόνα 6.41: Εκτιμώμενος μέσος βαθμός ζημιών ανά οικοδομικό τετράγωνο υπό εξαιρετικά ακραία σεισμική διέγερση $M=8.50$	103
--	-----

Ευρετήριο Γραφημάτων

Γράφημα 2.1: Παράδειγμα καμπύλης τρωτότητας (Πηγή: Αργυρούδης 2010)	17
Γράφημα 2.2: Πιθανότητες υπέρβασης και εμφάνισης των σταθμών βλάβης στις καμπύλες τρωτότητας (Πηγή: Αργυρούδης 2010)	17
Γράφημα 5.1: Οι σχέσεις εξασθένησης που είναι διαθέσιμες στη βιβλιοθήκη του QuakeIST (Πηγή: Sá et al. 2016).....	48
Γράφημα 5.2: Μετατροπή μεταξύ PGA και μακροσεισμικής έντασης (Πηγή: Sá et al, 2016).....	49

Βιβλιογραφία

Διεθνής Βιβλιογραφία

- Aki, K. (1966). Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964, Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo Univ., 44, pp. 23-88.
- Ambraseys, N. N., Simpson, K. U., & Bommer, J. J. (1996). Prediction of horizontal response spectra in Europe. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 25(4), 371-400.
- Anagnos, T., Rojahn C., Kiremidjian, AS. (1995) "NCEER-ATC Joint Study on Fragility of Buildings". Technical Report NCEER 95-0003, State Univ. of NY at Buffalo.
- Anagnostopoulos, S., Providakis, C., Salvaneschi, P., Athanasopoulos, G., & Bonacina, G. (2008). SEISMOCARE: An efficient GIS tool for scenario-type investigations of seismic risk of existing cities. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 28(2), 73-84.
- Applied Technology Council (1985). "ATC-13-Earthquake Damage Evaluation Data for California", Redwood City, California.
- Applied Technology Council (1991). "ATC-25-Seismic Vulnerability and Impact of Disruption on Conterminous United States", Redwood City, California.
- ATC 40 (1996) Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, ATC-40. Applied Technology Council, Redwood City.
- Azevedo, J., Guerreiro, L., Bento, R., Lopes, M., Proença, J. (2010). "Seismic Vulnerability of Lifelines in the Greater Lisbon Area." Bulletin of Earthquake Engineering, 8:157–180.
- Barbat, A. H., Lagomarsino, S., & Pujades, L. G. (2008). Vulnerability assessment of dwelling buildings. In Assessing and managing earthquake risk (pp. 115-134). Springer, Dordrecht.
- Barbat, A.H., Lagomarsino, S., Pujades, L.G. (2006). "Chapter 5: Vulnerability Assessment of Dwelling Buildings". In Assessing and Managing Earthquake Risk, Geo-scientific and

- Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation: developments, tools, techniques, Eds. X. Goula, C. S. Oliveira, A. Roca, Springer, ISBN 1-4020-3524-1. pp. 185-211.
- Bartolomei, A., Corigliano, M., & Lai, C. G. (2008, July). Seismic risk assessment of Italian seaports using GIS. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1020, No. 1, pp. 1591-1598). AIP.
- Basöz, N.I., Kiremidjian, A.S. (1998). "Evaluation of Bridge Damage Data from the Loma Prieta and Northridge, California Earthquake". Technical Report MCEER-98-0004, State University of New York, Buffalo.
- Bastelli, G. (2002). Microzonazione di Chania (Creta). Doctoral dissertation, Tesi di laurea.
- Berzhinskii, Yu.A, Ordynskaya, A.P., Gladkov, A.S. Lunina, O.V., Berzhinskaya, L.P., Radziminovich, N.A., Radziminovich, Ya.B., Imayev, V.S., Chipizubov, A.V. and Smekalin O. P. (2010). Application of the ESI2007 Scale for Estimating the Intensity of the Kultuk Earthquake, August 27, 2008 (South Baikal), ISSN 07479239, Seismic Instruments, 46(4), pp. 307–324
- CAPRA (2014) <http://www.ecapra.org/software>
- Carvalho, A., Costa, A. C., & Oliveira, C. S. (2009). A finite–fault modeling of the 1755 Lisbon earthquake sources. In The 1755 Lisbon Earthquake: Revisited (pp. 433-454). Springer Netherlands.
- Coburn AW, Pomonis A, Spence R (1992) Factors determining human casualty levels in earthquakes: mortality prediction in building collapse. In: Proceedings of the 10th world conference on earthquake engineering, Madrid
- Coburn, A., Spence, R. (2002). "Earthquake Protection", John Willey and Sons Ltd, Chichester, England.
- Cocard, M., Kahle, H. G., Peter, Y., Geiger, A., Veis, G., Felekis, S., ... & Billiris, H. (1999). New constraints on the rapid crustal motion of the Aegean region: recent results inferred from GPS measurements (1993–1998) across the West Hellenic Arc, Greece. Earth and Planetary Science Letters, 172(1), 39-47.
- EC-8 (2004) Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance—part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. EN 1980-1:2004. Comite' Europe'an de Normalization
- Eguchi, R.T., Huyck, C.K. (2000). "Using Advanced Technologies to Develop the next Generation of Earthquake Loss Models for Transportation Systems", Proceedings of the 2nd International Workshop on Mitigation of Seismic Effects on Transportation Structures, September 13-15, Taipei, Taiwan, Republic of China.

- ELER (2014) <http://www.koeri.boun.edu.tr/depremmuh/eski>
- Ellingwood, B., Kinali, K. (2009). "Quantifying and Communicating Uncertainty in Seismic Risk Assessment". *Structural Safety*, 31(2): 179–187.
- ESRI (1999). "GIS for Emergency Management", An ESRI White Paper, Environmental Systems Research Institute, Inc., <http://www.esri.com/library/whitepapers/pdfs/emermgmt.pdf>.
- European Commission, Grunthal, G. (ed.) (1998). *European Macroseismic Scale EMS-98*, Luxembourg, Cahiers du Centre Europeen de Geodynamique et de Seismologie, vol. 15.
- Fajfar, P. (1999). Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28(9), 979-994.
- Fassoulas, C. (1995). Kinematics and deformation of the nappes in Central Crete, Greece. Aristotle University of Thessaloniki, (in Greek with English abstract).
- Freeman, S. A. (2004). Review of the development of the capacity spectrum method. *ISCT Journal of Earthquake Technology*, 41(1), 1-13.
- GEM1 (2010) <http://www.globalquakemodel.org/resources/publications/technical-reports/gem1-executivesummary/>. Last Accessed Mar 2014
- Giammarinaro, M. S., Alletti, M., Azzara, R. M., Canzoneri, V., Maiorana, S., Rovelli, A., ... & Vallone, P. (2003). Natural hazard assessment through an oriented GIS. In *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*.
- Giovinazzi, S., & Lagomarsino, S. (2004). A macroseismic method for the vulnerability assessment of buildings. In *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, BC, Canada (pp. 1-6).
- Goretti, A. (2005). "A Probabilistic Model able to Handle Interaction among Road Network, Buildings and Emergency Services in Urban Areas". *Proc. IX International Conference On Structural Safety And Reliability, ICOSSAR'05*, Rome, 19–23 June
- Guéguen, P., Michel, C., & LeCorre, L. (2007). A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble (France). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5(3), 467-490.
- Hampton, S. D., Lee, J. S., Tolbert, N. L., McLaren, T. M., Navarro, C. M., Myers, J. D., ... & Elnashai, A. S. (2008). MAEviz: bridging the time-from-discovery gap between seismic research and decision making. In *eScience, 2008. eScience'08. IEEE Fourth International Conference on* (pp. 414-415). IEEE.

- Harr, M.E. (1977). "Mechanics of Particulate Media – A Probabilistic Approach". Mc Graw-Hill, New York, NY.
- Harr, M.E. (1987). "Reliability-based Design in Civil Engineering". Mc Graw – Hill, New York, NY.
- HAZUS (1999) National Institute of Building Science—earthquake loss estimation methodology, technical manual. Report prepared for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. www.fema.gov/plan/prevent/hazus
- HAZUS (2010) HAZUS-MH MR5 Technical Manual—Earthquake Model U.S. Department of Homeland Security
- Inel, M., Senel, S. M., Toprak, S., & Manav, Y. (2008). Seismic risk assessment of buildings in urban areas: a case study for Denizli, Turkey. *Natural Hazards*, 46(3), 265-285.
- Jackson, J. (1994). Active tectonics of the Aegean region. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 22(1), 239-271.
- Kawashima, K., Unjoh, S. (1990). "An Inspection Method of Seismic Vulnerability of Existing Highway Bridges", *Structural Eng./Earthquake Eng.*, 7(1): 143-150.
- Kilias, A., Fassoulas, C., & Mountrakis, D. (1994). Tertiary extension of continental crust and uplift of Psiloritis metamorphic core complex in the central part of the Hellenic Arc (Crete, Greece). In *Active Continental Margins—Present and Past* (pp. 417-430). Springer Berlin Heidelberg.
- Kim, S.H. (1993). "A GIS-based Regional Risk Analysis Approach for Bridges against Earthquakes", Dissertation, State University of New York at Buffalo, Department of Civil Engineering
- Kiremidjian, A., Moore, J., Fan, Y.Y., Basöz, N., Yazali, O., Williams, M. (2006). "Highway Demonstration Project", PEER Report 2006/02, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering University of California, Berkeley.
- Konstantinou, K. I., Kalogeras, I. S., Melis, N. S., Kourouzidis, M. C., & Stavrakakis, G. N. (2006). The 8 January 2006 earthquake (Mw 6.7) offshore Kythira Island, southern Greece: seismological, strong-motion, and macroseismic observations of an intermediate-depth event. *Seismological Research Letters*, 77(5), 544-553.
- Kouli, M., & Vallianatos, F. (2006). An attempt of GIS analysis of the damages of the January 8, 2006 Kythira earthquake, Greece. In *Proceedings of the 4th WSEAS international conference on environment, ecosystems and development (EED'06)*, Venice, Italy.
- Kwon, O-S., Elnashai, A. (2006). "The Effect of Material and Ground Motion Uncertainty on the Seismic Vulnerability Curves of RC Structure". *Engineering Structures*, 28: 289–303.

- Lagomarsino, S., & Giovinazzi, S. (2006). Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 4(4), 415-443.
- Lantada, N., Pujades, L. G., & Barbat, A. (2003). Vulnerability and seismic damage scenarios for Barcelona (Spain) by using GIS. In EGS-AGU-EUG Joint Assembly.
- Le Pichon, X., Chamot-Rooke, N., Lallemand, S., Noomen, R., & Veis, G. (1995). Geodetic determination of the kinematics of central Greece with respect to Europe: Implications for eastern Mediterranean tectonics. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B7), 12675-12690.
- LNECloss (2010) <http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE>
- MAEviz (2014) <http://rcp.ncsa.uiuc.edu/maeviz/about.html>
- Martelli, L., Filippini, M., Bagli, S., Severi, P., & Tomasetti, F. (2007). Seismic risk reduction: a local effects map for territorial and urban planning. The example of the Rimini Territorial plan. *Boll Geofis Teor Appl*, 48(2), 151-162.
- Menoni, S., Pergalani, F., Boni, M.P., Petrini, V. (2002) "Lifelines Earthquake Vulnerability Assessment: a Systemic Approach". *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, Elsevier Science, 22: 1199–1208.
- Meroni, F., Zonno, G., Azzaro, R., D'Amico, S., Tuvè, T., Oliveira, C. S., ... & Varini, E. (2016). The role of the urban system dysfunction in the assessment of seismic risk in the Mt. Etna area (Italy). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(7), 1979-2008.
- Michetti, A.M., E. Esposito, L. Guerrieri, S. Porfido, L. Serva, R. Tatevossian, E. Vittori, F. Audemard, T. Azuma, J. Clague, V. Commerci, A. Gürpınar, McCalpin, B. Mohammadioun, J. Mohammadioun, N.A. Mörner, Y. Ota and E. Roghazin (2007). Environmental Seismic Intensity Scale - ESI 2007, *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, 74, pp. 7-54, Servizio Geologico d'Italia – Dipartimento Difesa del Suolo, APAT, Roma, Italy.
- Mota de Sá F (2009) *Desenvolvimento e implementac,ão do Simulador Sísmico e de Tsunamis do Algarve* (in Portuguese)
- Oliveira, C. S., Ferreira, M. A., & Sá, F. M. (2014). Earthquake risk reduction: from scenario simulators including systemic interdependency to impact indicators. In *Perspectives on European Earthquake Engineering and Seismology* (pp. 309-330). Springer International Publishing.

- Pagani M, Monelli D, Weatherill G, Danciu L, Crowley H, Silva V, Henshaw P, Butler L, Nastasi M, Panzeri L, Simionato M, Vigano D (2014) Development of a framework for real time earthquake loss estimation for Portugal. In: Proceedings of 2nd European conference on earthquake engineering and seismology, Istanbul, Turkey
- Papazachos, B. C., Comninakis, P. E., Karakaisis, G. F., Karakostas, B. G., Papaioannou, C. A., Papazachos, C. B., & Scordilis, E. M. (2000). A catalogue of earthquakes in Greece and surrounding area for the period 550BC-1999. Publ. Geoph. Lab., Univ. of Thessaloniki, 1, 333.
- Papazachos, B. C., Karakostas, V. G., Papazachos, C. B., & Scordilis, E. M. (2000). The geometry of the Wadati–Benioff zone and lithospheric kinematics in the Hellenic arc. *Tectonophysics*, 319(4), 275-300.
- Papazachos, B. C., Papaioannou, C. A., Papazachos, C. B., & Savvaidis, A. S. (1999). Rupture zones in the Aegean region. *Tectonophysics*, 308(1), 205-221.
- Papazachos, C. (1999). An alternative method for a reliable estimation of seismicity with an application in Greece and the surrounding area. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 111-119.
- Papazachos, C., & Nolet, G. (1997). P and S deep velocity structure of the Hellenic area obtained by robust nonlinear inversion of travel times. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B4), 8349-8367.
- Papazachos, V., Papazachos, B., Papazachou, C., & Papazachou, K. (1997). The earthquakes of Greece. Editions Ziti.
- Pelekis, P. C., & Athanasopoulos, G. A. (2013). Seismic microzonation of Chania, Crete (Greece) based on SASW measurements and non-linear site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 145-159.
- Phoon, K.-K., Kulhawy, F.H. (1999). “Characterization of geotechnical variability”. *Canadian Geotechnical Journal*, 36: 612-624.
- Pinto, P.E. (editor) (2007). “Probabilistic Methods for Seismic Assessment of Existing Structures”. LESSLOSS Report No. 2007/06, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia, IUSS Press, ISBN: 978-88-6198-010-5.
- Pitilakis, K., Alexoudi, A., Argyroudis, S., Monge, O., Martin, C. (2006). “Chapter 9: Vulnerability and Risk Assessment of Lifelines”. In *Assessing and Managing Earthquake Risk, Geo-scientific and Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation: developments, tools, techniques*, Eds. X. Goula, C. S. Oliveira, A. Roca, Springer, ISBN 1-4020-3524-1. pp. 185-211.

- Pitilakis, K., Anastasiadis, A., Kakderi, K., Alexoudi, M., Argyroudou, S. (2010). "The Role of Soil and Site Conditions in the Vulnerability and Risk Assessment of Lifelines and Infrastructures. The Case of Thessaloniki (Greece)". 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, San Diego, California, May, 24-29.
- Pitilakis, K., Alexoudi, M., Argyroudou, S., & Anastasiadis, A. (2006). Seismic risk scenarios for an efficient seismic risk management: the case of Thessaloniki (Greece). *Advances in earthquake engineering for urban risk reduction*. Springer, New York, 229-244.
- Porter, K.A. (2004). "A Survey of Bridge Practitioners to Relate Damage to Closure", Report EERL 2004-07, California Institute of Technology, Pasadena, CA.
- QALARM (2014) <http://www.wapmerr.org/qlarm.asp>
- QGIS (2015) <https://www.qgis.org/en/site/forusers/visualchangelog28/index.html>
- QuakeIST User Reference Guide
- RADIUS, Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas Against Seismic Disasters (2000) www.eird.org/eng/revista/No2_2001/pagina21.htm
- Ren, A. Z., & Xie, X. Y. (2004). The simulation of post-earthquake fire-prone area based on GIS. *Journal of fire sciences*, 22(5), 421-439.
- Sá, F. M., Ferreira, M. A., & Oliveira, C. S. (2016). QuakeIST® earthquake scenario simulator using interdependencies. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(7), 2047-2067.
- Sabetta, F., & Pugliese, A. (1996). Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(2), 337-352.
- Sanchez-Lozano J.M., Teruel-Solano J., Soto-Elvira P.L., Garcia-Cascales M.S. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods for the Evaluation of Solar Farms Locations: Case Study in South Eastern Spain, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp. 544-556.
- Sarris, A., Loupasakis, C., Soupios, P., Trigkas, V., & Vallianatos, F. (2010). Earthquake vulnerability and seismic risk assessment of urban areas in high seismic regions: application to Chania City, Crete Island, Greece. *Natural hazards*, 54(2), 395-412.
- Seidel, E., Kreuzer, H., & Harre, W. (1982). A late Oligocene/early Miocene high pressure belt in the external Hellenides. *Geologisches Jahrbuch E*, 23, 165-206.
- SELENA (2010) <http://www.norsar.no/seismology/engineering/SELENA-RISe/>

- Shinozuka, M., M.Q. Feng, H.-K. Kim, T. Uzawa, Ueda, T. (2003b). "Statistical Analysis of Fragility Curves", Technical Report MCEER-03-0002, State University of New York, Buffalo.
- Shinozuka, M., Murachi, Y., Dong, X., Zhou, Y., Orlikowski, M.J. (2003a). "Seismic Performance of Highway Transportation Networks". In Proceedings of the China-US Workshop on Protection of Urban Infrastructure and Public Buildings against Earthquakes and Manmade Disasters, Beijing, China, 21-22 February.
- Stergiou, E., Kiremidjian, A.S. (2006). "Treatment of Uncertainties in Seismic Risk Analysis of Transportation Systems". Technical Report No. 154, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Civil Engineering Department, Stanford University, Stanford, CA.
- Taymaz, T., Jackson, J., & Westaway, R. (1990). Earthquake mechanisms in the Hellenic Trench near Crete. *Geophysical Journal International*, 102(3), 695-731.
- Thomson, S. N., Stöckhert, B., & Brix, M. R. (1999). Miocene high-pressure metamorphic rocks of Crete, Greece: rapid exhumation by buoyant escape. *Geological Society, London, Special Publications*, 154(1), 87-107.
- Tiedemann H (1992) Earthquakes and volcanic eruptions: a handbook on risk assessment. Reinsurance Company, Zurich
- Umemura K, Murao O, Yamazaki F (2000) Development of GIS-based building database for the 1995 Kobe earthquake. 21st Asian conference on remote sensing, Taipei, Taiwan
- UPStrat-MAFA (2012) Urban disaster prevention strategies using macroseismic fields and fault sources (UPStrat-MAFA-EU Project Num. 230301/2011/613486/SUB/A5), DG ECHO Unit A5
- Voulgaris, N., Vassilakis, E., Parcharidis, I., Soukis, K., & Alexopoulos, J. (2003). A GIS based application for seismic risk operational response support. In EGS-AGU-EUG Joint Assembly.
- Wen, Y.K., Ellingwood, B.R., Veneziano, D., Bracci, J. (2003) "Uncertainty Modeling in Earthquake Engineering", MAE Center Project FD-2 Report, Illinois.
- Xu, F., Chen, X., Ren, A., & Lu, X. (2008). Earthquake disaster simulation for an urban area, with GIS, CAD, FEA, and VR integration. *Tsinghua Science & Technology*, 13, 311-316.
- Yamazaki F (1996) Applications of GIS to urban earthquake disaster mitigation. *Theory Appl GIS* 4(1):61–69
- Yamazaki, F., Motomura, H., Hamada, T. (2000). "Damage Assessment of Expressway Networks in Japan based on Seismic Monitoring". Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, Paper No. 0551.

- Youhai, G., Qimin, F., & Jing, J. (2006). A GIS-based earthquake and tsunami emergency command system for seaside cities. *Journal of Ocean University of China (English Edition)*, 5(2), 181-186.
- Zaincenco, A., & Alkaz, V. (2005). Urban seismic risk studies with utilization of GIS. In NATO advanced workshop on “foresight, precaution and risk: preparing for the unexpected”, Chisinau, Republic of Moldova.
- Zentner, I. (2010). “Numerical Computation of Fragility Curves for NPP Equipment”. *Nuclear Engineering and Design*, 240: 1614–1621
- Zohra, H. F., Mahmouda, B., & Luc, D. (2012). Vulnerability assessment of water supply network. *Energy Procedia*, 18, 772-783.

Ελληνική Βιβλιογραφία

- Αλεξούδη, Μ. (2005). Συμβολή στην ανάλυση της σεισμικής τρωτότητας δικτύων κοινής ωφέλειας σε αστικό περιβάλλον. Ανάπτυξη ολοκληρωμένης μεθοδολογίας διαχείρισης της σεισμικής διακινδύνευσης. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
- Δήμας, Δ. (2010). Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Εφαρμογές τους, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πειραιά.
- ΙΤΣΑΚ (2012). Παρουσίαση καταγραφών επιταχυνσιογράφων ΙΤΣΑΚ-ΟΑΣΠ στο νότιο Αιγαίο από το σεισμό 5.3 της 12/09/2012 στη θαλάσσια περιοχή ΝΔ της Κρήτης.
- Καπαγερίδης, Ι. (2006). Εισαγωγή στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Σημειώσεις Θεωρίας του Τμήματος Γεωτεχνολογίας και Περιβάλλοντος του ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη.
- Κουτσουπάκης, Ι. (2013). Συμβολή στη μελέτη των επιφανειακών σχηματισμών με τη μέθοδο του μικροθορύβου – SPAC, στο πολεοδομικό συγκρότημα της πόλης των Χανίων. Διπλωματική Εργασία, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
- Μουντράκης Δ. (1985). Γεωλογία της Ελλάδος, Θεσσαλονίκη, 207.
- Μουντράκης Δ. και συν. (2004). Νεοτεκτονική-Σεισμοτεκτονική Έρευνα – Μελέτη Της Ευρύτερης Περιοχής της Βόρειας Ζώνης Του Νομού Χανίων Κρήτης.

- ΟΑΣΠ (2003). ΝΕΑΚ 2000 (Νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000). Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Αθήνα, Available at: <http://www.oasp.gr/node/8>, [Accessed 26 April 2014].
- ΟΑΣΠ (1983). Περί σεισμών, Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, Αθήνα, Available at: <http://www.oasp.gr/node/115>, [Accessed 26 April 2014].
- Παπαδόπουλος Η. (2013). Πειραματική και θεωρητική μελέτη της τοπικής εδαφικής ενίσχυσης με τη χρήση δεδομένων μικροθορύβου και γεωφυσικών μετρήσεων πεδίου, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ.
- Παπαζάχος, Β.Κ. και Παπαζάχου Κ.Β. (2003). Σεισμοί της Ελλάδας, 3η Έκδοση, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη, σελ. 286.
- Παπαζάχος, Β.Κ., Καρακαϊσής, Γ.Φ. και Χατζηδημητρίου, Π.Μ. (2005). Εισαγωγή στη Σεισμολογία, Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ.
- Σπυράκος Κ. και Κουτρομάνος Ι. (2010). Αντισεισμικές κατασκευές: στοιχεία τεχνικής σεισμολογίας και σεισμικής μηχανικής. ΕΜΠ, Αθήνα
- Τσελέντης Α. (1997). Σύγχρονη Σεισμολογία, Τόμος Β', Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- Τσουχλαράκη Α., και Αχιλλέως Γ. (2010). Μαθαίνοντας τα GIS στην πράξη

Ηλεκτρονική Βιβλιογραφία

- <http://ces.iisc.ernet.in>
- <http://earthquake-now.blogspot.gr>
- <http://www.gembc.ca>
- <http://www.geodata.gov.gr>
- <http://www.geodifhs.com>
- <http://www.northaugusta.net>
- <http://www.oasp.gr>