

Ο ρόλος των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην αποτίμηση της τρωτότητας των δικτύων ύδρευσης. Διερεύνηση στην Λευκάδα.

The influence of site-effects in the seismic assessment of water systems.
The case of Lefkas.

Μ. ΑΛΕΞΟΥΔΗ Δρ. Πολιτικός Μηχανικός Α.Π.Θ, MSc

Κ. ΚΑΚΔΕΡΗ Πολιτικός Μηχανικός, MSc, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ

Κ. ΠΙΤΙΛΑΚΗΣ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην εργασία διερευνάται η επιρροή των τοπικών εδαφικών συνθηκών στην τρωτότητα των δικτύων ύδρευσης. Παράλληλα εξετάζεται το ζήτημα της επιλογής των κατάλληλων σχέσεων τρωτότητας με βάση τη διεθνή βιβλιογραφία για τα διαθέσιμα Ελληνικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή των σχέσεων για την περίπτωση της εδαφικής ταλάντωσης και για τις μόνιμες παραμορφώσεις στο δίκτυο ύδρευσης της Λευκάδας συγκρίθηκαν τόσο μεταξύ τους όσο και με τις καταγεγραμμένες αστοχίες από τον αντίστοιχο σεισμό. Οι καμπύλες τρωτότητας που δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα τόσο χωρικά όσο και σε απόλυτο αριθμό προτείνονται να χρησιμοποιηθούν για την αποτίμηση της τρωτότητας δικτύων ύδρευσης στην Ελλάδα.

ABSTRACT: The paper discusses the influence of site-effects on the seismic vulnerability of water networks. It also presents the selection of the appropriate fragility curves that may better represent the Greek construction practice. Existing curves from the literature were validated for the water system of Lefkas after the strong earthquake of 2003 comparing the recorded with the estimated damages. The fragility curves that gave the best results for wave propagation and permanent deformation may be proposed for the vulnerability assessment of water systems in Greece.

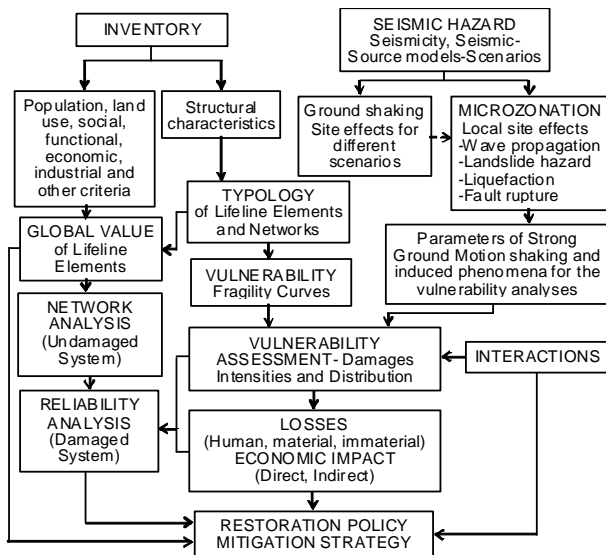
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας των δικτύων κοινής ωφέλειας έχει ιδιαίτερη σημασία σε αστικά συγκροτήματα και τουριστικά κέντρα λόγω των σημαντικών οικονομικών και κοινωνικών επιπτώσεων που μπορεί να έχει μια πιθανή αστοχία τους κατά την διάρκεια ενός ισχυρού σεισμού. Είναι επίσης γνωστό ότι οι τοπικές εδαφικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο στην απόκριση των εδαφικών σχηματισμών και συνακόλουθα και των υπόγειων δικτύων αγωγών. Η διερεύνηση της επιρροής τους στην τρωτότητα των δικτύων ύδρευσης καθώς και η επιλογή της κατάλληλης σχέσης τρωτότητας που ταιριάζει με τα ελληνικά δεδομένα και κατασκευαστική πρακτική, αποτελούν βασικούς στόχους της συγκεκριμένης έρευνας.

Η γενική μεθοδολογία εκτίμησης της τρωτότητας για τα στοιχεία των Δικτύων Κοινής Ωφέλειας (Δ.Κ.Ω) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 (Pitilakis et al, 2004). Η εφαρμογή εντοπίζεται στο δίκτυο ύδρευσης της Λευκάδας, η προτεινόμενη όμως μεθοδολογία είναι γενικότερη.

Αρχικά απαιτείται η συμπλήρωση ενός καταλόγου απογραφής που περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικά με τα ιδιαίτερα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του δικτύου (π.χ γεωμετρία, υλικό, ηλικία κ.τ.λ). Στοιχεία με παρόμοια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε παρόμοιες κατηγορίες.

Το είδος και η ένταση των σεισμικών δράσεων που θα επιβληθεί στα δίκτυα μπορεί να προσδιοριστεί βάσει σεναρίων σεισμικής επικινδυνότητας (αιτιοκρατικά ή πιθανοτικά) ή μέσω συστηματικών μελετών της εδαφικής απόκρισης (Pitilakis K, 2004).



Σχήμα 1. Διάγραμμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποτίμησης της τρωτότητας δικτύων (Pitilakis K, 2004).

Figure 1. General layout of the proposed methodology

Η αποτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς των δικτύων περιγράφεται μέσω σχέσεων ή καμπυλών τρωτότητας. Οι καμπύλες τρωτότητας συνδέουν τα μεγέθη της ισχυρής εδαφικής κίνησης (PGA, PGV, PGD) με την πιθανότητα υπέρβασης ενός ορισμένου επιπέδου αστοχίας. Για την περίπτωση των αγωγών οι σεισμικές επιπλοήσεις συσχετίζονται με το ρυθμό επιδιορθώσεων/km (RR/km). Στόχος των αναλύσεων τρωτότητας είναι η εκτίμηση του αριθμού, του είδους και της χωρικής κατανομής των αστοχιών στο δίκτυο.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας τρεις σχέσεις τρωτότητας αποτιμήθηκαν για την περίπτωση της εδαφικής ταλάντωσης και των μόνιμων μετακινήσεων (HAZUS 2004; Eidinger J & Avila E, 1999; ALA, 2001a,b). Οι παραπάνω σχέσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Το HAZUS 2004 για την περίπτωση της εδαφικής ταλάντωσης χρησιμοποιεί την σχέση των O' Rourke & Ayala (1993) που προέκυψε από καταγραφές τεσσάρων σεισμών στις Η.Π.Α και δύο στο Μεξικό. Η συγκεκριμένη σχέση ελέγχθηκε και κατά τον σεισμό του Northridge, 1994. Για την περίπτωση των μόνιμων παραμορφώσεων (καθιζήσεις, συνιζήσεις ή πλευρικές εξαπλώσεις λόγω ρευστοποίησης) το HAZUS 2004 προτείνει την σχέση των Honegger & Eguchi (1992). Οι σχέσεις των Eidinger, J. & Avila, E (1999) περιλαμβάνουν πληροφορίες αστοχιών για

περισσότερα από 5.310km αγωγών κυρίως από το σεισμό της Loma Prieta, 1989, καθώς και πληροφορίες από άλλους έξι σεισμούς. Τα ποσοστά βλαβών είναι αντιπροσωπευτικά για σεισμούς με διάρκεια ισχυρής δόνησης που κυμαίνεται από 10 έως 20 sec. Με εξαίρεση τους αγωγούς από χυτοσίδηρο, όλες οι απαιτούμενες πληροφορίες είναι περιορισμένες. Οι σχέσεις τρωτότητας που προτείνονται από την American Lifeline Alliance (ALA, 2001a,b) για την περίπτωση της εδαφικής ταλάντωσης και των μόνιμων παραμορφώσεων βασίζονται σε δεδομένα αστοχιών, από τα οποία το 38% αναφέρεται σε χυτοσιδηρούς αγωγούς.

Πίνακας 1. Οι σχέσεις τρωτότητας αγωγών ύδρευσης για την εδαφική ταλάντωση και τις μόνιμες παραμορφώσεις.

Table 1. Fragility curves for waterpipes for wave propagation and permanent deformation.

ΕΔΑΦΙΚΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗ		
Εμπειρικές σχέσεις	Παράγοντες εξάρτησης	Βιβλιογραφική αναφορά
$R.R/km = K * 10^{-4} * PGV^{2.25}$	RGV (cm/sec), K: συντελεστής που σχετίζεται με το υλικό του αγωγού (εύκαμπτος, άκαμπτος)	O Rourke & Ayala (1993)
$R.R/km = K_1 * 1.512 * PGV^{1.98}$	RGV (cm/sec), K ₁ : συντελεστής που σχετίζεται με το υλικό του αγωγού, τον τύπο σύνδεσης, το έδαφος και τη διάμετρο.	Eidinger, Avila E (1999)
$R.R/km = K_1 * 0.241 * PGV$	RGV (cm/sec), K ₁ : συντελεστής που σχετίζεται με το υλικό του αγωγού, τον τύπο σύνδεσης, το έδαφος και τη διάμετρο	ALA (2001)

ΜΟΝΙΜΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ		
Εμπειρικές σχέσεις	Παράγοντες εξάρτησης	Βιβλιογραφική αναφορά
$R.R/km = K * 7.821 * PGD^{0.56}$	RGV (cm/sec), K: συντελεστής που σχετίζεται με το υλικό του αγωγού	Honegger & Eguchi (1992)
$R.R/km = K_2 * 23.674 * PGD^{0.53}$	RGV (cm/sec), K ₂ : συντελεστής που σχετίζεται με το υλικό του αγωγού και το είδος σύνδεσης.	Eidinger, Avila E (1999)
$R.R/km = K_2 * 11.223 * PGD^{0.319}$	RGV (cm/sec), K ₂ : συντελεστής που σχετίζεται με το υλικό του αγωγού και το είδος σύνδεσης.	ALA (2001 a,b)

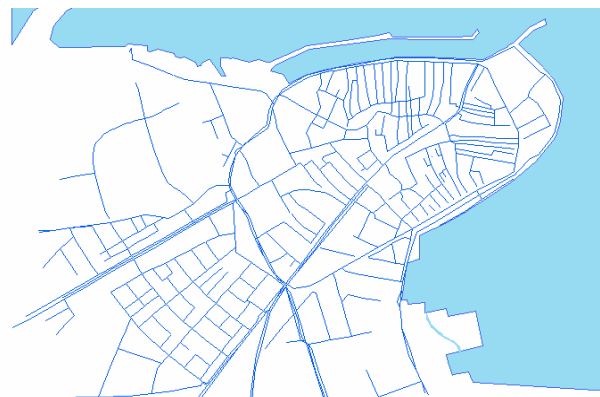
Η αποτίμηση του είδους της αστοχίας (πλήρη θραύση ή απλή διαρροή) στην περίπτωση υπόγειων αγωγών είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Πολλοί ερευνητές πρότειναν διάφορους ορισμούς για την εκτίμηση της αστοχίας (ATC-13; ATC-25; Ballantyne et al, 1990; Rashidov T et al, 2000) χωρίς να υπάρχει μέχρι σήμερα μια γενικώς αποδεκτή θέση. Το HAZUS 2004, προτείνει σε περιοχές όπου το κυρίαρχο σεισμικό φορτίο είναι η εδαφική ταλάντωση, η αναλογία μεταξύ θραύσεων και διαρροών να είναι 20% και 80% αντίστοιχα, ενώ στην περίπτωση μόνιμων εδαφικών μετακινήσεων τα ποσοστά αντιστρέφονται. Η συγκεκριμένη προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση του είδους της αστοχίας των αγωγών κατά τον πρόσφατο ισχυρό σεισμό στην Λευκάδα.

Είναι αναγκαίο να τονιστεί ότι η επιλογή της κατάλληλης καμπύλης τρωτότητας της διεθνούς βιβλιογραφίας και του είδους της αστοχίας είναι ιδιαίτερα σημαντική κυρίως για τον Ευρωπαϊκό και τον Ελλαδικό χώρο καθώς δεν υπάρχουν συστηματικά καταγεγραμμένες αστοχίες Δ.Κ.Ω. Η συγκεκριμένη προσπάθεια αποτίμησης των σχέσεων τρωτότητας στον Ελλαδικό χώρο είναι ίσως η πρώτη σχετική ερευνητική προσπάθεια.

2. ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ

Το δίκτυο ύδρευσης της πόλης της Λευκάδας (Σχήμα 2) κατασκευάστηκε το 1979 και έχει σχεδιαστεί για ημερήσια κατανάλωση νερού ίση με 5400m^3 . Ως πηγή υδροληψίας για το δίκτυο εντός της πόλης θεωρείται η παροχή νερού από την δεξαμενή οπλισμένου σκυροδέματος χωρητικότητας 1000m^3 . Η υδροληψία του εξωτερικού υδραγωγείου γίνεται από τις πηγές Μοναστηρίου του Νομού Αιτωλοακαρνανίας (ποταμό Λούρο). Το δίκτυο είναι βρογχωτό εκτός των ακτινωτών αγωγών που εξέρχονται από την πόλη. Οι σωλήνες είναι κυρίως από PVC (86%) διαφορετικών διαμέτρων (πίεσης 10atm) με αντίστοιχα ειδικά τεμάχια κόμβων. Οι διακλαδώσεις τους διαμορφώθηκαν με χυτοσιδερένια φλατζωτά τεμάχια και εξαρτήματα. Σε μικρό ποσοστό στο δίκτυο υπάρχουν αμιαντοσιμεντοσωλήνες με ζιμπώ (14%) καθώς αποδείχθηκαν ακατάλληλοι για την πόλη λόγω του υψηλού υπόγειου ορίζοντα και της διάβρωσης που μπορούν να υποστούν. Σήμερα η πίεση των αγωγών διανομής μέσα στην πόλη της Λευκάδας είναι γύρω στα $3.5\text{-}4.0\text{atm}$.

Μετά από την συλλογή στοιχείων για τους αγωγούς του δικτύου ύδρευσης από την μελέτη εφαρμογής του, ψηφιοποιήθηκαν σε GIS, περίπου 30km του βασικού δικτύου και δημιουργήθηκε η βάση δεδομένων που περιέχει στοιχεία σχετικά με τη διάμετρο, το υλικό, το είδος σύνδεσης, το βάθος και τη χρονολογία τοποθέτησης των αγωγών.



Σχήμα 2 Ψηφιοποιημένο δίκτυο ύδρευσης του ιστορικού κέντρου (Λευκάδα)

Figure 2. Digitized potable water system of historical center of Lefkas

3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΙΣΧΥΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

3.1 Γεωλογία

Η Λευκάδα ανήκει γεωλογικά στη Ζώνη των Παξών (δυτικά) και στην Ιόνια ζώνη (ανατολικά). Επιφανειακά στη ζώνη των Παξών διαπιστώνονται μειοκαινικοί σχηματισμοί συνήθως μαργαϊκοί ή φαμμούχοι με εναλλαγές λατυποπαγών ασβεστολίθων, ενώ στη ζώνη των Ιονίων αποθέσεις μολασικών ιζημάτων μεγάλου πάχους λόγω επίκλυσης της θάλασσας (κυρίως μάργες και λιγότερο φαμμίτες με ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστόλιθων και λατυποκροκαλοπαγών) που επικάθονται σε φλύσχη.

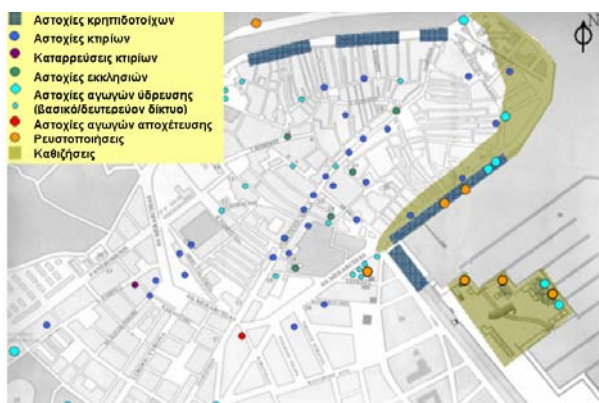
Η πόλη της Λευκάδας δομείται από σύγχρονους παράκτιους αμμώδεις σχηματισμούς και λιμνοθαλάσσιες ιλυώδεις αποθέσεις που επικάθονται σε μαργαϊκό υπόβαθρο. Το βάθος του βραχώδους υποβάθρου στο Νοσοκομείο της Λευκάδας προέκυψε στα 60m μετά από αναλύσεις Η/Υ των μετασεισμών (Pitilakis et al, 2005) του κύριου σεισμού της Λευκάδας ($M_w=6.4$, 14-08-2005) όπως επίσης και από διαθέσιμες γεωτεχνικές πληροφορίες (ΟΑΣΠ, 1996). Η

επιφανειακή εμφάνιση του βράχου προσδιορίστηκε βάσει γεωλογικών χαρτών της ευρύτερης περιοχής.

3.2 Σεισμικότητα

Η Λευκάδα βρίσκεται σε μια από τις πιο σεισμογενείς περιοχές της Ελλάδας (περιοχή σεισμικότητας III, $\alpha=0.30g$) σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000. Το μέγιστο αναμενόμενο μέγεθος σεισμού στην περιοχή είναι $M_{max}=7.1$ (ζώνη 6, Παραιοαννου & Παπαζαχος, 2000).

Στις 14/08/2003, έγινε σεισμός, $M_w=6.4$, μικρού βάθους ($h=10km$) στο σεισμογόνο χώρο κοντά στην πόλη της Λευκάδας. Ο συγκεκριμένος σεισμός προκάλεσε σημαντικές αστοχίες στα δίκτυα και στις υποδομές ενώ σχετικά μικρότερες ήταν οι αστοχίες που προκλήθηκαν στα κτίρια. Στο Σχήμα 3, εντοπίζονται οι θέσεις των αστοχιών στα δίκτυα ύδρευσης/ αποχέτευσης καθώς και οι εδαφικές αστοχίες που καταγράφησαν.



Σχήμα 3 Κατανομή αστοχιών στο δίκτυο ύδρευσης/ αποχέτευσης στο ιστορικό κέντρο της Λευκάδας

Figure 3 Damage distribution in historical center of Lefkas

4. ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΜΕΤΑ ΤΟ ΣΕΙΣΜΟ ΤΟΥ 2003

Ο χαρακτηρισμός και η γεωτεχνική ταξινόμηση των εδαφικών σχηματισμών της Λευκάδας βασίστηκε σε γεωτεχνικές τομές που προέκυψαν από την ανάλυση των διαθέσιμων γεωτρήσεων (17), δοκιμών SPT, δοκιμών Cross-Hole καθώς και τις λίγες δοκιμές στην στήλη συντονισμού που είχαν πραγματοποιηθεί από το ΑΠΘ στα πλαίσια παλαιότερης ερευνητικής προσπάθειας

(ΟΑΣΠ, 1996). Οι εδαφικοί σχηματισμοί του ιστορικού κέντρου κατατάσσονται σύμφωνα με τον ΕΑΚ 2000 στην κατηγορία Γ, εκτός από την περιοχή της Μαρίνας και την παραλιακή ζώνη όπου εμφανίζονται χαλαρές λεπτόκοκκες, αμμοϊλυώδεις στρώσεις με μεγάλη επικινδυνότητα σε ρευστοποίηση (κατηγορία Χ). Επίσης, σε όλο το ιστορικό κέντρο της Λευκάδας, η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα βρίσκεται σε βάθος 1.0-2.0m.

Κατά την διάρκεια του σεισμού της Λευκάδας παρουσιάστηκαν τοπικά φαινόμενα ρευστοποίησης, σημαντικές καθιζήσεις και πλευρικές εξαπλώσεις κυρίως στην παραλιακή ζώνη και στην περιοχή της Μαρίνας (Πίνακας 2) της Λευκάδας.

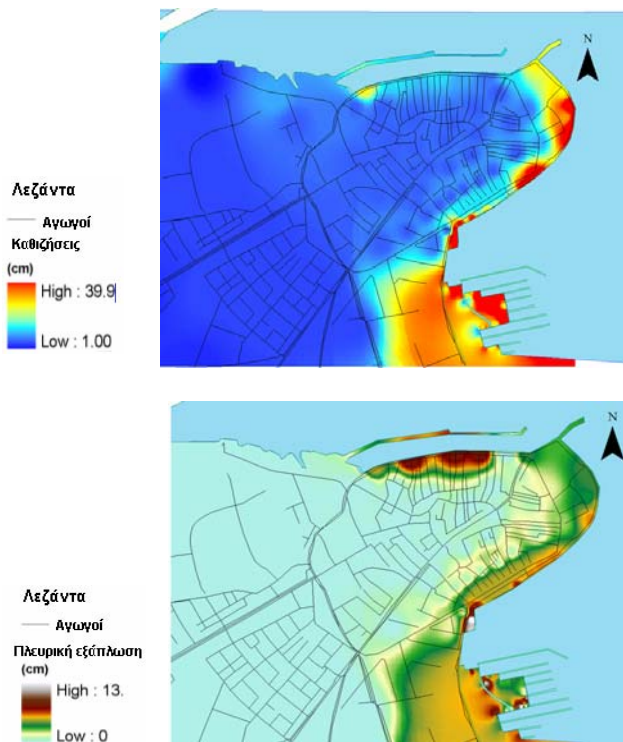
Πίνακας 2 Μόνιμες παραμορφώσεις λόγω του σεισμού της Λευκάδας
Table 2 Permanent deformation of soil as a result of Lefkas earthquake

Περιοχές	Καθιζήσεις (cm)	Πλευρικές εξαπλώσεις (cm)
Ιστορικό κέντρο	2-2.5	-
Λιμάνι (επί της Σικελιανού)	5-10	3-8
Λιμάνι (επί της Γκολέμη)	10-20	8-12
Μαρίνα	20-35	4-12

Οι απόλυτες τιμές και η χωρική κατανομή των καθιζήσεων και των πλευρικών εξαπλώσεων στο ιστορικό κέντρο της Λευκάδας όπως μετρήθηκαν επιτόπου (Ομάδα: Μ. Αλεξούδη, Σ. Αργυρούδης, 2003) παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Γενικά όλο το ιστορικό κέντρο της Λευκάδας παρουσίασε ομοίμορφη καθίζηση της τάξεως αρκετών εκατοστών του μέτρου .

5. ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΥΔΡΕΥΣΗΣ

Μολονότι το μήκος του βασικού δικτύου ύδρευσης της πόλης της Λευκάδας και συγκεκριμένα του «ιστορικού κέντρου» είναι αρκετά μικρό, ωστόσο παρατηρήθηκαν αρκετές αστοχίες (Σχήμα 5, Πίνακας 3) τόσο λόγω της εδαφικής ταλάντωσης (>4 αστοχίες) όσο και λόγω των μόνιμων παραμορφώσεων (συνολικά 7 αστοχίες: 4 στο ιστορικό κέντρο, 3 στην «Γύρα»).

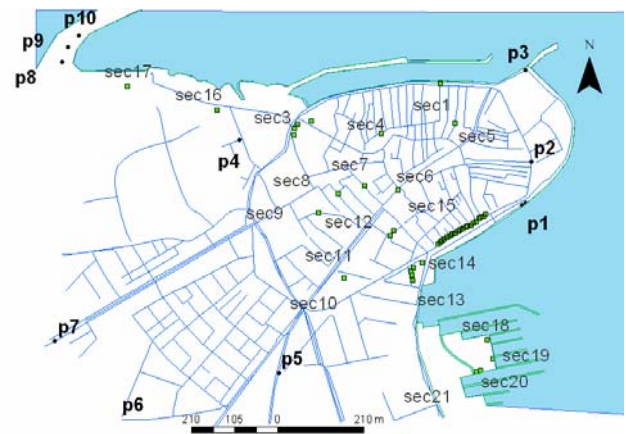


Σχήμα 4 Χάρτης παρατηρηθεισών καθιζήσεων και πλευρικών εξαπλώσεων στο ιστορικό κέντρο της Λευκάδας κατά το σεισμό του 2003
Figure 4 Observed settlement and lateral spreading maps in historical center of Lefkas as a result of Lefkas earthquake.

Στα πλαίσια της παρούσας έρευνας καταρτίστηκε βάση δεδομένων αστοχιών τόσο για το βασικό όσο και στο δευτερεύον δίκτυο ύδρευσης (συνδέσεις με τους καταναλωτές). Ενδεικτικά παρουσιάζεται η βάση δεδομένων αστοχιών για το βασικό δίκτυο ύδρευσης (Πίνακας 4). Το σύμβολο (?) χρησιμοποιήθηκε στα σημεία στα οποία υπάρχουν αμφιβολίες σχετικά με το είδος αστοχίας.

Πίνακας 3 Αποδεδειγμένες αστοχίες που καταγράφηκαν στο δίκτυο ύδρευσης της Λευκάδας
Table 3 Recorded water failures as result of Lefkas earthquake

Αριθμός αστοχιών	Γεωγραφική θέση	Χρόνος αποκατάστασης
11 αστοχίες (2 στον ίδιο αγωγό)	Βασικό δίκτυο ύδρευσης της Λευκάδας	Σύνολο 1-3 h (3 άτομα)
> 20 αστοχίες	Συνδέσεις καταναλωτών	Μέχρι 1 μήνα
4 αστοχίες	Μαρίνα – Συνδέσεις με τους κρουούς	> 1 μήνα



Σχήμα 5 Καταγεγραμμένες αστοχίες του βασικού και του δευτερεύοντος δικτύου ύδρευσης (Σύμβολα: p- βασικό δίκτυο, sec-συνδέσεις καταναλωτών)

Figure 5 Geographic distribution of water failures in historical center of Lefkas (p: primary network, sec: secondary water network)

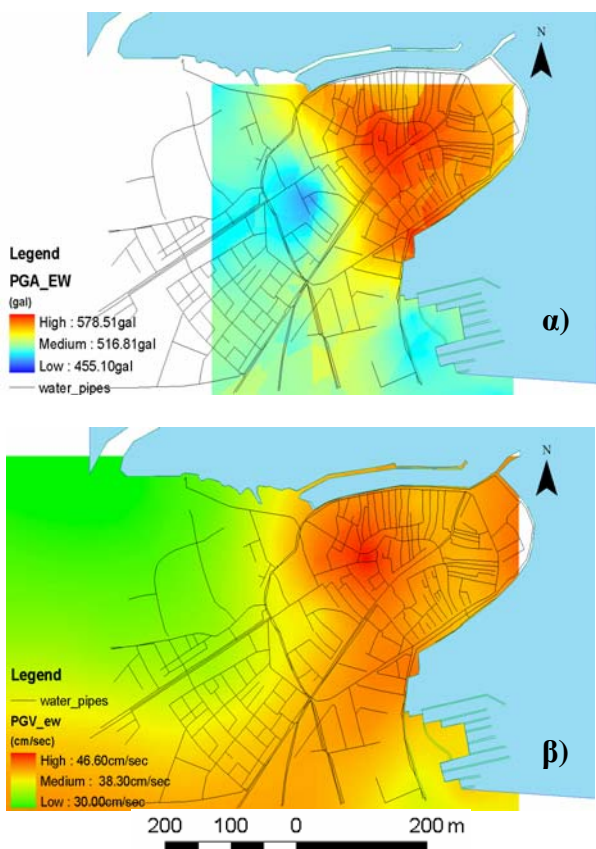
Πίνακας 4 Βάση δεδομένων αστοχιών των αγωγών του βασικού δικτύου ύδρευσης
Table 4 Database of water failures

Αστο-χίες	Διάμετροι (mm)	Υλικό	Βάθος (m)	Αιτία αστοχίας	Είδος Αστοχίας
P1	Φ110	PVC	1.0	Καθίζηση	Σύνδεση
P2	Φ63	PVC	0.50	Καθίζηση	Σύνδεση?
P3	Φ500 (Αγ. Γεώργ)	Αμιαντο-τσιμέντο	1.0	Καθίζηση	Κορμός – μετά το σεισμό
P4	Φ110	PVC	1.5-2.0	Εδαφική Ταλάντωση	Αστοχία παράλληλα με τον κορμό
P5	Φ355	PVC	1	Εδαφική Ταλάντωση	Αστοχία σύνδεσης αγωγού – φρεατίου
P6	Φ110	PVC	1	Εδαφική Ταλάντωση	Αστοχία κάθετα στον κορμό
P7	Φ225	PVC	1	Εδαφική Ταλάντωση	Αστοχία παράλληλα με τον κορμό, μικρή σχισμή
P8	Φ125	Χυτοσίδηρος	1.5-2.0	Καθίζηση	Αστοχία παράλληλα με τον κορμό
P9	Φ125	Χυτοσίδηρος	1.5-2.0	Καθίζηση	Αστοχία παράλληλα με τον κορμό
P10	Φ80	Αμιαντο-τσιμέντο	1.5-2.0	Καθίζηση	Αστοχία παράλληλα με τον κορμό

6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΙΣΧΥΡΗΣ ΕΔΑΦΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΕΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΛΕΥΚΑΔΑΣ (2003).

Ισοδύναμες γραμμικές μονοδιάστατες αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν σε 32 απλοποιημένα εδαφικά προφίλ με τα επιταχυνσιογραφήματα του σεισμού της Λευκάδας που καταγράφηκαν στο Νοσοκομείο (μετά από σχετική αποσυσχέτιση μεταξύ της επιφάνειας και του βραχώδους υποβάθρου). Τα αποτελέσματα σε επίπεδο μέγιστων εδαφικών επιταχύνσεων κυμαίνονται μεταξύ 400 - 630 gal και 400 - 560 gal για την EW και NS συνιστώσα του βασικού σεισμού ενώ για τις μέγιστες εδαφικές ταχύτητες κυμαίνονται μεταξύ 30 - 46.60 cm/sec και 24.5 -32.5 cm/sec.

Στο Σχήμα 6α, β (Pitilakis et al, 2005) παρουσιάζεται η χωρική κατανομή των βασικών μεγεθών της ισχυρής εδαφικής κίνησης.



Σχήμα 6 Χωρική κατανομή της PGA_{EW} (gal) και PGV_{EW} (cm/sec) για το σεισμό Λευκάδας (14-08-2003) – (Pitilakis et al, 2005)
Figure 6 Spatial distribution of PGA_{EW} (gal) PGV_{EW} (cm/sec) for Lefkas earthquake (14-08-2003)

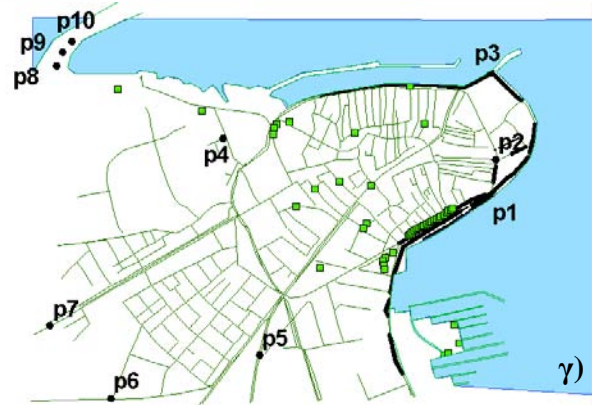
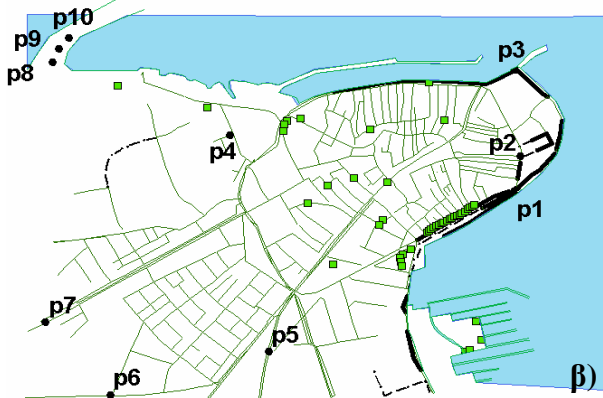
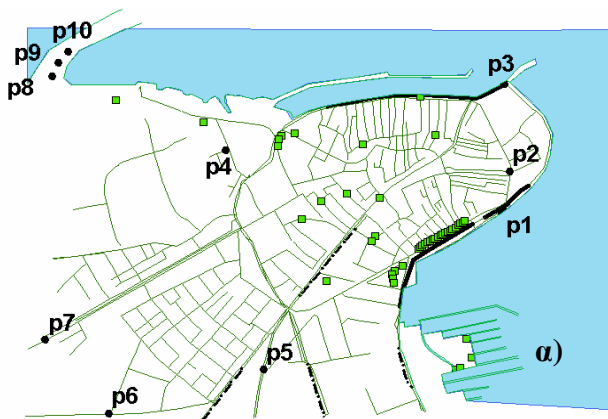
7. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

Εφαρμόζοντας τις σχέσεις τρωτότητας για την εδαφική ταλάντωση (Σχήματα 6α, β) διαπιστώνονται ιδιαίτερα σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των διαφόρων σχέσεων τρωτότητας. Συγκεκριμένα, οι σχέσεις του HAZUS 2004 προσεγγίζουν με σημαντική ακρίβεια τον πραγματικό αριθμό αστοχιών ενώ τόσο η σχέση των Eidinger, Avila E (1999) όσο και η σχέση της ALA (2001a,b) υπολογίζουν μεγάλο αριθμό αστοχιών. Αυτό οφείλεται κυρίως στην υπερεκτίμηση του αριθμού των αστοχιών λόγω των μόνιμων μετακινήσεων (Πίνακας 5). Η χωρική κατανομή των εκτιμώμενων αστοχιών περιγράφεται γραμμικά ενώ η καταγεγραμμένη αστοχία προσδιορίζεται σημειακά (Σχήμα 7).

Πίνακας 5 Σύγκριση των αστοχιών που εκτιμήθηκαν και των καταγεγραμμένων στο δίκτυο ύδρευσης

Πίνακας 5 Comparison between calculated and recorded failures for water system of Lefkas

Σχέσεις Τρωτότητας	Εδαφική Ταλάντωση PGV_{ew} 30 - 46.60 cm.sec		Μόνιμες μετακινήσεις $PGV = 1.0 - 40.42$ cm		Συνδυασμός RGV RGD	
	R.R / km	Αστοχίες	R.R / km	Αστοχίες	R.R / km	Αστοχίες
O'Rourke & Ayala (1993) & Eguchi (1992) HAZUS 2004	R.R / km = 0.137	4 επισκευές 3 διαρροές, 1 θραύση	R.R / km = 0.137	4 επισκευές 1 διαρροή, 3 θραύσεις	R.R / km = 0.206	6 επισκευές 4 θραύσεις, 2 διαρροές
	Eddinger & Avila (1999)	R.R / km = 0.103	3 επισκευές 2 διαρροές, 1 θραύση	R.R / km = 0.893	26 επισκευές 5 διαρροές, 21 θραύσεις	R.R / km = 0.859
ALA (2001)	R.R / km = 0.034	1 επισκευή 1 διαρροή, 0 θραύσεις	R.R / km = 0.756	22 επισκευές 5 διαρροές, 18 θραύσεις	R.R / km = 0.721	21 επισκευές 3 διαρροές, 18 θραύσεις
Καταγεγραμμένες	R.R / km = 0.137	4 επισκευές	R.R / km = 0.137	4 επισκευές		8 επισκευές



Σχήμα 7 Αποτίμηση της τρωτότητας βάσει των σχέσεων τρωτότητας: α) των O'Rourke & Ayala (1993) και Honnegger & Eguchi (1992), β) των Eidinger & Avila E (1999), γ) της ALA (2001a,b). Διακρίνονται με έντονο χρώμα οι αγωγοί οι οποίο αναμένονται να αστοχήσουν. Figure 7 Vulnerability assessment of water system failure using: α) O'Rourke & Ayala (1993) & Honnegger & Eguchi (1992), β) Eidinger & Avila E (1999), γ) ALA (2001a,b) relations. The failures of water pipes are illustrated with bold.

8. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΑΛΥΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΓΕΓΡΑΜΕΝΩΝ ΑΣΤΟΧΙΩΝ

Συγκρίνοντας χωρικά τις αστοχίες που εκτιμήθηκαν με αυτές που καταγράφηκαν, παρατηρείται ότι η αστοχία που θα μπορούσε να προβλεφθεί βάσει όλων των σχέσεων τρωτότητας για την εδαφική ταλάντωση είναι η P3. Οι αστοχίες στις θέσεις P4, P6, P7 δεν ήταν δυνατόν να προβλεφθούν καθότι υπάρχουν σημαντικές αβεβαιότητες στην κατάσταση των αγωγών και στην εκτίμηση των μεγεθών της ισχυρής εδαφικής κίνησης που αναπτύχθηκαν (χρήση μονοδιάστατων αναλύσεων, διαφορετικές μέθοδοι παρεμβολής κ.τ.λ). Για την περίπτωση των μόνιμων μετακινήσεων, οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν εντοπίζουν με αρκετή ακρίβεια τις περιοχές που αναμένεται να εκδηλωθούν οι αστοχίες. Συγκεκριμένα κατά την εφαρμογή της σχέσης του Honnegger & Eguchi (1992) προσδιορίστηκαν οι αστοχίες P1 (διπλή) και η P3 ενώ εφαρμόζοντας τις άλλες δύο σχέσεις των Eidinger & Avila E (1999) και ALA, (2001) προσδιορίζεται και η αστοχία P2. Παρόλο που δεν ήταν δυνατόν να προβλεφθεί η αστοχία P5, η σύνδεση φρεατίου (δύσκαμπτου στοιχείου) με αγωγό (κυρίως PVC - ιδιαίτερα εύκαμπτος) είναι ένα ιδιαίτερα ευαίσθητο σημείο.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι σχέσεις που προτείνονται από το HAZUS 2004 δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα συγκρινόμενες με άλλες σχέσεις της διεθνούς βιβλιογραφίας. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και η μελέτη τρωτότητας για το δίκτυο ύδρευσης της Duzce (Τουρκία) για το σεισμό της Duzce (Pitilakis et al, 2005) παρόλη τη διαφορετική δομή του δικτύου (δεντροειδές), την ηλικία (50-70 χρόνια) και τα κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά σε σχέση με το δίκτυο της Λευκάδας. Συμπερασματικά, προτείνεται να χρησιμοποιούνται προς το παρόν οι σχέσεις του HAZUS 2004 για την εδαφική ταλάντωση (O'Rourke & Ayala, 1993) και τις μόνιμες μετακινήσεις (Honneger & Eguchi, 1992) για την αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας αγωγών στον Ελλαδικό χώρο. Ωστόσο είναι αναγκαία περαιτέρω συλλογή δεδομένων αστοχιών από δίκτυα στον Ελλαδικό χώρο και στον Ευρωπαϊκό χώρο προκειμένου να δημιουργηθούν νέες σχέσεις τρωτότητας που ανταποκρίνονται καλύτερα

στην Ελληνική και Ευρωπαϊκή πρακτική και σεισμικό-γεωτεχνικό περιβάλλον.

10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

American Lifelines Alliance. (2001a,b), "Seismic Fragility Formulations for Water Systems" Part 1– Guidelines. ASCE-FEMA, 104 pp., Part 2 – Appendices. ASCE-FEMA, 239 pp.

ATC-13-(1985), "Earthquake Damage Evaluation Data for California", Redwood City, California.

ATC-25 (1991), "Seismic Vulnerability and Impact of Disruption on Conterminous United States", Redwood City, California.

Ballantyne, D.B., Berg, E., Kennedy, J., Reneau, R., & Wu, D. (1990), "Earthquake loss estimation modeling for the Seattle water system" Report to US Geological Survey under Grant 14-08-0001-G1526, Technical Report, K/J/C, Federal Way, WA

Eidinger J, Avila E (1999) "Guidelines for the seismic upgrade of Water Transmission Facilities" ASCE, TCLEE, Monograph No. 15.

HAZUS 2004, "Earthquake Loss Estimation Methodology Federal Emergency Management Agency" Washington D.C. Chapter 8.

Honegger, D. G., R.T. Eguchi (1992), "Determination of the Relative Vulnerabilities to Seismic Damage for San Diego County Water Authority (SDCWA) Water Transmission Pipelines".

O'Rourke M, Ayala G. (1993), "Pipeline Damage due to Wave Propagation". Journal Geotech. Engineering, ASCE, Vol. 119 (No.9).

ΟΑΣΠ (1996), "Μελέτη της επίδρασης των τοπικών εδαφικών συνθηκών, της γεωμορφολογίας και της δυναμικής αλληλεπίδρασης εδάφους-θεμελίωσης-ανωδομής στις ενόργανες καταγραφές του εθνικού δικτύου επιταχυνσιογράφων", Τεχνική έκθεση ερευνητικού προγράμματος, Επιστ. υπεύθυνος Κ. Πιπλάκης, Εργαστήριο Εδαφομηχανικής και Θεμελίωσεων ΑΠΘ & ΙΤΣΑΚ (1992-1996).

Papaioannou Ch. & Papazachos V (2000), "Time- Independent & Time- Dependent Seismic Hazard in Greece based on Seismogenic Sources". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 90, 1, pp. 22- 33.

Pitilakis, K (2004), "Recent Advances in Earthquake Geotechnical Engineering and Microzonation". Chapter 5: Site Effects, Editor A. Ansal, Kluwer Academic Publishers

Pitilakis K., Alexoudi M., Argyroudis S., Martin Ch., Monge O., (2004), "Vulnerability and risk assessment of lifelines" in Chapter 9 of the book "Assessing and Managing Earthquake Risk- Geo-scientific and engineering knowledge for earthquake risk mitigation: Developments, Tools and Techniques", Kluwer Book, Editors: C. S. Oliveira, A. Roca, X. Goula, 350-375pp

Pitilakis K, Alexoudi M, Kakderi K, Manou D., Batum E., Raptakis D., (2005), "Vulnerability analysis of water systems in strong earthquakes. The case of Lefkas (Greece) and Duzce (Turkey)" in Intern. Symposium on the Geodynamics of Eastern Mediterranean: Active Tectonics of the Aegean, June 15-18, Istanbul, Turkey

Rashidov, T. E. Kuzmina, A. Mirjalilov, I. Rashidov (2000), "Vulnerability of Lifeline Systems in Tashkent, Uzbekistan", Proceedings of 6th Conference on Seismic Zonation, Palm Springs (CA), Balkema.